

УДК 621.313

UDC 621.313

СНИЖЕНИЕ ПУСКОВОГО ТОКА АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗМЕНЕНИЕМ ПАРАМЕТРОВ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ

REDUCTION OF INRUSH CURRENT FOR INDUCTION MOTORS WITH CHANGING PARAMETERS OF A STATOR WINDING

Ванурин Владимир Николаевич
д.т.н., г.н.с

Vanurin Vladimir Nikolayevich
Dr.Sci.Tech., leading research associate

Пономаренко Константин Борисович
инженер
Северо-Кавказский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Зерноград, Россия

Ponomarenko Konstantin Borisovich
engineer
North-Caucasian Institute of mechanization and electrification of agriculture, Zernograd, Russia

Креймер Алексей Семенович
к.т.н., доцент
ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет», Краснодар, Россия

Kreimer Aleksey Semyonovich
Cand.Tech.Sci., associate professor
Kuban State Agrarian University, Krasnodar, Russia

Приведены схемы статорных обмоток с удвоенной шириной фазной зоны, позволяющие без разрыва цепи питания ограничить величину пускового тока асинхронных двигателей

The schemes of the stator winding with double-wide-phase zone, allowing limiting the level of inrush current of induction motors without breaking the circuit power are presented in the article

Ключевые слова: АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ, ПУСКОВОЙ ТОК, ПУСКОВОЙ МОМЕНТ, СХЕМА СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ, СХЕМА ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Keywords: INDUCTION MOTOR, INRUSH CURRENT, STARTING MOMENT, STATOR WINDING SCHEME, SWITCHING SCHEME

Основу большинства электроприводов составляют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. В отраслях сельскохозяйственного производства их применяют на предприятиях, изготавливающих оборудование для переработки сельскохозяйственной продукции (сепараторы, дробилки корморезки, мясорубки и др.). Двигатели поставляются на комплектацию электроприводов зернопогрузчиков, транспортеров, конвейеров, подъемников, средств малой механизации, строительной техники, холодильных и вакуумных установок, другой стационарной техники.

Проблемой короткозамкнутых двигателей является их большой пусковой ток. Вопрос о том, допустим ли прямой пуск, определяется в основном величиной снижения напряжения в сети при пуске двигателя. Наиболее чувствительными к снижению напряжения являются осветительные лампы, а также электромагнитные пусковые аппараты (например, магнитные пускатели), которые при понижении напряжения могут отключиться и отсоединить двигатель от сети. При частых пусках термические перегруз-

ки от пускового тока влияют на ускорение процесса старения изоляции, что может служить причиной выхода двигателя из рабочего состояния.

Существуют различные способы снижения пускового тока, каждый из которых имеет свои особенности. Задача способов пуска заключается в том, чтобы согласовать пусковые характеристики двигателя с пусковыми характеристиками приводимой техники, при этом пусковой ток не должен превышать допустимых значений (в некоторых странах действуют нормы, исключающие прямой пуск трехфазных двигателей с током при заторможенном роторе более 60 А).

Если прямой пуск вызывает большое падение напряжения в сети, а также для исключения ударов в механических передачах при пуске, снижают подводимое к двигателю напряжение. С этой целью отдельные двигатели выпускают на напряжение 380(Δ)/660(Y) В. При включении статорной обмотки в сеть по схеме звезды линейный пусковой ток уменьшаются практически в три раза, при этом в той же мере уменьшается и момент двигателя.

В период переключения двигатель быстро теряет частоту вращения, для восстановления которой требуется определённой величины ток. Таким образом, недостатком способа является разрыв цепи питания двигателя, что вызывает скачок тока при переключении. Способ практически не подходит для нагрузки с небольшой массой (для безинерционной нагрузки). Кроме того, способ применим только для двигателей, работающих в сети включением обмотки по схеме треугольника.

Для решения проблем пуска асинхронных двигателей разработаны бесконтактные пускатели на основе тиристорного (или транзисторного) коммутатора. Силовым элементом пускателя является ключ в каждой из трех фаз, представляющий собой два встречно параллельно включенных тиристора. Изменяя угол управления тиристором, можно снижать подводимое к двигателю напряжение, ограничивая пусковой ток. После разбега питание двигателя осуществляется через аппарат, шунтирующий коммутатор. К недостатку способа относят добавление в сеть несинусоидальных

токов в период пуска двигателя. Бесконтактные пускатели являются также дорогими устройствами.

Согласно известному выражению, связывающему пусковой момент и пусковой ток трёхфазного двигателя

$$M_n = \frac{3U^2 R_2'}{w_1 (R_k^2 + x_k^2)} = \frac{3R_2'}{w_1} I_{1n}^2,$$

на пусковой ток можно влиять изменением параметров двигателя, чему способствует выполнение статорной обмотки с шириной фазной зоны 120° с последующим преобразованием её в обмотку с шириной фазной зоны 60° [1-3], (рисунки 1).

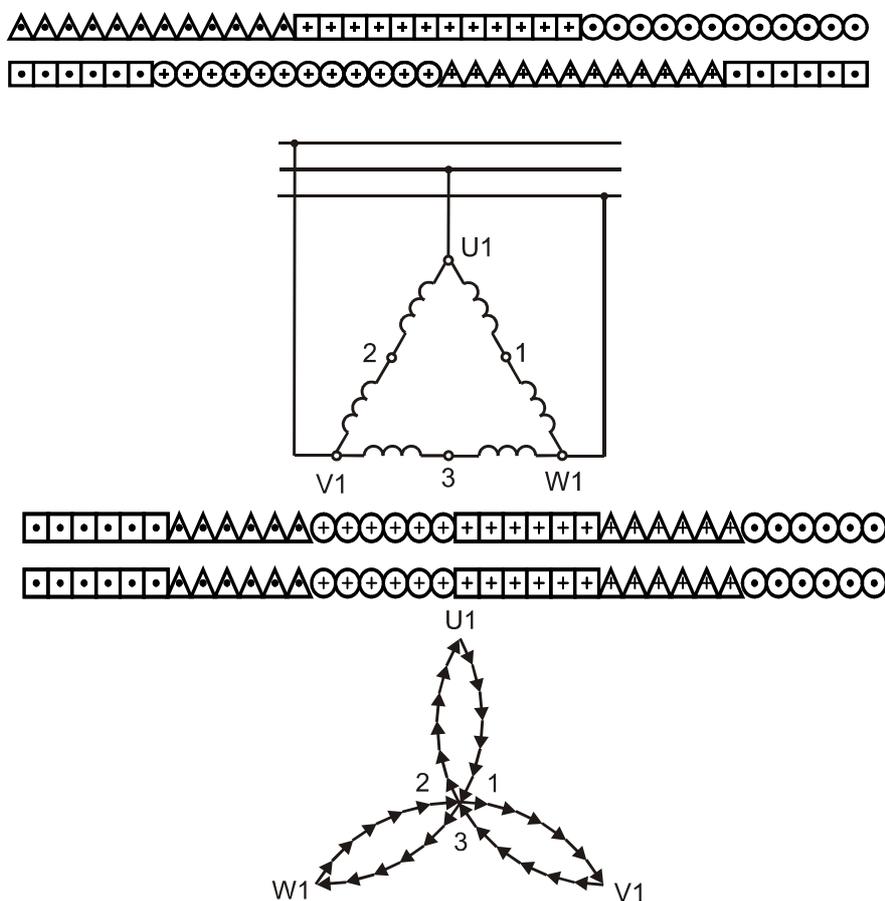


Рисунок 1 – Схемы соединения фаз Δ ($k_{об\Delta} = 0,828$) и Y ($k_{обY} = 0,956$)

При переключении обмотки диаметрального шага по схеме Δ/Y имеют место соотношения витков, потоков и индукций в воздушном зазоре:

$$\frac{w_{\Delta}}{w_{YY}} = \frac{U_{\Delta} k_{o\delta YY} \Phi_{YY}}{U_{YY} k_{o\delta \Delta} \Phi_{\Delta}} = \frac{380 \cdot 0,956 \cdot \Phi_{YY}}{220 \cdot 0,828 \cdot \Phi_{\Delta}} = 2;$$

$$\frac{\Phi_{\Delta}}{\Phi_{YY}} = 1;$$

$$\frac{B_{d\Delta}}{B_{dYY}} = 1.$$

Неизменным будет и линейный намагничивающий ток

$$\frac{\sqrt{3} I_{m\Delta}}{I_{mYY}} = \frac{\sqrt{3} w_{YY} k_{o\delta YY}}{w_{\Delta} k_{o\delta \Delta}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1 \cdot 0,956}{2 \cdot 0,828} = 1.$$

Соотношение фазных намагничивающих токов, соотношение коэффициентов приведения ЭДС роторной обмотки и соотношение коэффициентов приведения сопротивлений роторной обмотки:

$$\frac{I_{m\Delta}}{I_{mYY}} = \frac{1}{\sqrt{3}};$$

$$\frac{k_{e\Delta}}{k_{eYY}} = \frac{w_{\Delta} k_{o\delta \Delta}}{w_{YY} k_{o\delta YY}} = 2 \frac{0,828}{0,956} = \sqrt{3};$$

$$\frac{k_{\Delta}}{k_{YY}} = \frac{w_{\Delta}^2 k_{o\delta \Delta}^2}{w_{YY}^2 k_{o\delta YY}^2} = 2^2 \frac{0,828^2}{0,956^2} = 3.$$

Соотношение приведённых токов роторной обмотки

$$\frac{I'_{2\Delta}}{I'_{2YY}} = \frac{k_{e\Delta}}{k_{eYY}} \cdot \frac{k_{YY}}{k_{\Delta}} = \sqrt{3} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{\sqrt{3}}.$$

Это же соотношение относится к активной составляющей и к индуктивной составляющей токов ротора.

Соотношение активных сопротивлений статорной обмотки (S – сечение провода), а при тех же электрических потерях и соотношение номинальных токов статорной обмотки:

$$\frac{R_{1\Delta}}{R_{1YY}} = \frac{w_{1\Delta}}{w_{1YY}} \cdot \frac{S_{1YY}}{S_{1\Delta}} = 2 \cdot 2 = 4;$$

$$\frac{I_{1n\Delta}}{I_{1nYY}} = \frac{1}{2}.$$

Для индуктивных сопротивлений статорных обмоток

$$\frac{x_{1\Delta}}{x_{1YY}} = \frac{w_{\Delta}^2 k_{об\Delta}^2}{w_{YY}^2 k_{обYY}^2} = 2^2 \frac{0,828^2}{0,956^2} = 3.$$

Соотношение пусковых токов и пусковых моментов двигателя:

$$\begin{aligned} \frac{I_{1n\Delta}}{I_{1nYY}} &= \frac{\frac{\sqrt{3}U}{\sqrt{(R_{1\Delta} + R'_{2\Delta})^2 + (x_{1\Delta} + x'_{2\Delta})^2}}}{\frac{U}{\sqrt{(R_{1YY} + R'_{2YY})^2 + (x_{1YY} + x'_{2YY})^2}}} = \\ &= \sqrt{3} \sqrt{\frac{(R_{1YY} + R'_{2YY})^2 + (x_{1YY} + x'_{2YY})^2}{(R_{1\Delta} + R'_{2\Delta})^2 + (x_{1\Delta} + x'_{2\Delta})^2}} = \\ &= \sqrt{3} \sqrt{\frac{(R_{1YY} + R'_{2YY})^2 + (x_{1YY} + x'_{2YY})^2}{(4R_{1YY} + 3R'_{2YY})^2 + (3x_{1YY} + 3x'_{2YY})^2}} \approx 1; \\ \frac{M_{n\Delta}}{M_{nYY}} &= \frac{\frac{m(\sqrt{3}U)^2 R'_{2\Delta}}{w_1 \left[\sqrt{(R_{1\Delta} + R'_{2\Delta})^2 + (x_{1\Delta} + x'_{2\Delta})^2} \right]^2}}{\frac{mU^2 R'_{2YY}}{w_1 \left[\sqrt{(R_{1YY} + R'_{2YY})^2 + (x_{1YY} + x'_{2YY})^2} \right]^2}} = \\ &= 3 \frac{R'_{2\Delta}}{R'_{2YY}} \cdot \frac{(R_{1YY} + R'_{2YY})^2 + (x_{1YY} + x'_{2YY})^2}{(R_{1\Delta} + R'_{2\Delta})^2 + (x_{1\Delta} + x'_{2\Delta})^2} = \\ &= 3 \frac{3R'_{2YY}}{R'_{2YY}} \cdot \frac{(R_{1YY} + R'_{2YY})^2 + (x_{1YY} + x'_{2YY})^2}{(4R_{1YY} + 3R'_{2YY})^2 + (3x_{1YY} + 3x'_{2YY})^2} \approx 1. \end{aligned}$$

Снижению пускового тока способствует укорочение шага обмотки (рисунок 2). При соединении фаз в треугольник значительно возрастает составляющая индуктивного сопротивления обмотки от потоков дифференциального рассеяния (МДС содержит и чётные высшие гармоники).

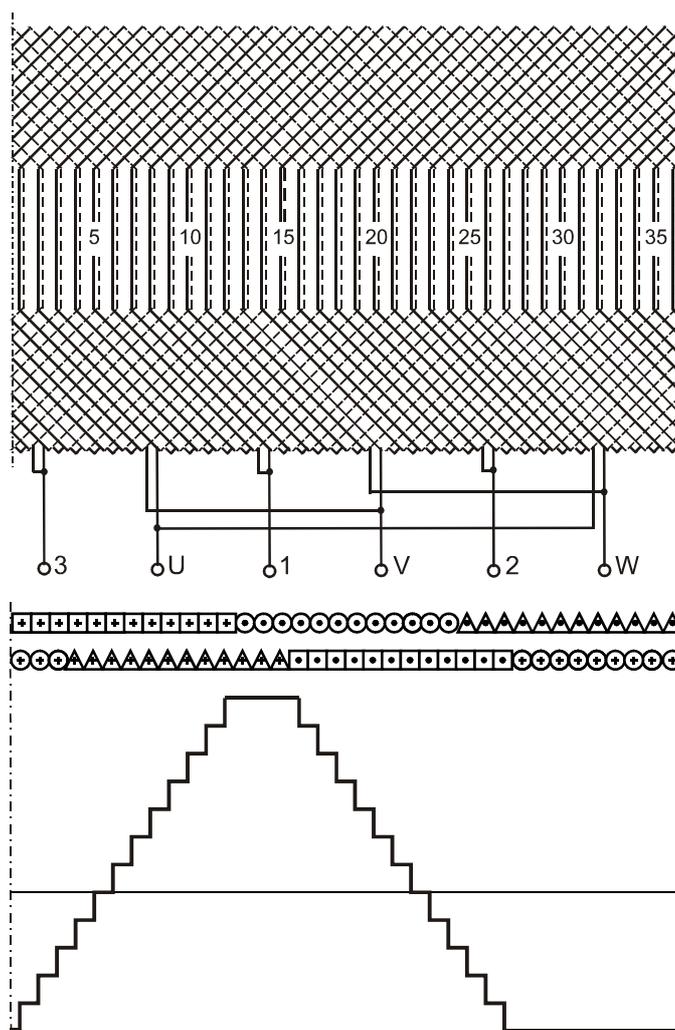


Рисунок 2 - Схема двухполюсной обмотки и её МДС при соединении фаз Δ

При шаге $y = 15$ относительные амплитуды гармоник МДС при соединении фаз в треугольник (таблица 1)

$$\frac{F_{nm}}{F_m} = \frac{pk_{обн}}{nk_{об}} = \frac{1}{n} \cdot \frac{\sin n 60^\circ \cdot \sin n 75^\circ}{q \sin n 5^\circ} = \frac{1}{n} \cdot \frac{12 \sin n 5^\circ \cdot \sin n 75^\circ}{\sin 60^\circ \cdot \sin 75^\circ}$$

Таблица 1 - Относительные амплитуды гармоник МДС, Δ

n	1	2	4	5	7	8	10	11	13
F_{mv}/F_m	1	0,133	0,0571	0,011	0,0058	0,0152	0,006	0,01	0,008

Вид токов и моментов при пуске двигателя показан на рисунках 3 и 4.

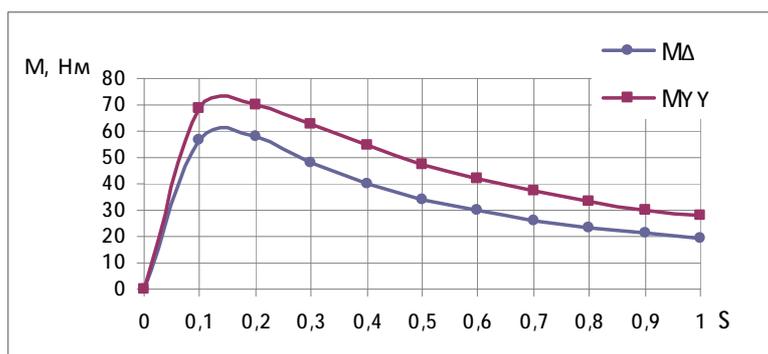
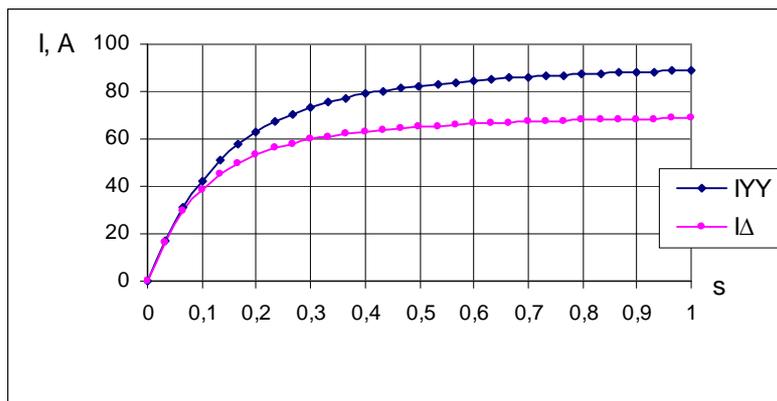


Рисунок 3 – Вид токов и моментов от основной гармоники

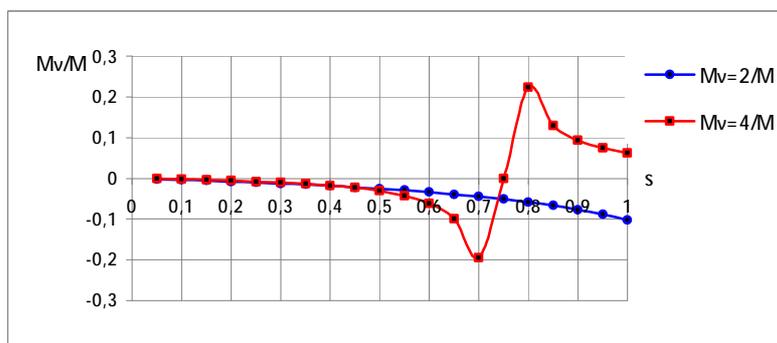


Рисунок 4 – Вид относительных моментов от гармоник $\nu = 4$ и $\nu = 2$

Сведения о двигателе с четырёхполюсной обмоткой при той же степени укорочения шага на базе АИР160S4 приведены на рисунках 5-7.

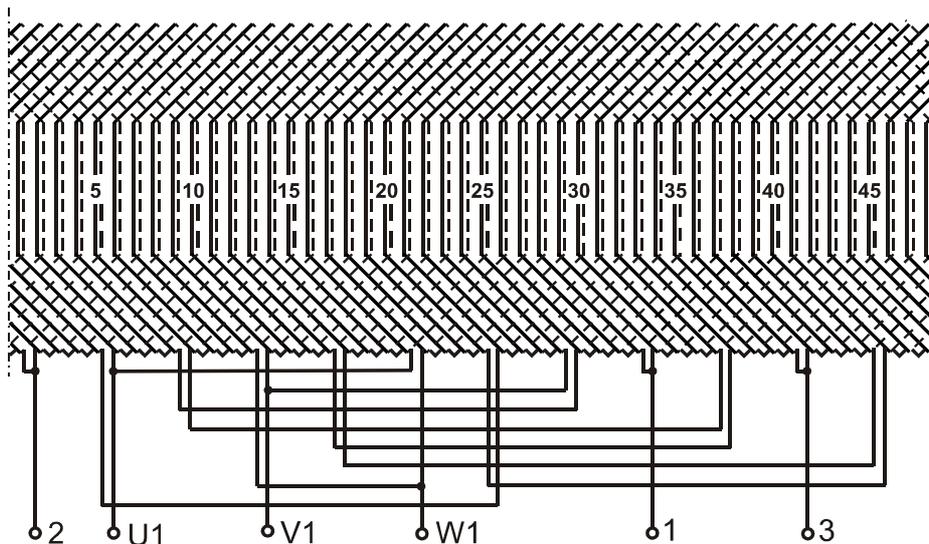


Рисунок 5 – Схема четырёхполюсной обмотки, $y = 10$

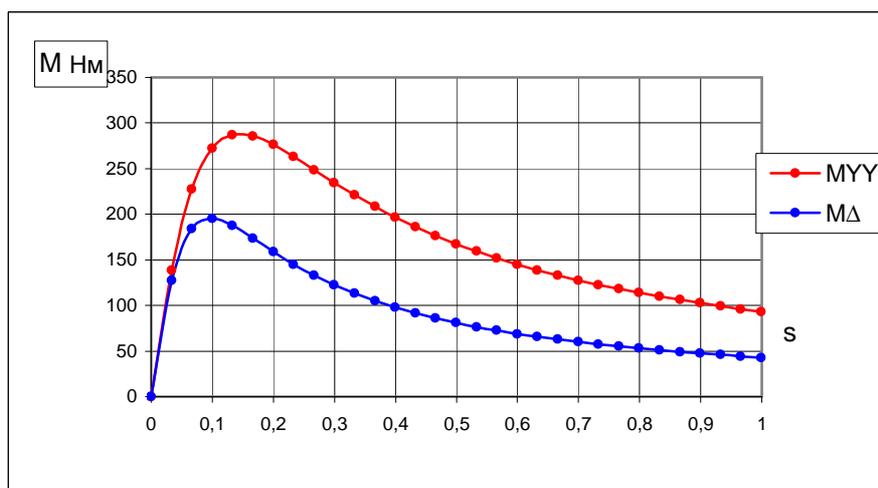
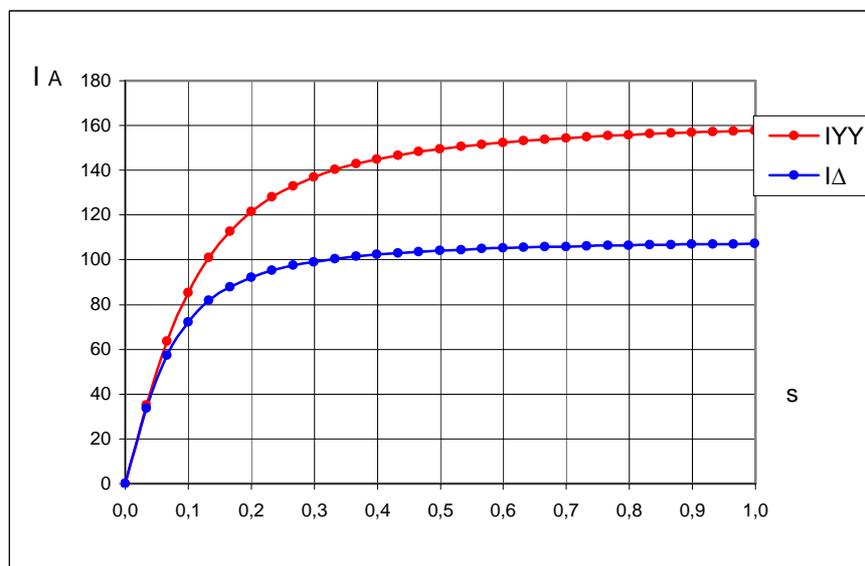


Рисунок 6 – Вид токов и моментов от основной гармоники

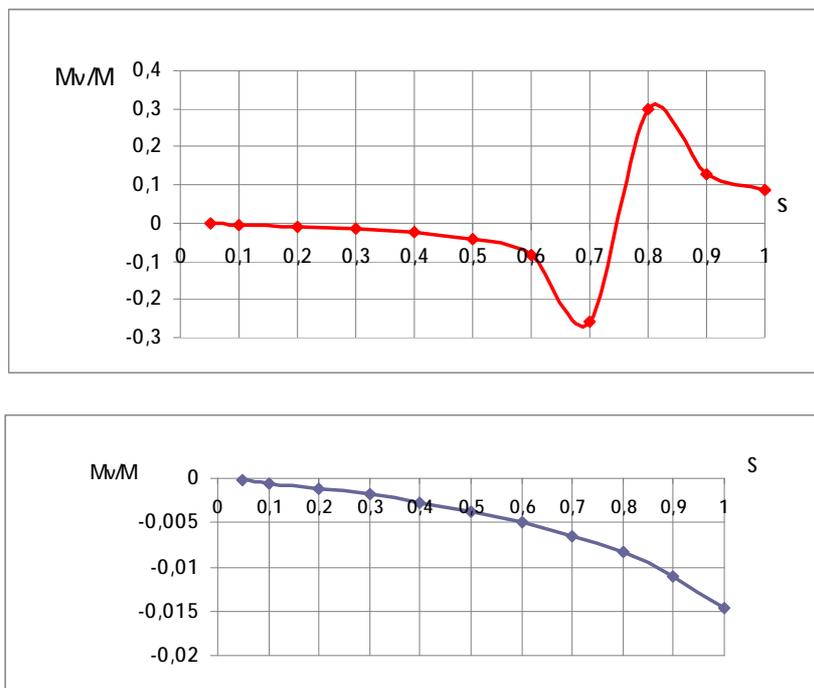


Рисунок 7 – Вид относительных моментов от гармоник $\nu = 8$ и $\nu = 4$

Уменьшить влияние гармоник на пуск двухполюсного двигателя позволяет обмотка с чередованием катушек в группах 1 – 4 – 1 (рисунок 8).

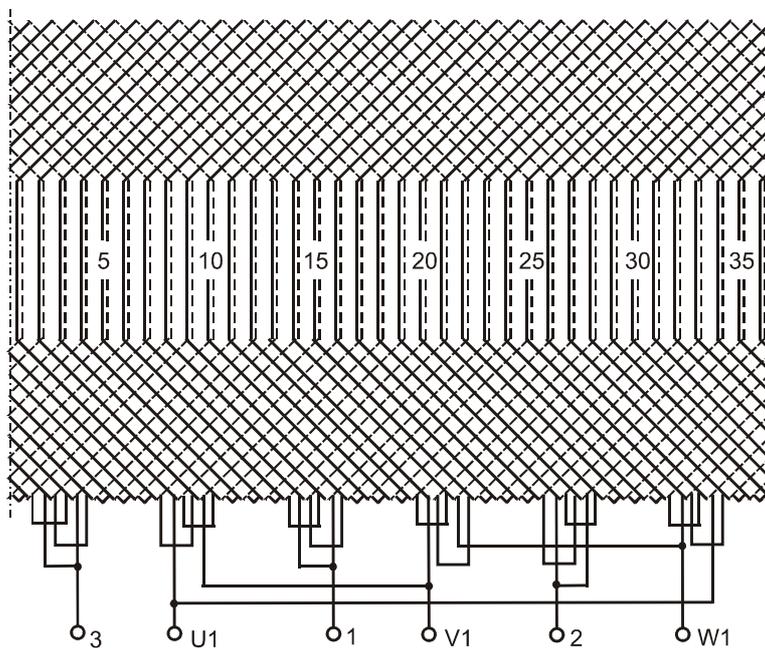


Рисунок 8 – Схема двухполюсной обмотки, $y = 15$

Амплитуды гармоник в долях ступенек МДС (рисунок 9)

$$F_{nm} = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} F_x \cos v x dx = \frac{2}{\pi v} (\sin v 10^{\circ} + \sin v 30^{\circ} + \sin v 40^{\circ} + \sin v 50^{\circ} + \sin v 60^{\circ} + \sin v 70^{\circ} + \sin v 80^{\circ} + \sin v 90^{\circ} + \sin v 100^{\circ} + \sin v 110^{\circ} + \sin v 120^{\circ} + \sin v 140^{\circ}).$$

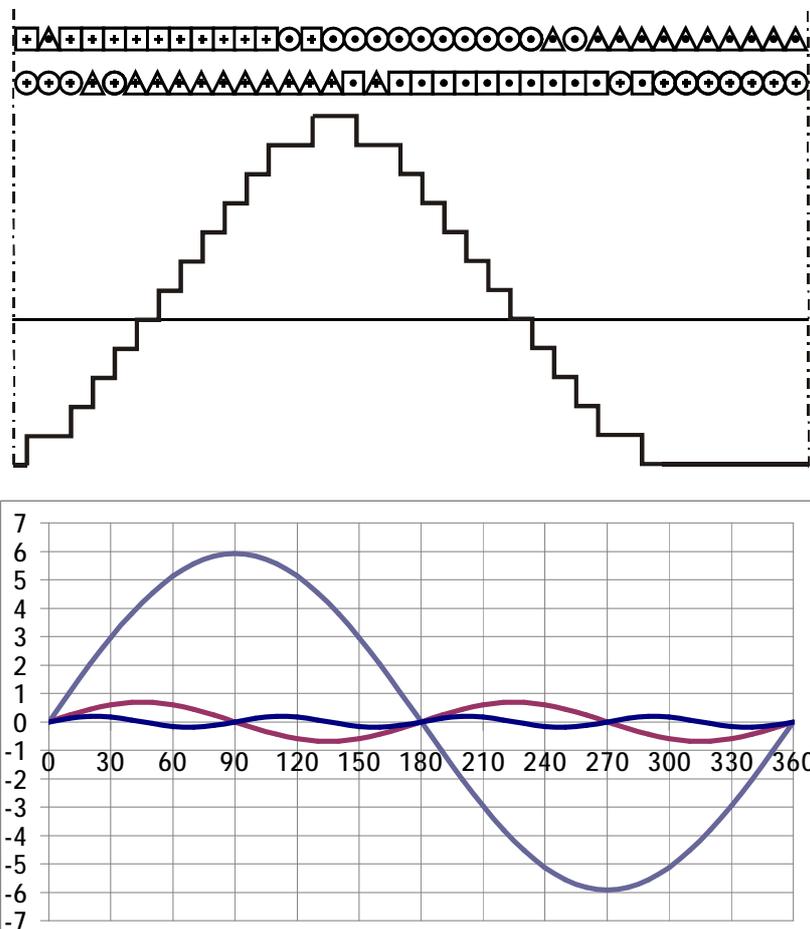
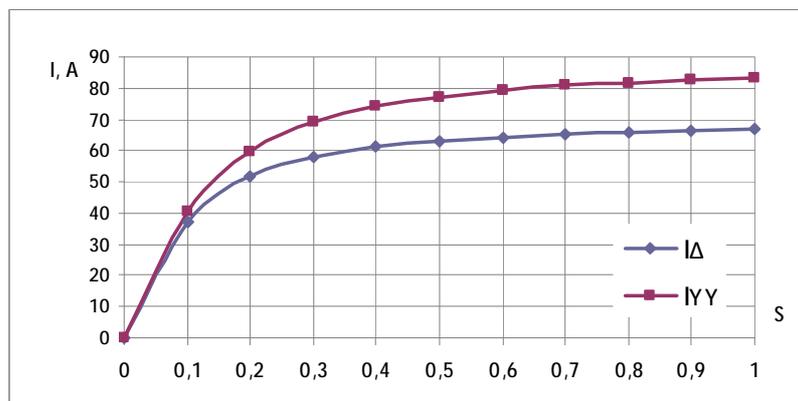


Рисунок 9 – Основная гармоника и первые высшие гармоники МДС, Δ



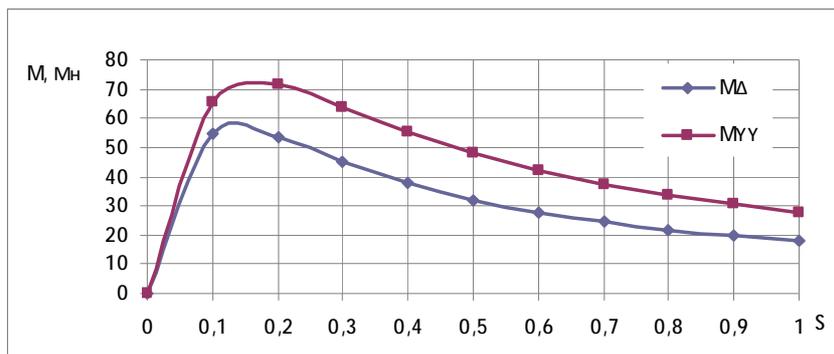


Рисунок 10 – Вид токов и моментов от основной гармоники

Относительные моменты от высших гармоник (рисунок 11):

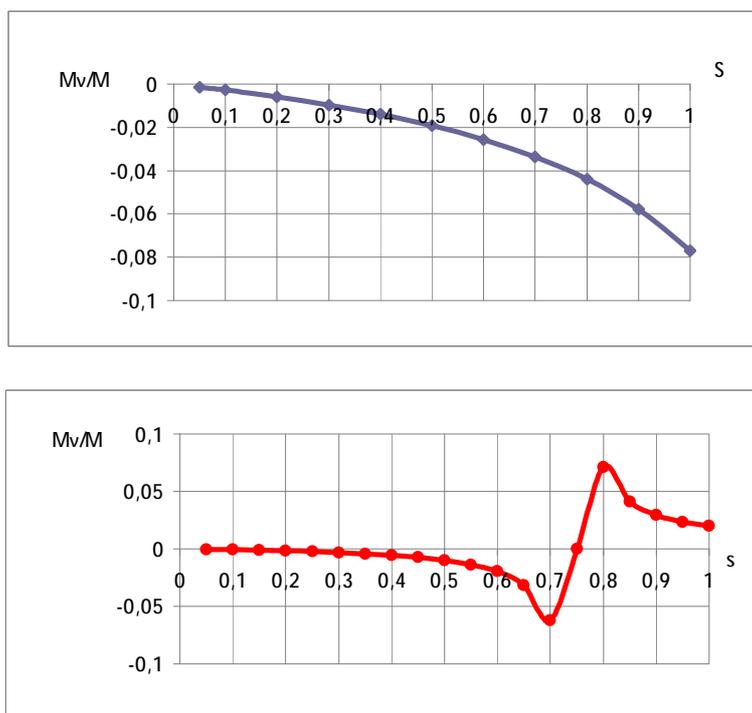


Рисунок 11 – Вид относительных моментов от гармоник $\nu = 2$ и $\nu = 4$

Для этой же обмотки с шагом $y = 14$ соотношение пусковых токов:

$$I_{1n\Delta} / I_{1nYY} = 0,56;$$

$$M_{n\Delta} / M_{nYY} = 0,31.$$

Относительные моменты от высших гармоник (рисунок 12).

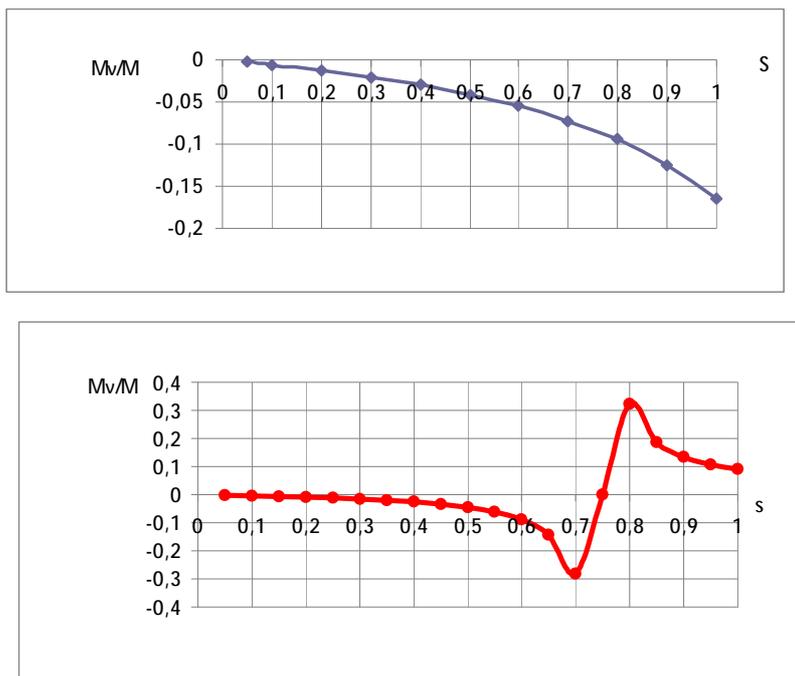
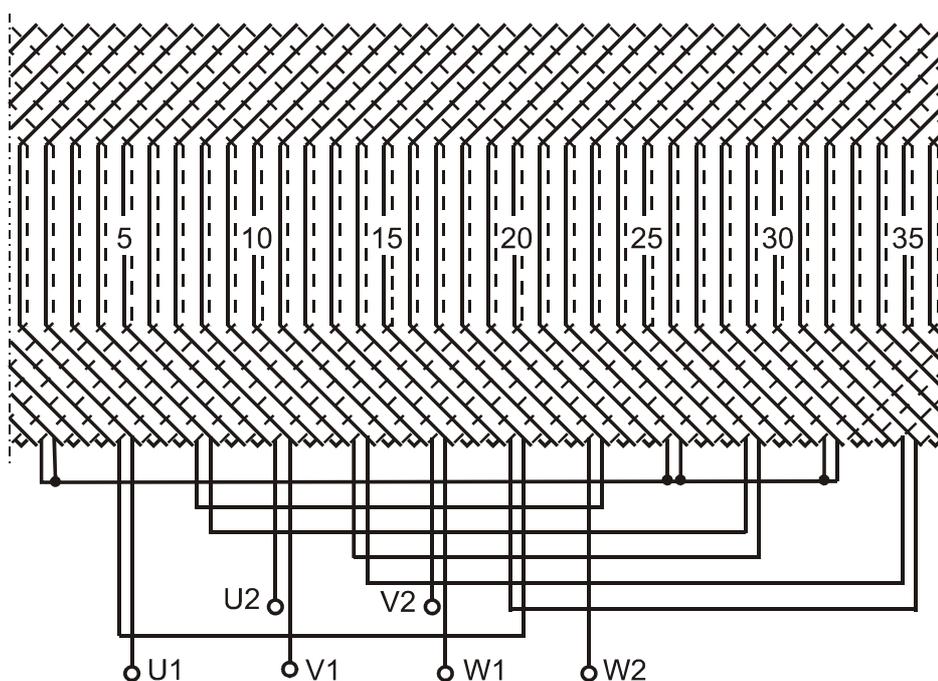


Рисунок 12 – Относительные моменты от гармоник $\nu = 2$ и $\nu = 4$

При диаметральном шаге статорной обмотки, когда проводники частей фазных обмоток укладываются в те же пазы статора, уменьшение пускового тока двигателя возможно и переключением частей обмотки с одинаковым или с разным сечением проводников по схеме Y/Y_Y, рисунок 13.



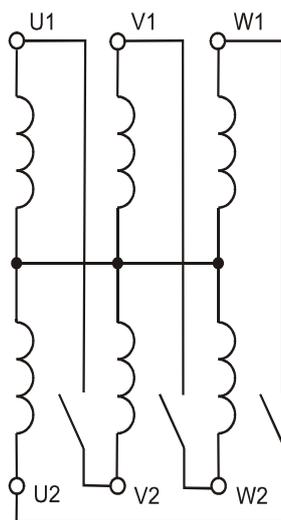


Рисунок 13 – Схема четырёхполюсной обмотки и схема соединения фаз Y/Y

Для двигателя на базе АИР132М4 и соотношением сечения проводов частей 1/2 соотношение пускового тока и пускового момента:

$$I_{1nY} / I_{1nYY} = 0,85;$$

$$M_{nY} / M_{nYY} = 0,72.$$

Проводники разного сечения способствуют дополнительному снижению пускового тока и при переключении обмотки по схеме Δ/Y. На рисунке 14 сопротивления частей фазных обмоток двигателя 4А100S4 с длиной статора $l = 110$ мм (20 витков в катушке, напряжение 220 В) составляют 1,33 Ом и 2,29 Ом.

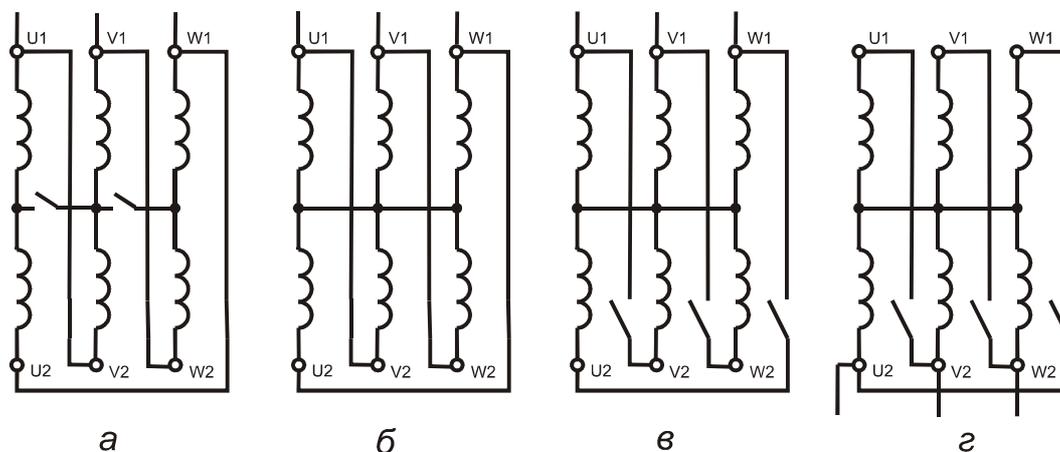


Рисунок 14 – Схемы соединений четырёхполюсной обмотки

При напряжении 201 В пусковой ток составил:

- 50 А при соединении фаз Δ (рисунок 14а);
- 56 А при соединении фаз Y_Y (рисунок 14б);
- 34 А при соединении фаз Y (рисунок 14в);
- 43 А при соединении фаз Y (рисунок 14г).

Выводы

1. Решению проблемы снижения пускового тока асинхронных двигателей способствуют переключения статорных обмоток Δ/Y_Y и Y/Y_Y без разрыва цепи питания.
2. Снижение пускового тока по схеме переключения Δ/Y_Y эффективно для двигателей с двухслойными обмотками укороченного шага.
3. Снижение пускового тока по схеме переключения Y/Y_Y эффективно для двигателей с двухслойными обмотками диаметального шага.
4. При соединении фаз Y_Y габарит двигателя используется полностью.

Литература

1. В.Н. Ванурин. Статорные обмотки с шириной фазной зоны 120° асинхронных электрических машин / Ванурин В.Н., Богатырев Н.И. Джанибеков К.А-А., Пономаренко К.Б. – Зерноград: СКНИИМЭСХ, 2012. - 84 с.
2. Богатырев Н.И., Ванурин В. Н., Креймер А. С., Екименко П.П. Асинхронные генераторы для систем автономного энергоснабжения. Часть 1. Обоснование параметров асинхронного генератора. Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – №59(05). – 26 с.
- 3 Богатырев Н.И., Ванурин В. Н., Креймер А. С., Екименко П.П. Асинхронные генераторы для систем автономного энергоснабжения. Часть 2 Базовая теория формирования статорных обмоток асинхронных генераторов и методы расчёта обмоток. Научный журнал КубГАУ [Электронный ресурс]. – Краснодар: КубГАУ, 2010. – №60(06). – 31 с.