

Устройство и изучение гибридных обмоток типа звезда – треугольник в высоковольтных асинхронных двигателях.

Аннотация – В данной статье описывается гибридное соединение типа звезда – треугольник в высоковольтных асинхронных двигателях. Низкий уровень гармоник в обмотке достигается путем изучения влияния друг на друга трехфазных обмоток, соединенных в звезду и в треугольник с целью приблизить форму кривой магнитодвижущей силы (МДС) в воздушном зазоре к синусоиде. По сути, два набора обмоток работают в шестифазном режиме. Данная статья пытается подтвердить факт увеличения коэффициента фундаментального распределения МДС статора по сравнению со стандартными трехфазными обмотками. Технология перерасчета стандартных двуслойных петлевых обмоток для высоковольтных асинхронных двигателей в гибридные петлевые обмотки типа звезда – треугольник описана с помощью общей теории перемотки, которая часто применяется для двигателей малого и среднего размера. При расчёте обмоток обращаются к таким параметрам как: диаметр проводника, количество витков в катушке, параллельные ветви, соединенные в звезду и треугольник. Схема обмоток асинхронного двигателя мощностью 1250 кВт и напряжением 6 кВ была предложена и проверена экспериментально; Результаты испытаний подтвердили возможность значительного увеличения КПД без увеличения стоимости.

Ключевые слова – высокоэффективность, высоковольтные асинхронные двигатели, шестифазная обмотка, гибридное соединение типа звезда – треугольник.

I. Введение

Крупногабаритные высоковольтные асинхронные двигатели широко используются в промышленности, преимущественно в составе приводов насосов и вентиляторов. В развитом мире такие двигатели составляют 80% всех электродвигателей и потребляют около 38% вырабатываемой электроэнергии [1]. Несмотря на уже подтверждённую эффективность асинхронных машин, чтобы удовлетворить все более жесткие требования законодательства в области энергосбережения, необходимо дальнейшее улучшение показателей КПД у всех машин от однофазных насосных двигателей до гигантских промышленных приводов [2]. Сейчас производители стремятся разрабатывать машины с высоким КПД и сокращать потери в двигателе применяя самые разнообразные подходы и технологии. Многие страны вводят новые стандарты, чтобы повысить эффективность работы электродвигателей. Например, Закон об энергетической политике США от 1992 года и Закон об энергоэффективности Канады. Вся отрасль стала меняться после введения

сверхвысоких уровней КПД Национальной ассоциацией изготовителей электрооборудования (NEMA) [3]. Существует множество различных способов повысить эффективность асинхронных двигателей в промышленных масштабах. Были изучены технологии оптимизации геометрии и схем обмоток для повышения коэффициента мощности и, следовательно, сокращения потерь в проводниках. Путем модернизации производства и использования электротехнических сталей можно существенно уменьшить потери в магнитопроводе [7], [8]. Также в продаже появляется сталь с высокой магнитной проницаемостью, а методы производства литых медных роторов с низким сопротивлением значительно улучшились [9], [10]. Недостатками литых изделий являлись короткий срок службы и сложность в их производстве, однако разработки последних лет, связанные со сплавами на основе никеля, решают эти проблемы [10]. Всё перечисленное выше является наиболее распространенными способами увеличения КПД двигателей [8]. Примечательно, что все производители, улучшая корпуса и компоненты двигателей, продолжают использовать традиционные схемы соединения обмоток.

В нынешних условиях чрезвычайно важно разрабатывать новые технологии повышения энергоэффективности без значительного увеличения себестоимости продукции. Многие компании пытаются модернизировать всю линейку выпускаемой продукции с учётом требований энергоэффективности [11]. Одним из хороших способов повысить КПД высоковольтного двигателя является модернизация системы охлаждения [12], [13]. Данная статья рассматривает иной способ увеличения КПД, а именно: двухслойные высоковольтные обмотки (как противоположность низковольтным машинам, намотанным внавал). Путём комбинирования обмоток звезды и треугольника, можно снизить характерные пространственные гармонические искажения в обмотках, что в дальнейшем уменьшает потери, вызываемые вихревыми токами. Кроме того, обмотки усиливают основной коэффициент распределения таким образом, что можно сократить количество витков в катушках и сохранить количество используемой меди, а также уменьшить сопротивление статора (т.е. сократить потери в проводниках).

Та же самая идея применяется к использованию многофазных обмоток (в которых количество фаз больше трёх). В асинхронных приводах такие обмотки обеспечивают более низкую пульсацию крутящего момента при возросшей частоте, а также уменьшение гармоник тока в роторе [14] и улучшенное распределение нагрузок в многофазном инверторе, как и высокий КПД [15]. Большое количество фаз также будет преимуществом в многоскоростных приводах, развернутый обзор был проведен в [16]. И всё-таки несмотря на то, что обмоточный коэффициент в многофазных обмотках выше, следует обратить внимание на пространственные гармонические искажения в воздушном зазоре, а также на временные гармоники напряжения [17]. Временные гармоники напряжения в шестифазной схеме могут вызывать повышенный уровень гармоник тока (из-за управления с помощью чего-то вроде инвертора с шестью ключами, а не полной широтно-импульсной модуляции

в бюджетной схеме) [18]. Предложенная в данной работе гибридная обмотка типа звезда – треугольник, намотанная внавал, может быть использована без изменений в двигателях малых и средних габаритов. При этом, катушки звезды и треугольника будут иметь разное число витков и толщину проводника. Однако в высоковольтных двигателях пазы статора открыты и имеют прямоугольную форму для более удобной намотки прямоугольными проводниками по стандартной схеме. Как правило, количество витков в катушке у высоковольтного двигателя ниже по сравнению с двигателями маленьких и средних габаритов, намотанными внавал. Следовательно, требуется совершенно другой подход к намотке. Кроме того, при расчёте гибридной обмотки для высоковольтных асинхронных двигателей нужно соблюдать некоторые ограничения.

В данной статье рассматривается теория использования гибридных обмоток типа звезда – треугольник. Эта обмотка не распространена среди серийно-выпускаемых машин, хотя Cistelescan и др. недавно опубликовали серию работ [19]-[21], в которых этот тип обмотки был использован в небольшом низковольтном двигателе. По их утверждению, которое они подкрепили ссылками на соответствующие работы, это не новый тип обмотки. Дальнейший подробный анализ приведен в [22]. Для высоковольтных машин требуются несколько иные расчёты. Системы обмоток рассматривались в статье [23]. В этой же работе авторы зашли немного дальше и рассмотрели гибридные обмотки типа звезда-треугольник в контексте их применения в высоковольтных машинах. Была создана методология расчета гибридных обмоток. Её использовали для изготовления четырёхполюсного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором мощностью 1250 кВт, напряжением 6 кВ. Работа подтверждена экспериментально, и показано, что гибридная обмотка типа Y-Δ обладает повышенным КПД

II. Предлагаемая схема обмоток

Стандартные трёхфазные двуслойные петлевые обмотки могут быть соединены как в звезду, так и в треугольник. Точно так же существуют два вида совмещенных обмоток: параллельное соединение звезды и треугольника, как показано на Рис. 1(a), и обмотка, соединенная в звезду снаружи, в треугольник внутри (также известная как последовательное соединение звезды и треугольника или, как авторы называют его в данной статье, гибридное соединение), показанное на Рис. 1(b). Лучше всего изготавливать высоковольтный двигатель с использованием обмотки, соединенной в звезду снаружи, в треугольник внутри. Такой тип обмотки и будет главным предметом обсуждения в данной работе. При параллельном соединении, в треугольнике возникают циркулирующие токи нулевого порядка (как показано на Рис. 1(a)), что приводит к ненужным и, возможно, избыточным потерям в обмотках. Причина заключается в том, что обмотки звезды и треугольника имеют одинаковое напряжение возбуждения, однако из-за взаимодействия токов между собой, они могут находиться в дисбалансе. Гибридная обмотка типа Δ-Y соединенная

последовательно имеет более ограниченный ток из-за типа своего соединения. Векторы тока такой обмотки представлены на Рис. 1(с). Если напряжения сбалансированы и используется правильная ориентация катушек и соотношение витков катушек, то получается соединение в две звезды, как описано в [18]. Эта схема может быть переделана в шестифазную схему, как показано на Рис. 1(д). Следует принимать во внимание, что при нечетном количестве фаз векторы распределены на 360 эл. градусов, в то время как при четном количестве, векторы распределены на 180 эл. градусов. Балансировка обмоток основана на том, что обмотка Δ имеет в $\sqrt{3}$ раза больше последовательных витков, чем обмотка Y , как показано сравнением величин тока на рис. 1(с) и магнитодвижущей силы статора (ММФ) $N_x \bar{I}_x$ на рис. 1(д) и (е). Это и будет обсуждаться в данной статье, поскольку данное ограничение может вызвать проблемы в высоковольтной машине с жесткими катушками и установленными требованиями к изготовлению.

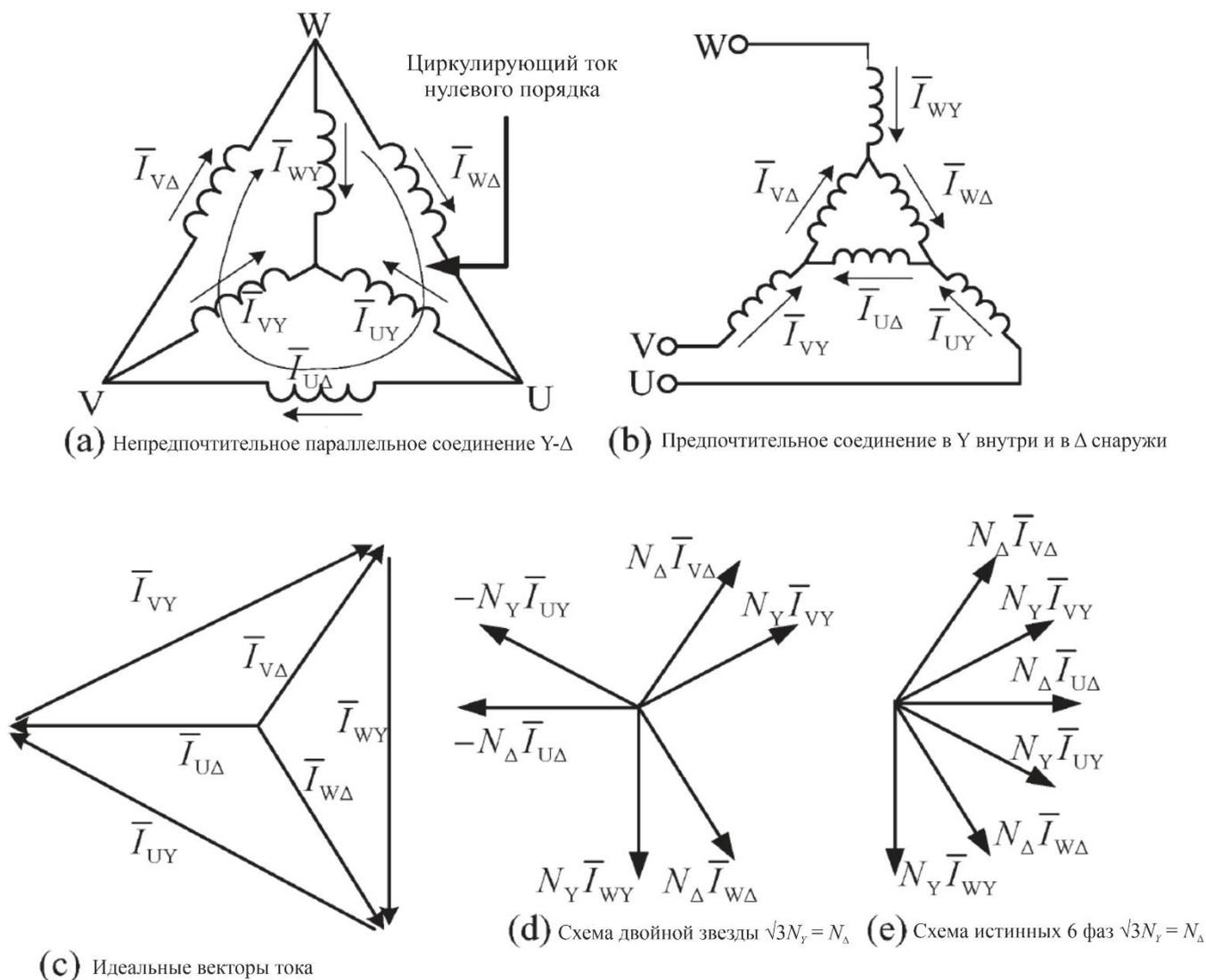


Рис. 1. Различные варианты обмоток и векторов. (a) Непредпочтительное параллельное соединение Y- Δ . (b) Предпочтительное соединение в Y внутри и в Δ снаружи. (c) Векторы тока гибридной обмотки, соединенной в Y внутри и в Δ снаружи. (d) Высокопроизводительное расположение векторов двойной звезды,

полученная от совмещения векторов (с) и обмотки (b). (е) Векторы двойной звезды, перестроенные под схему истинных 6 фаз.

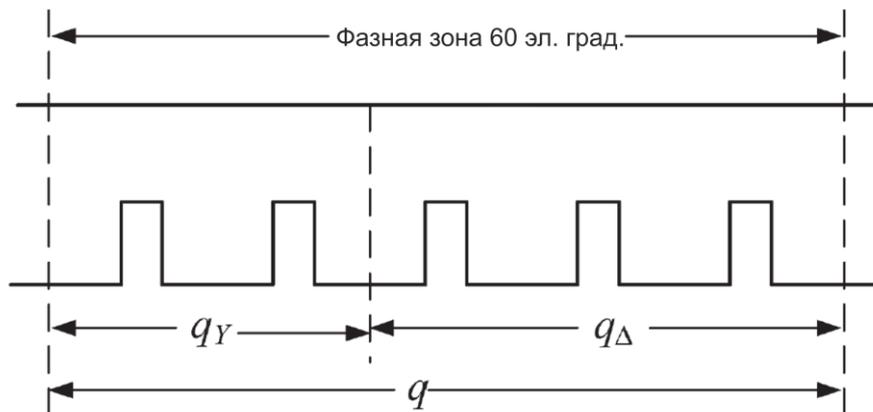


Рис. 2. Фазная зона 60° на обмотки звезды и треугольника

А. Основной принцип работы гибридной обмотки типа звезда – треугольник

В катушках низковольтных машин можно играть количеством витков и толщиной проводника. Однако порядок расположения катушек в высоковольтных двигателях более строгий. Поэтому мы не будем перебирать разные варианты исполнения катушек. Вместо этого мы пересмотрим соединение их выводов. В каждой фазной зоне гибридной обмотки, которая занимает 60 эл. градусов (петлевая обмотка), есть q пазов. Их нужно разделить на две части: одна для обмотки звезды с количеством пазов равным q_Y , и другая для обмотки треугольника с количеством пазов, равным q_Δ , как показано на рис. 2. Выводы каждой части соединены так, что образуют две независимых обмотки, после чего обмотки соединяются в гибридную обмотку, как показано на рис. 1 (b). Обратите внимание, что для правильной работы гибридной обмотки, нужно синхронизировать две трёхфазные обмотки, из которых она состоит. Из-за этого направление вращения МДС (или направление вращения двигателя) нельзя изменить в противоположную сторону обычным способом, просто поменяв местами две фазы. Впрочем, многие двигатели предполагают однонаправленное использование.

Внимательное изучение векторной схемы на рис. 1(с) показывает, что токи могут быть описаны с помощью:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{U\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_{UY} < 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_U < 30^\circ \\ \bar{I}_{V\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_{VY} < 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_V < 30^\circ \\ \bar{I}_{W\Delta} &= \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_{WY} < 30^\circ = \frac{1}{\sqrt{3}} \bar{I}_W < 30^\circ \end{aligned} \tag{1}$$

где под \bar{I}_{UY} , \bar{I}_{VY} и \bar{I}_{WY} понимаются фазные токи обмотки звезды, а под $\bar{I}_{U\Delta}$, $\bar{I}_{V\Delta}$ и $\bar{I}_{W\Delta}$ – фазные токи треугольника. Так как ток звезды это $\sqrt{3}$ от тока треугольника, то для получения равной МДФ в обеих

обмотках, количество витков катушек звезды должно быть $1/\sqrt{3}$ от количества витков катушек треугольника. Как бы то ни было, как уже обсуждалось ранее, соотношение витков в катушках обмоток высоковольтных двигателей должно быть почти одинаковым из-за сложностей при их изготовлении т.к. очень сложно получить соотношение витков двух обмоток близким к $\sqrt{3}$, особенно когда в катушке очень мало витков. Однако, возможно, существуют другие, более предпочтительные соотношения витков. Анализ, приведенный в последующих разделах, покажет, что в зависимости от выбранного соотношения, можно уменьшить гармонические искажения.

Коэффициенты распределения двух обмоток могут быть выведены независимо при использовании соответствующего номера паза каждой обмотки, т. е. q_Y и q_Δ . Для v гармоники

$$K_{dvY} = \frac{\sin \frac{vq_Y\alpha}{2}}{q_Y \sin \frac{v\alpha}{2}}$$

$$K_{dv\Delta} = \frac{\sin \frac{vq_\Delta\alpha}{2}}{q_\Delta \sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (2)$$

где K_{dvY} и $K_{dv\Delta}$ обозначают коэффициент распределения для звезды и треугольника соответственно. Шаг обмотки обозначается α , а v обозначает номер гармоники, рассчитаны по формуле $v = 6k \pm 1$, где $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

Так как амплитуды и фазы разных обмоток отличаются друг от друга, коэффициенты распределения в гибридной обмотке должны выводиться из объединённой МДС. Витки катушек двух обмоток будут обозначаться как N_Y и N_Δ . Вся совмещенная схема питается трёхфазным симметричным током. Предположим, что фаза А расположена на пространственном углу v , так, что МДС v гармоники в звезде и треугольнике равняется

$$f_{Yv}(\theta, t) = F_{\phi Yv} \cos v\theta \cos \omega t + F_{\phi Yv} \cos v(\theta - 120^\circ) \cos(\omega t - 120^\circ) + F_{\phi Yv} \cos v(\theta + 120^\circ) \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (3)$$

$$f_{\Delta v}(\theta, t) = F_{\phi \Delta v} \cos v(\theta + 30^\circ) \cos(\omega t + 30^\circ) + F_{\phi \Delta v} \cos v(\theta - 90^\circ) \cos(\omega t - 90^\circ) + F_{\phi \Delta v} \cos v(\theta + 150^\circ) \cos(\omega t + 150^\circ) \quad (4)$$

где при помощи ωt обозначаются угловое отклонение по времени тока возбуждения. В формулах 3 и 4, коэффициенты МДС могут быть определены с помощью

$$F_{\phi Yv} = \frac{2\sqrt{2} S_{qY} N_Y}{\pi v a_Y} I k_{pYv} k_{dYv} = \frac{2\sqrt{2} S_{qY} N_Y}{\pi v a_Y} I k_{pYv} \frac{\sin \frac{vq_Y\alpha}{2}}{\sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (5)$$

$$F_{\phi_{\Delta v}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{S_{q\Delta} N_{\Delta}}{\sqrt{3} v a_{\Delta}} I k_{p\Delta v} k_{d\Delta v} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{S_{qY} N_{\Delta}}{\sqrt{3} v a_{\Delta}} I k_{p\Delta v} \frac{\sin \frac{v q_{\Delta} \alpha}{2}}{\sin \frac{v \alpha}{2}} \quad (6)$$

где α используется для обозначения номера параллельной ветви обмоток, а S для обозначения коэффициента. Для двухслойной петлевой обмотки $S = 2$, а для однослойной петлевой обмотки $S = 1$. Это показывает наличие двух сторон катушки двухслойной обмотки в каждом пазе. I обозначает среднеквадратичное значение значения тока статора. k_{pYv} и $k_{p\Delta v}$ обозначают коэффициенты укорочения шага двух этих обмоток, которые обозначены как k_{pv} . Из источника [25] мы знаем, что k_{pv} равняется

$$k_{pv} = \sin v \left(\frac{\tau}{mq} \times \frac{\pi}{2} \right) \quad (7)$$

где m это количество фаз, который обычно равен 3. τ является шагом обмотки статора. Таким образом, укороченный шаг 8/9 означает, что каждая катушка отстоит от другой на 8 пазов, а расстояние между полюсами — 9 пазов. Чтобы выполнить данную схему, нужно использовать петлевые обмотки, как те, которые мы и рассматриваем в данной работе. Таким образом, в каждом пазе лежат по две стороны катушки: одна в верхней половине пазы, другая — в нижней. Из формулы (7) можно получить такое значение τ , при котором можно избавиться от определенных гармонических искажений. Таким образом, первая гармоника и v гармоника МДС могут быть описаны как

$$\begin{aligned} f_1(\theta, t) &= f_{Y1}(\theta, t) + f_{\Delta 1}(\theta, t) = \frac{1,35}{p} N_{\phi Y-\Delta} K_{dpY-\Delta} k_{p1} I \cos(\theta_s - \omega t) \\ f_v(\theta_s, t) &= f_{Yv}(\theta, t) + f_{\Delta v}(\theta, t) = \frac{1,35}{vp} N_{\phi Y-\Delta} K_{dvpY-\Delta} k_{pv} I \cos(v\theta_s \mp \omega t) \end{aligned} \quad (8)$$

где p — количество пар полюсов. Равные коэффициенты распределения первой гармоники и v гармоники $K_{d1Y-\Delta}$ и $K_{dvY-\Delta}$ могут быть определены как

$$\begin{aligned} K_{d1Y-\Delta} &= \frac{\sin \frac{q_Y \alpha}{2} + \frac{N_{\Delta} a_Y}{\sqrt{3} N_Y a_{\Delta}} \sin \frac{q_{\Delta} \alpha}{2}}{\left(q_Y + \frac{a_Y N_{\Delta} q_{\Delta}}{\sqrt{3} a_{\Delta} N_Y} \right) \sin \frac{\alpha}{2}} \\ K_{dvY-\Delta} &= \frac{\sin \frac{v q_Y \alpha}{2} + (-1)^k \left(\frac{N_{\Delta} a_Y}{\sqrt{3} N_Y a_{\Delta}} \right) \sin \frac{v q_{\Delta} \alpha}{2}}{\left(q_Y + \frac{q_{\Delta} N_{\Delta} a_Y}{\sqrt{3} N_Y a_{\Delta}} \right) \sin \frac{\alpha}{2}} \end{aligned} \quad (9)$$

где $v = 6k \pm 1$, $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, а эквивалентное количество витков данной гибридной обмотки $N_{\phi Y-\Delta}$ определяется с помощью

$$N_{\phi Y-\Delta} = pS \left[\frac{qY N_Y}{a_Y} + \frac{q_{\Delta} N_{\Delta}}{\sqrt{3} a_{\Delta}} \right]. \quad (10)$$

В. Анализ гармонических искажений

Уравнения (8) и (9) показывают, что наличие гармоник в гибридной обмотке тесно связано с количеством витков в катушках, количеством ветвей, соединенных параллельно и количеством пазов на полюс фазы. Поскольку каждые 60° делятся на две секции, а $q = q_Y + q_{\Delta}$, необходимо рассмотреть случаи, в которых значение q является чётным или нечётным.

В первом случае, предположим, что

$$q_{\Delta} = q_Y = q/2 \quad (11)$$

так, что $K_{dpvY} = K_{dpv\Delta}$. Вернёмся к уравнению (9), если $a_{\Delta} = a_Y$ и $N_{\Delta} / N_Y = 3$, коэффициенты распределения можно вывести как

$$K_{d1} = \frac{2 \sin \frac{q\alpha}{4}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$K_{dv} = \frac{\sin \frac{vq\alpha}{4} + (-1)^k \sin \frac{vq\alpha}{4}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}} \quad (12)$$

где $v = 6k \pm 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$. В случае нечетного k , т.е. $v = 5, 7, 17, 19, \dots$:

$$K_{dv} = 0. \quad (13)$$

Если же k является чётным, т.е. $v = 11, 13, 23, 25, \dots$, то

$$K_{dv} = \frac{2 \sin \frac{vq\alpha}{4}}{q \sin \frac{v\alpha}{2}}. \quad (14)$$

Для обычных обмоток с полюсным делением 60°

$$k'_{d1} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}}$$

$$k'_{dv} = \frac{\sin \frac{q\alpha}{2}}{q \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (15)$$

таким образом, что

$$\frac{K_{d1}}{K'_{d1}} = \frac{1}{\cos \frac{q\alpha}{4}} = \frac{1}{\cos 15^\circ} = 1,035$$

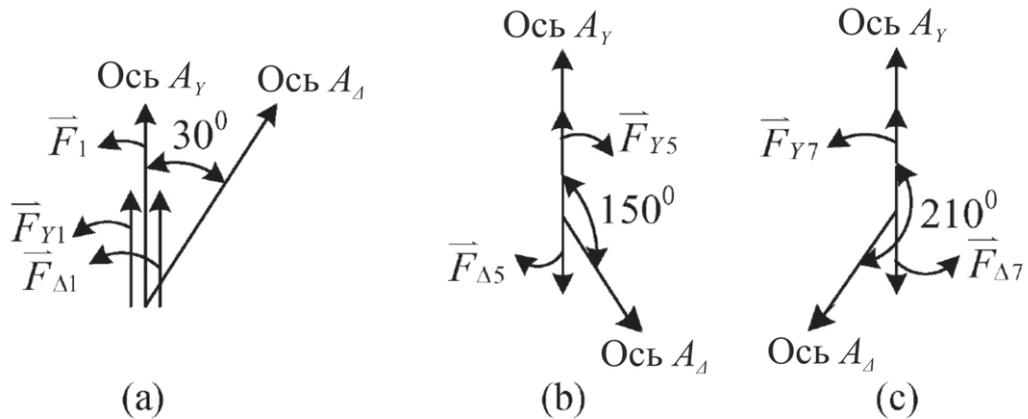
$$\frac{K_{d1}}{K'_{d1}} = \frac{1}{\cos \frac{vq\alpha}{4}} = \pm \frac{1}{\cos 15^\circ} = \pm 1,035 \quad (16)$$

где $v = 6k \pm 1, k = 2, 4, 6, \dots$

Следовательно, исключаются гармоники № 5, 7, 17, 19 и т.д. Гармоники имеют ту же амплитуду, что и обычная обмотка (показано в (16)). Так получается из-за того, что соответствующие коэффициенты распределения увеличиваются настолько же, насколько увеличивается коэффициент общего распределения. Эти гармоники можно убрать путём назначения соответствующего коэффициента укорочения шага.

Также можно достичь тех же результатов используя векторную диаграмму МДС, показанную на Рис. 3. Предположим, что A_Y и A_Δ — оси МДС звезды и треугольника. У МДС первой, пятой и седьмой гармоник ось A_Δ отстает от оси A_Y на 30, 150 и 210 эл. градусов соответственно. Далее, ток в обмотке, соединенной в треугольник, опережает на 30 эл. градусов ток обмотки, соединенной в звезду. Когда ток в звезде достигает своего максимального значения и его МДС находится на оси A_Y , МДС соответствующего треугольника на 30 эл. градусов опережает ток оси A_Δ (т.е. на оси A_Y), следовательно, на Рис. 3 (а) можно увидеть, что МДС токов звезды и треугольника находятся в одной фазе. Обратите внимание, что порядок чередования фаз пятой гармоник изменен.

Ри
с. 3.
Вектор
МДС
синусоид
альной
обмотки.
(а)
Основной.



(b) Пятая гармоника. (c) Седьмая гармоника.

ТАБЛИЦА I

Сравнение коэффициента распределения между гибридной и стандартной обмотками для $a_\Delta = a_Y$ и $N_\Delta/N_Y = \sqrt{3}$

q	Тип обмотки	K_{d1}	K_{d5}	K_{d7}	K_{d11}	K_{d13}	K_{d17}	K_{d19}
---	-------------	----------	----------	----------	-----------	-----------	-----------	-----------

3	Y – Δ	0,9899	0,0952	0,1053	0,1053	0,0952	0,9899	0,9899
	Стандартная	0,9598	0,2167	0,1774	0,1774	0,2176	0,9598	0,9598
5	Y – Δ	0,9891	0,0536	0,0554	0,0950	0,0823	0,0823	0,0950
	Стандартная	0,9567	0,2000	0,1494	0,1095	0,1022	0,1022	0,1095
7	Y – Δ	0,9888	0,0376	0,0383	0,0925	0,0791	0,0460	0,0488
	Стандартная	0,9558	0,1955	0,0143	0,0974	0,0865	0,0748	0,0722

Можно прийти к заключению, что для других гармоник $v = 6k \pm 1$, в случае нечетного k объединенная МДС статора похожа на случаи, приведенные на рис. 3(b) и (c); в случае чётного k искажения МДС исчезают, а объединенная МДС похожа на случай рис. 3(a), где результирующая МДС увеличена.

Если q нечетное, то q_Y и q_Δ делаются как можно более равными, то есть,

$$\begin{aligned} q_\Delta &= (q+1)/2 \\ q_\Delta &= (q-1)/2 \end{aligned} \quad (17)$$

Пусть $a_\Delta = a_Y$ и $N_\Delta/N_Y = \sqrt{3}$. Коэффициенты распределения можно рассчитать, используя формулу (9), полученные данные приведены в Таблице I. Удалось сократить некоторые гармонические искажения, однако не избавиться от них полностью, а также увеличить основной коэффициент распределения. Обратите внимание, что не важно, какая из величин q_Y или q_Δ является большей, рассчитанные коэффициенты распределения имеют одинаковые абсолютные значения. Их также можно получить из векторной диаграммы МДС на рис. 3, однако МДС не равны друг другу т.к. значение q является нечетным и не может быть разделено на равные доли.

Теперь пусть $a_\Delta = a_Y$, тогда N_Δ и N_Y будут переменными, чтобы устранить специфические гармонические искажения. Например, если $K_{d5} = 0$, из формулы (9) можно получить, что $N_\Delta/N_Y = 1.286$. Результаты вычислений приведены в Таблице II.

ТАБЛИЦА II

Разновидности коэффициентов распределения в зависимости от соотношения витков в гибридных обмотках для $a_\Delta = a_Y$

q	N_Δ/N_Y	K_{d1}	K_{d5}	K_{d7}	K_{d11}	K_{d13}	K_{d17}	K_{d19}
3	1,286 ($K_{d5} = 0$)	0,9908	0	0,1831	0,1831	0	0,9908	0,9908
	0,684 ($K_{d7} = 0$)	0,9887	0,2241	0	0	0,2241	0,9887	0,9887

5	1,155 ($K_{d5} = 0$)	0,9894	0	0,0955	0,1132	0,0653	0,0653	0,1132
	0,813 ($K_{d7} = 0$)	0,9886	0,1277	0	0,0699	0,1056	0,1056	0,0699
7	1,107 ($K_{d5} = 0$)	0,9890	0	0,0658	0,1008	0,0717	0,0344	0,0599
	0,866 ($K_{d7} = 0$)	0,9886	0,0900	0	0,0808	0,0894	0,0620	0,0335

Как правило, в катушках высоковольтных двигателей меньшее число витков, поэтому сложнее сделать так, чтобы N_{Δ}/N_Y равнялось $\sqrt{3}$. Тем не менее, количество параллельных ветвей a_{Δ} и a_Y может изменяться чтобы компенсировать N_{Δ}/N_Y . Обратите внимание, что коэффициент укорочения шага обмотки k_{pv} также подходит для устранения гармонических искажений и может быть использован в совокупности с другими способами сокращения гармоник. В качестве примера можно привести следующее: в каждом полюсе для $q = 3$ устанавливается укороченный шаг, равный $8/9$, а для $q = 5$ – равный $13/15$. Кроме того, F_{mv}/F_{m1} может быть определена как гармоническая составляющая, в которой F_{mv} является МДС v гармоники, а F_{m1} – основная МДС. На рис. 4 изображено сравнение гармонической составляющей для гибридной обмотки (с определенными N_{Δ}/N_Y и различным количеством параллельных ветвей) с обычной трехфазной обмоткой с фазным сдвигом 60° . В Таблице III приведены общие гармонические составляющие (ОГС) при $v = 5, 7, 11, 13, 17$, где ОГС определяется с помощью

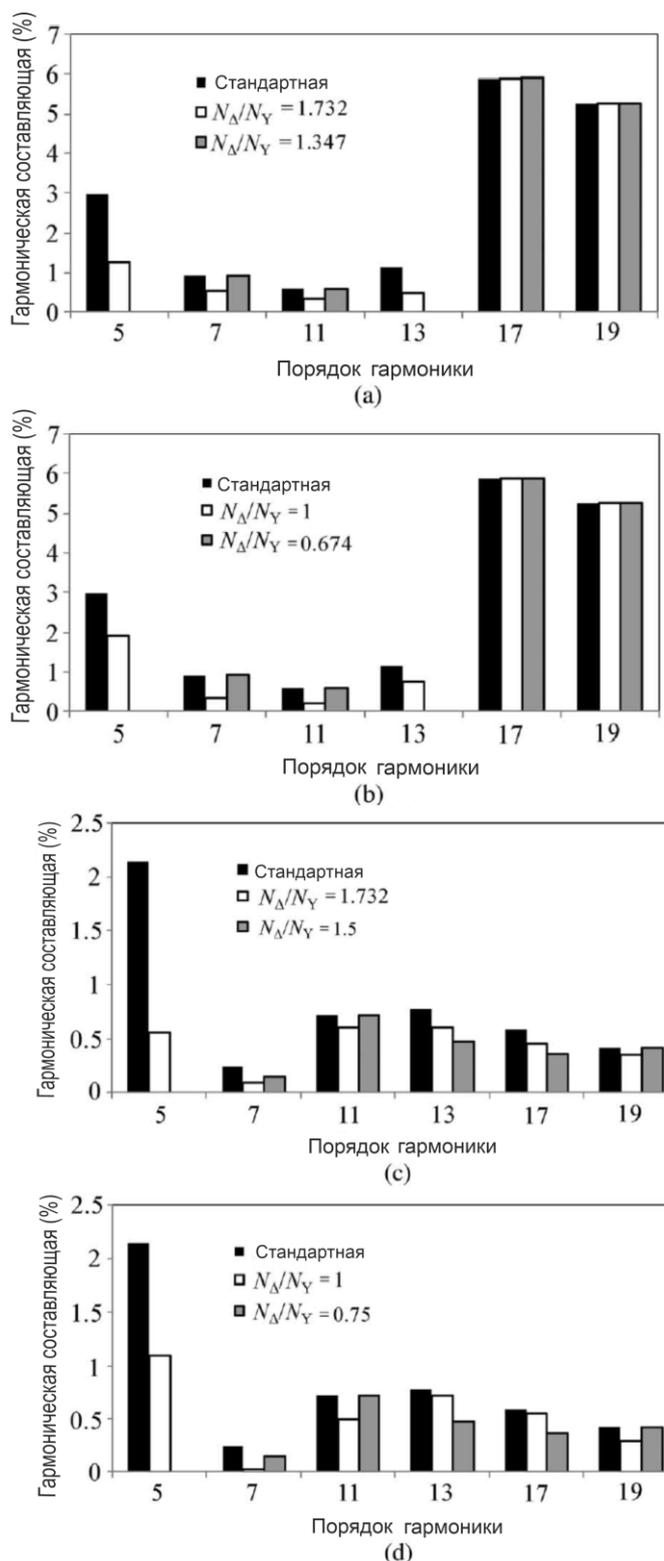
$$\text{ОГС} = \sqrt{\sum \left(\frac{F_{mv}}{F_{m1}}\right)^2}. \quad (18)$$

На рис. 4 показано, что устранить специфические гармонические искажения возможно путем правильного подбора a_{Δ} и a_Y , а также N_{Δ}/N_Y . Например, при $q = 3$, пусть $K_{d5} = 0$, и из формулы (9) можно получить, что $N_{\Delta}/N_Y = 1,347$ для $a_Y/a_{\Delta} = 1$ и $N_{\Delta}/N_Y = 0,674$ для $a_Y/a_{\Delta} = 2$. Того же результата можно достичь при устранении седьмой гармоники. В Таблице III показано, что устранение определенных гармоник результативно и что сумма искажений не относится к количествам параллельных ветвей a_Y и a_{Δ} .

III. Анализ рабочих характеристик двигателя

Так как при использовании гибридной обмотки типа звезда-треугольник наблюдается небольшое увеличение основного коэффициента распределения, появляется возможность сократить количество витков и, следовательно, увеличить площадь сечения проводника. Таким образом

можно сэкономить медь, а также понизить сопротивление статора, что в свою очередь приведет к



сокращению потерь в проводниках. Также могут уменьшиться потери на рассеивание из-за затухания некоторых МДС гармоник. На рис. 5 показан коэффициент проницаемости гармоник утечки Λ_L обмоток

Рис. 4 Сравнение гармоник стандартной и гибридной обмоток для шага фазовой полосы q и параллельных путей a . (a) $q = 3$, $a_{\Upsilon}/a_{\Delta} = 1$. (b) $q = 3$, $a_{\Upsilon}/a_{\Delta} = 2$. (c) $q = 5$, $a_{\Upsilon}/a_{\Delta} = 1$. (d) $q = 5$, $a_{\Upsilon}/a_{\Delta} = 2$.

статора как для стандартного соединения обмоток, так и для гибридной обмотки. Определение коэффициента проницаемости давно в работе [26]

$$\Lambda_L = \sum \left(\frac{k_{dv} k_{pv}}{v} \right)^2 \quad (19)$$

где k_{dv} – коэффициент распределения, k_{pv} – коэффициент укорочения шага обмотки, а v – порядок гармоник.

Когда реактивность рассеяния уменьшается, пиковый и пусковой моменты и пусковой ток возрастают. Это может оказаться преимуществом для прямого пуска. Тем не менее на оборотах полной нагрузки увеличение момента будет менее заметным (хоть и будет присутствовать) т.к. компоненты утечки станут оказывать меньшее влияние в схеме замещения т.к. скольжение снижается до скольжения при полной нагрузке. В процессе проектирования будут изменены несколько переменных и параметров.

ТАБЛИЦА III

ОГС: q обозначает количество пазов, приходящихся на фазную зону (пазов на полюс на фазу для петлевой обмотки)

q	Тип обмотки	a_v/a_Δ	N_Δ/N_Y	Общая гармоническая составляющая (%)
3	Стандартная	-----		8,575
	Y - Δ	1	$\sqrt{3}$	8,032
			1,347	7,968
		2	1	8,169
			0,674	7,968
5	Стандартная	-----		2,497
	Y - Δ	1	$\sqrt{3}$	1,165
			1,5	1,027
		2	1	1,525
			0,75	1,027

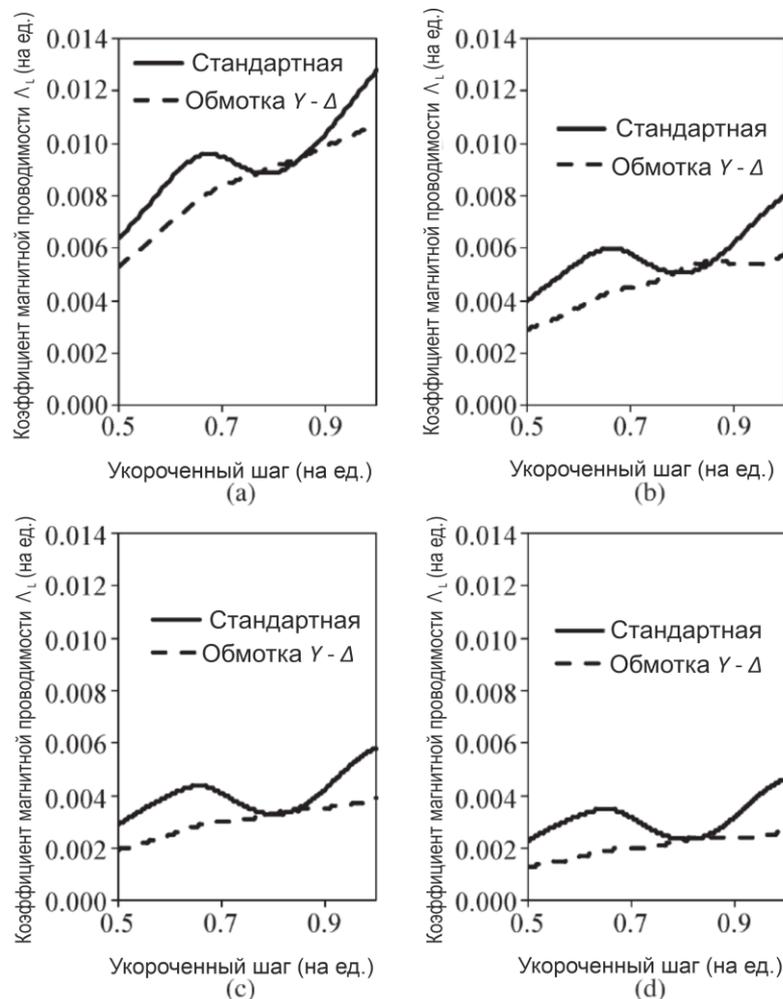


Рис. 5 Сравнение проницаемости гармоник двух типов обмотки. (а) $q = 3$. (б) $q = 4$. (с) $q = 5$. (д) $q = 6$.

Одной из вечных проблем в асинхронном двигателе являются магнитные помехи, которые, как правило, вызваны гармониками поля [27]. Поскольку плотность волн силы вибрации является функцией квадрата гармоник потока [28], а звук является логарифмическим по своей природе, результирующий излучаемый звук и уровень звукового давления могут быть уменьшены, если пространственный спектр волн потока воздушного зазора отрегулирован и уменьшен даже на небольшую величину [29].

ТАБЛИЦА IV

Количество витков в катушке и сечение проводника

Тип обмотки	Витки в катушке	Сечение проводника
Стандартная	N_s	A_c
Гибридная Y - Δ	$N_Y = N_s \quad N_{\Delta} = \sqrt{3}N_s$	$A_Y = A_c \quad A_{\Delta} = \sqrt{3}A_c$

IV. Способ проектирования обмоток.

Плотности электрического тока проводников обмоток звезды и треугольника должны быть примерно равными друг другу. Предположим, что у обычной трёхфазной обмотки, соединённой в

звезду, есть действующий ток равный I_0 , плотность электрического потока проводника J и сечение проводника A_C . Тогда плотность электрического потока

$$J_{Y(\text{станд.})} = \frac{I_0}{aA_C} = \frac{I_0}{anS_C} \quad (20)$$

где n – количество проводников, соединённых в параллель, для образования витка катушки и S_C – площадь сечения одного проводника. При переходе на гибридную обмотку, плотности потока проводников звезды и треугольника равняются

$$J_Y = \frac{I_0}{a_Y A_Y} = \frac{\bar{I}_0}{a_Y n_Y S_Y}$$

$$J_\Delta = \frac{I_0}{\sqrt{3} a_\Delta A_\Delta} = \frac{I_0}{\sqrt{3} a_\Delta n_\Delta S_\Delta} \quad (21)$$

где n_Y это количество параллельных проводников, образующих один виток катушки в звезде, и n_Δ – количество параллельных проводников, образующих один виток катушки в треугольнике. S_Y и S_Δ обозначают сечения проводников в звезде и треугольнике соответственно, в то время как A_Y и A_Δ это общая площадь сечения эффективных последовательных витков в звезде и треугольнике соответственно.

Для мало- и среднегабаритных двигателей количество витков и размер проводников не так регулируются, как для высоковольтных машин, вследствие особенностей намотки внавал. Мы уже обсуждали этот вопрос ранее. При замене стандартных трёхфазных обмоток внавал на гибридные в мало- и среднегабаритных двигателях, пусть $a_\Delta = a_Y = a$, где a это количество параллельных ветвей для стандартной трёхфазной обмотки. Размер проводника, сечение проводника и количество проводников, соединенных в параллель, можно выбирать напрямую из формул (21) и Таблицы IV.

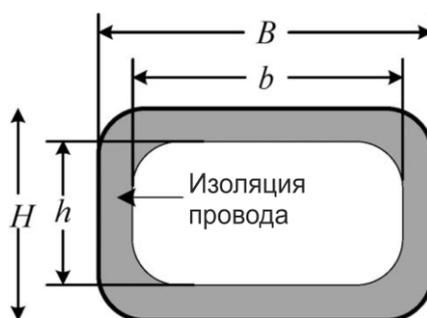


Рис. 6 Плоский проводник

В высоковольтных двигателях используется жесткая обмотка, поэтому заменить её совмещенной обмоткой не так-то просто из-за особенностей производства и возможного выбора количества проводников (из-за маленького количества витков в обмотке и квадратного сечения проводника, как показано на рис. 6). Толщина проводника (или диаметр) и количество витков

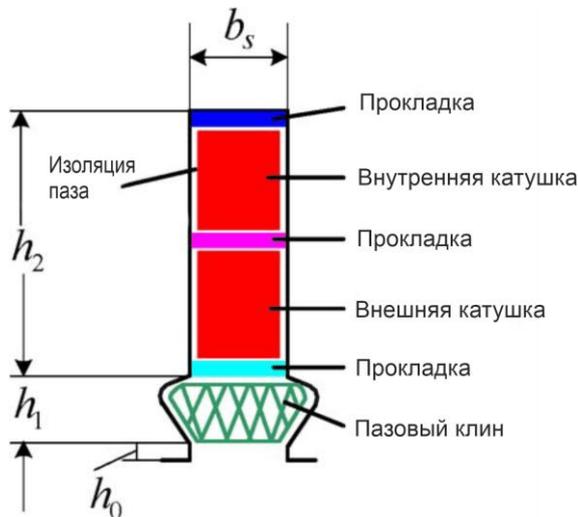


Рис. 7 Заполнение открытого паза статора в высоковольтной машине

ограничиваются высотой паза. Ширина и количество проводников, соединенных параллельно ограничиваются шириной паза. Как правило размер проводника и количество витков в звезде и треугольнике отличаются друг от друга, что увеличивает сложность проектирования подходящей по параметрам обмотки. Кроме требований, перечисленных в формулах (21) и в Таблице IV, также нужно обратить внимание на следующие ограничения:

$$\begin{aligned} \max(2N_Y h_Y, N_Y h_Y + N_\Delta h_\Delta, 2N_\Delta h_\Delta) + h_{\text{Изол}} &= h_2 \\ n_Y b_Y &= n_\Delta b_\Delta & n_Y b_Y + b_{\text{Изол}} &= b_s \end{aligned} \quad (21)$$

где h_Y и h_Δ это высота обмоток, соединённых в звезду и в треугольник соответственно, а b_Y и b_Δ это ширина проводников. Эти параметры показаны на рис.6. Кроме того, h_2 и b_s обозначают высоту и ширину паза, а $h_{\text{Изол}}$ и $b_{\text{Изол}}$ используются для обозначения толщины изоляции в продольном и поперечном направлениях, как показано на рис.7. Не должно быть большой разницы между высотой и шириной проводника. При помощи характеристик, перечисленных в разделе II, а также формул (21) и (22) можно определить N_Y и N_Δ . Вероятность поломок, связанных с изоляцией, сравнительно выше для высоковольтных машин, по сравнению с вероятностью других повреждений [30], следует обращать особое внимание при выборе количества параллельных ветвей во избежание возникновения компенсационных токов. Другое ограничение заключается в том, что количество параллельных ветвей в звезде и треугольнике должно быть не больше, чем количество пар полюсов p .

Существуют следующие ограничения размеров проводников:

$$1,4 < b_Y/h_Y < 5 \quad 1,4 < b_\Delta/h_\Delta < 5 \quad (23)$$

$$p/a_Y \in \text{Целочисленная переменная} \quad p/a_\Delta \in \text{Целочисленная переменная.} \quad (24)$$

Проще говоря, параметры гибридных обмоток взаимно ограничены, а на обмоточные данные также оказывает влияние размер паза. Следовательно, нужно хорошо обдумывать схему обмотки, чтобы вписать её во все существующие ограничения. Если невозможно применить на практике размер проводника, полученный при вычислениях, то при расчёте рабочего варианта следует пересчитать размер проводника или количество витков. В некоторых случаях для использования подходящей гибридной обмотки даже размер паза требует перерасчёта. За этим могут последовать другие изменения в конструкции, такие как изменение геометрии пластин статора, длины сердечника и т.д. Однако это требует дальнейшей оценки электромагнитной системы и оказывает влияние на производство, вплоть до необходимости новых оснасток штампов пакета статора.

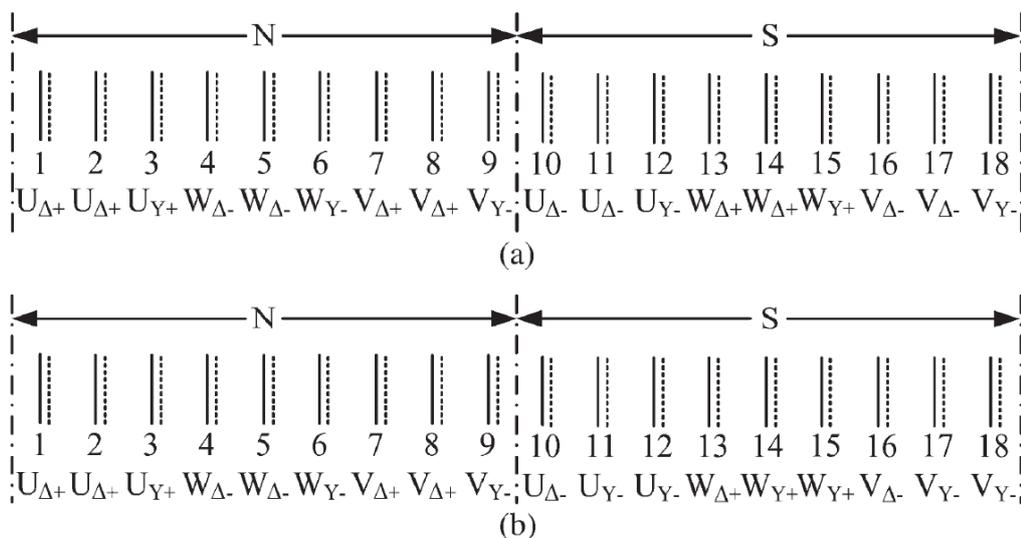
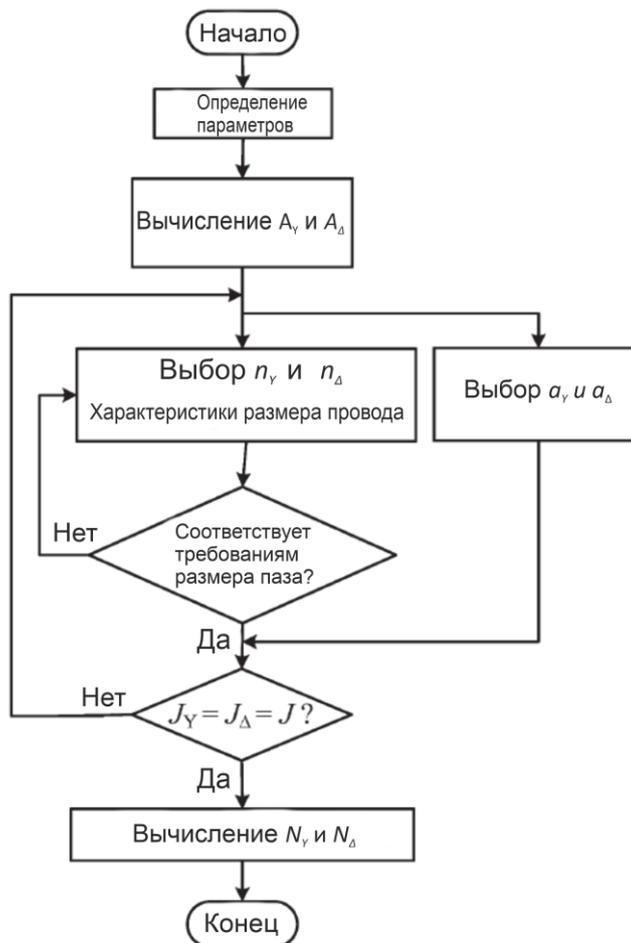


Рис. 8 Схема укладки гибридной обмотки. (a) Несимметричная обмотка. (b) Симметричная обмотка.

Расположение пазов для гибридной обмотки зависит от значения q , от того, является оно чётным или нет. В случае чётной q , схема напрямую соотносится с шагом полюса и равномерно



распределена между обмотками звезды и треугольника. В случае нечетной q , существует два возможных способа укладки обмотки. Первый называется несимметричной обмоткой. Данный способ характеризуется тем, что q_{Δ} занимает на один паз больше, чем q_{γ} для каждого последовательного полюса. Также при данном способе звезда и треугольник не могут иметь одинаковое количество катушек. Второй способ укладки обмотки называется симметричной обмоткой. Он характеризуется тем, что q_{Δ} занимает на один паз больше, чем q_{γ} для одного полюса, однако для следующего полюса q_{γ} занимает на один паз больше, чем q_{Δ} . Таким образом, расположение продолжает чередоваться в следующих пазах таким образом, что количество катушек звезды и треугольника оказываются равны. На рис. 8 показаны два варианта расположения обмоток. И всё же предпочтительным расположением является незаменимое расположение, т.к. второй вариант более сложный в исполнении. На рис. 9 показана схема разработки гибридной обмотки.

Рис. 9 Схема разработки гибридной обмотки.

V. Разработка опытной модели и результаты испытаний.

Был разработан и изготовлен асинхронный двигатель со следующими характеристиками: 1250 кВт, 6 кВ, 50 Гц, 4 полюса. В данном двигателе была использована гибридная обмотка типа

звезда – треугольник. Донором послужил стандартный трёхфазный двигатель, поэтому измерение рабочих характеристик было проведено с использованием двух типов обмоток, что позволило напрямую сравнить их характеристики. Основные результаты, полученные после испытаний стандартной и гибридной обмоток, приведены в Таблице V. Статор двигателя имеет 60 пазов.

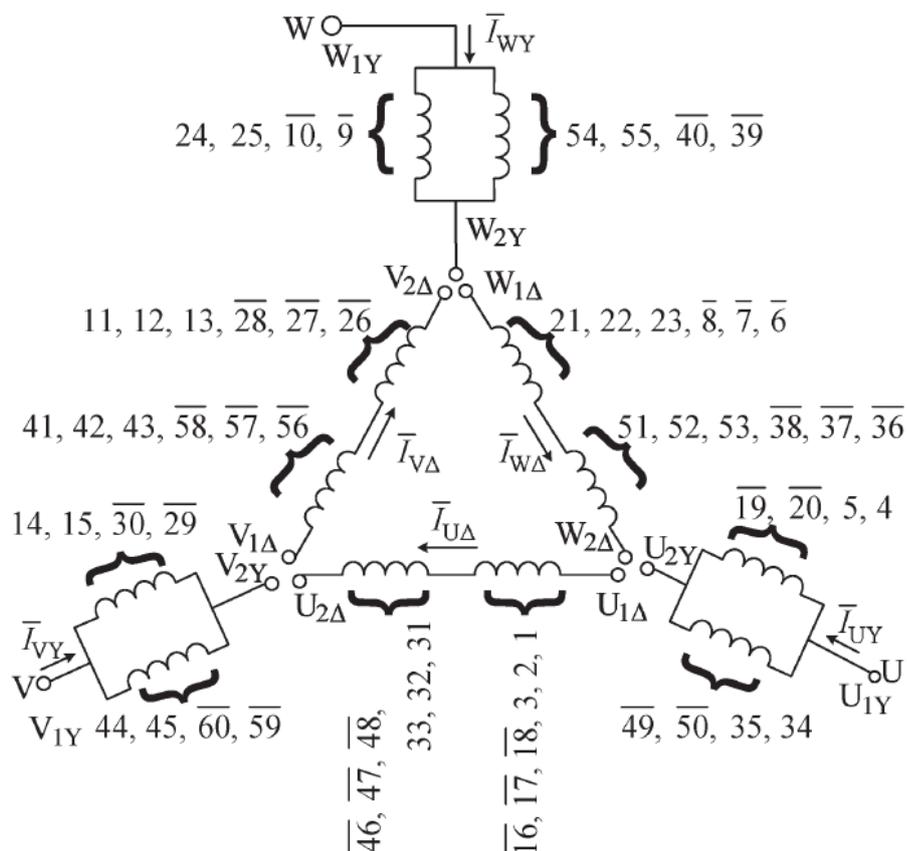
ТАБЛИЦА V

Главные параметры двух типов обмоток

Параметры	Стандартная обмотка	Гибридная обмотка
Количество пазов: $2p$	4	4
Количество пазов статора: Q_1	60	60
Количество пазов на полюс фазы: q	$q = 5$	$q_Y = 2$
Размер проводника $h*b$ (мм ²)	1,4 * 5,6	Y - 1,5*5,6
		$\Delta - 1,7*5,6$
Количество параллельных проводников в катушке: n	2	Y – 2
		$\Delta - 2$
Количество параллельных ветвей: a	2	Y – 2
		$\Delta - 1$
Витки в катушках: N	13	Y – 13
		$\Delta - 10$
Укороченный шаг: τ/mq	12/15	13/15

На полюс на фазу приходится пять пазов, которые в свою очередь поделены на две части: звезду и треугольник. Согласно Таблице I мы должны достичь значения общего количества витков на фазу равного $N_{\Delta}/N_Y = \sqrt{3}$, в случае отсутствия параллельных ветвей; и $N_{\Delta}/N_Y = \sqrt{3}/2$ в случае двух параллельных ветвей в звезде. Предполагается, что они имеют равные коэффициенты распределения и учитывается тот факт, что ток катушки в обмотке звезды уменьшается вдвое. Тогда соотношение токов катушек звезды и треугольника равняется $2/\sqrt{3} = 1,15$, следовательно сечение проводника должно находиться в рамках этого соотношения, чтобы обеспечить постоянную плотность тока в проводнике. Потери в проводниках таким образом распределятся более равномерно т.к. тепловые ограничения для двух обмоток должны быть одинаковыми. В противном случае такая обмотка была бы худшим вариантом. В высоковольтной машине ограничения, диктуемые (22), означают, что большая часть пространства паза занята изоляцией проводника, толщина которой постоянна; это означает, что число витков катушки не может быть значительно изменено. Характеристики двигателя, приведенные в Таблице V указывают на то, что сечения

проводника звезды и треугольника не выходят за рамки коэффициента $17/15 = 1,13$, который близок



к требуемому значению 1,15, когда две параллельные ветви используются в обмотке звезды ($a_Y = 2$). Более того, N_Δ должно равняться $\sqrt{3}/2 * 13 = 11$, но так как основной коэффициент распределения у треугольника выше, чем у звезды из-за того, что q_Δ имеет на один паз больше q_Y , N_Δ может равняться десяти для уменьшения сопротивления статора. Обратите внимание: чтобы уменьшить сопротивление статора без значительного снижения веса меди, нужно также увеличить размер проводника. На рис. 10 изображена схема обмотки, использованной в опытной модели двигателя. Если у номера паза рядом стоит штрих, это значит, что направление тока стороны катушки в этом пазе имеет обратную полярность. На рис. 11 показана гибридная обмотка и опытная модель асинхронного двигателя. Основное отличие гибридной обмотки от стандартной трёхфазной заключается в соединении выводов катушек. Все остальные параметры, такие как геометрия паза, геометрия самой машины, система изоляции остаются неизменными.

Рис. 10 Схема обмотки гибридной обмотки опытного образца.

Так как гибридная обмотка может уменьшить пятую и седьмую гармоники, укорачивание шага можно использовать для уменьшения 13-й и 11-й гармоник, что также увеличит основную МДС. Основные значения рабочих характеристик опытного образца перечислены в Таблице VI. Испытания



Рис. 11 Изготовленные опытные образцы. (а) Гибридная обмотка. (б) Опытный образец в сборе.

проводились в соответствии с требованиями IEEE 112-B [31]. В результате, общее количество потерь сократилось на 7,5%, а номинальный КПД вырос на 0,4%. Можно рассматривать потери на рассеивание как часть потерь в магнитопроводе, и, поэтому, они будут считаться вместе [32]. Очевидно, что потери в проводниках и потери на рассеивание (как часть общего количества потерь) значительно сократились. Эти результаты согласуются с результатами предыдущих исследований.

VI. Заключение

Испытания показали, что КПД опытного образца вырос. Гибридные обмотки типа звезда-треугольник увеличивают основную МДС и сокращают некоторые гармоники, что приводит к сокращению потерь в проводниках и потерь на рассеивание. Из-за ограничений, связанных с размером паза, следует проводить особые расчёты для высоковольтных двигателей с гибридными обмотками.

ТАБЛИЦА VI

Основные рабочие характеристики по результатам испытаний

Характеристики (измеренные)	Стандартная обмотка	Гибридная обмотка
Номинальное напряжение сети, кВ	6,0	6,0
Частота, Гц	50	50
Номинальный ток, А	138,9	137,8
Номинальный момент нагрузки, Н·м	8019	8036
Номинальное скольжение, %	0,71	0,68
Номинальный КПД, %	94,95	95,34

Номинальный коэффициент мощности	0,8890	0,888
Уровень шума, дБ	101,9	99,7
Потери в проводниках статора, кВт	14,906	10,507
Потери в магнитопроводе, кВт	11,536	12,770
Добавочные потери	6,25	4,50
Кратность максимального момента	2,313	2,398
Кратность пускового тока	5,938	6,307
Кратность пускового момента	0,899	0,994
Плотность тока, А/мм ²	4,6594	$J_Y - 4,3410$
		$J_{\Delta} - 4,4806$
Вес проводников, кг	287,75	297,47

К преимуществам данного способа можно отнести увеличение КПД при низких дополнительных затратах. И всё же у данного типа обмоток есть несколько недостатков:

- 1) Гибридные обмотки сложны в изготовлении.
- 2) У внутренней обмотки, соединенной в треугольник нет нулевой точки, из-за чего может возникнуть необходимость в дополнительных способах защиты.
- 3) Высокий пусковой ток.
- 4) Пункт, который требует особого внимания: направление вращения не может быть изменено путём переключения двух питающих фаз трёхфазной сети, что делает машину с гибридными обмотками однонаправленной.

Следует обращать внимание на эти положения в технических условиях, конструкции и производственном процессе. Основными характеристиками гибридной обмотки для больших высоковольтных асинхронных двигателей являются:

- 1) Возможное значительное сокращение пространственных гармоник в обмотках, что приводит к низким потерям на рассеивание, низкому уровню шума, и улучшенному моменту двигателя.
- 2) Несмотря на то, что существует большое количество ограничений в конструкции обмотки, а также что такая обмотка сложнее в производстве, сам процесс проектирования может быть довольно гибким, кроме того, можно добиться сокращения определенных гармоник или же убрать их полностью при условии, что выбранная обмотка подходит.
- 3) Следует учитывать дополнительные требования к защите и пуску, и, возможно, потребуется решить проблему увеличения пускового тока.
- 4) Самым большим преимуществом рассматриваемого способа намотки является его дешевизна, что очень актуально в современной экономической ситуации.