

УДК 621.671-192

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2016

ПОГРУЖНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылев, И.Н. Шапова

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29)

В.А. Шапов

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29),
 Институт механики сплошных сред Уральского отделения Российской академии наук (614013, Россия, г. Пермь, ул. Акад. Королёва, 1)

SUBMERSIBLE ASYNCHRONOUS ELECTRIC MOTORS WITH IMPROVED PERFORMANCE CHARACTERISTICS

E.F. Beliaev, P.N. Tsylev, I.N. Shchapova

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii av., Perm, 614990, Russian Federation)

V.A. Shchapov

Perm National Research Polytechnic University (29 Komsomolskii av., Perm, 614990, Russian Federation),
 Institute of Continuous Media Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
 (1 Academic Korolev st., Perm, 614013, Russian Federation)

Получена / Received: 01.12.2015. Принята / Accepted: 16.02.2016. Опубликовано / Published: 30.03.2016

Ключевые слова:

погружной асинхронный двигатель, электроцентробежный насос, трехфазная обмотка статора, магнитное поле, высшие пространственные гармоники, эксплуатационные характеристики.

Магнитное поле в зазоре погружных асинхронных двигателей привода электроцентробежных насосов из-за малого количества пазов статора имеет ярко выраженный ступенчатый характер распределения. Такое магнитное поле содержит широкий спектр высших пространственных гармоник со значительными по величине амплитудами, оказывающими негативное влияние на рабочие и эксплуатационные характеристики погружных электродвигателей.

Разработана схема трехфазной двухслойной обмотки статора, токи в обмотках фаз которой возбуждают в зазоре двигателя магнитное поле, его распределение по длине внутренней окружности статора близко к синусоидальной форме. Обмотка статора содержит три однофазные обмотки, образованные равным числом катушек. Катушки соединены между собой по одинаковому схематическому пространственному сдвигу осей обмоток на 120° . Каждая из однофазных обмоток на протяжении двойного полюсного деления статора образована $Z/p \cdot m$ катушками, в состав которых входит $Z/2 \cdot p \cdot m$ групп с одинаковым числом катушек в группах. Каждая группа характеризуется различной шириной входящих в нее катушек и различным числом образующих катушки витков по сравнению с другими группами катушек. При этом катушки одной из групп выполнены минимальной ширины, с минимальным числом витков. Ширина и число витков катушек каждой последующей группы отличается от ширины и числа витков катушек предыдущей группы. Катушки с большей шириной и большим количеством витков размещены концентрически по отношению к катушкам с минимальной шириной и минимальным числом витков. Части объема пазов, остающиеся свободными после укладки катушек данной однофазной обмотки, используются для размещения катушек двух других однофазных обмоток, выполненных аналогично.

Асинхронные двигатели с обмоткой статора описанной конструкции обеспечивают увеличение электромагнитного момента, снижение потерь и температуры нагрева, повышение КПД, экономии меди, уменьшение вибраций и шумов.

Результаты работы рекомендуются к использованию предприятиями электромашиностроения, осуществляющими серийное производство электрических машин переменного тока.

Key words:

submersible asynchronous motor, submersible electrical pump, three-phase stator winding, magnetic field, highest spatial harmonics, performance characteristics.

Magnetic field in the clearance of submersible asynchronous electric motors of electrical submersible pumps due to little number of stator slots has strongly marked stepped character of distribution. Such magnetic field includes wide range of highest spatial harmonics with significant amplitudes that negatively affect on work and operating parameters of submersible electric motors.

The scheme of the two-layer three-phase stator winding is developed. Current in the phase winding of scheme initiate magnetic field in the clearance of motor distribution of which along the inner circle of stator is close to sinusoidal form. The stator winding comprises three single-phase windings formed by an equal number of coils. The coils are connected to each other on the same system, providing a spatial shift of the axes of the windings 120° . Each of the single-phase windings for the double pole pitch of the stator is formed by $Z/p \cdot m$ coils that include $Z/2 \cdot p \cdot m$ groups with the same amount of coils. Each of the groups has different width of input coils and different amount of coils that make coil in comparison with other coil groups. Besides, coils of one of the groups have minimal width and minimal amount of coils. Width and amount of coils every next group is different from previous group. Coils with higher width and amount of coil are placed concentrically to the coils that have minimal width and amount of coils. The parts of slot volume remain free after laying of the single-phase coil windings are used to accommodate the coils of the other two-phase windings made similarly.

Asynchronous motors with mentioned stator winding provide increase of electromagnetic torque, decrease in loss and temperature, increase in efficiency, copper rational usage and decrease in vibration and noise.

Results of the research are recommended to use by companies of electrical engineering that do mass production of electric machines of alternating current.

Беляев Евгений Фролович – доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электромеханики (тел.: +077 (342) 219 84 21, e-mail: pcpn@pstu.ru).

Цылев Павел Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (моб. тел.: +007 908 273 89 04, e-mail: pcpn@pstu.ru).

Шапова Ирина Николаевна – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (тел.: +007 (342) 219 84 21, e-mail: irina.shchapova@gmail.com). Контактное лицо для переписки.

Шапов Владислав Алексеевич – доцент кафедры информационных технологий и автоматизированных систем, младший научный сотрудник (тел.: +007 (342) 237 83 95, e-mail: shchapov@icmm.ru).

Evgenii F. Beliaev (Author ID in Scopus: 7006634296) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Electrical and Mechanical Engineering (tel.: +077 (342) 219 84 21, e-mail: pcpn@pstu.ru).

Pavel N. Tsylev (Author ID in Scopus: 6504320743) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mining Electronics and Mechanics (mob. tel.: +007 908 273 89 04, e-mail: pcpn@pstu.ru).

Irina N. Shchapova (Author ID in Scopus: 55750286100) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mining Electronics and Mechanics (tel.: +007 (342) 219 84 21, e-mail: irina.shchapova@gmail.com). The contact person for correspondence.

Vladislav A. Shchapov (Author ID in Scopus: 8648611900) – Associate Professor at the Department of Information Technologies and Automated Systems, Junior Researcher (tel.: +007 (342) 237 83 95, e-mail: shchapov@icmm.ru).

Введение

Подъем нефти из скважин с большим и средним дебитом происходит посредством электроцентробежных насосов, осуществляющих свою работу с помощью погружных трехфазных асинхронных двигателей. Малые диаметры нефтяных скважин оказывают непосредственное влияние на размер наружного диаметра статора погружных асинхронных двигателей, ограничивая их следующими значениями: 103; 117; 123; 130 мм [1]. Диаметр внутренней расточки статора погружных асинхронных двигателей меньше наружного диаметра статора на удвоенную суммарную высоту паза и ярма магнитопровода:

$$d_{\text{вн}} = d_{\text{н}} - 2(h_{\text{п}} + h_{\text{я}}),$$

где $h_{\text{п}}$, $h_{\text{я}}$ – высота паза и ярма стального сердечника статора соответственно.

Вследствие малых размеров наружного диаметра диаметр внутренней расточки статоров также имеет весьма ограниченные размеры.

Синхронная частота вращения ротора погружных асинхронных двигателей электроцентробежных насосов составляет 3000 мин⁻¹ [2, 3]. При частоте напряжения в питающей сети 50 Гц токи фаз обмоток статора возбуждают в зазоре между статором и ротором магнитное поле, имеющее одну пару полюсов. Это непосредственно следует из известной формулы

$$p = \frac{60f}{n_0},$$

где p – число пар полюсов; f, n_0 – частота напряжения и частота вращения магнитного поля.

Форма кривой распределения магнитного поля по длине окружности зазора погружных асинхронных двигателей, от которой зависят гармонические составы самого поля и электродвижущих сил в обмотках фаз статора, а также рабочие и эксплуатационные характеристики погружных двигателей, во многом определяется формой кривой распределения магнитодвижущей силы трехфазной обмотки статора. В свою очередь, форма кривой распределения магнитодвижущей силы

по длине окружности расточки статора, создаваемой трехфазной обмоткой, непосредственно связана со схемой обмотки статора и количеством пазов на его внутренней поверхности.

В погружных асинхронных двигателях из-за малого диаметра внутренней расточки статора количество пазов на статоре z составляет, как правило, 18. При этом число пазов статора, приходящееся на один полюс и одну фазу,

$$q = \frac{z}{2pt} = 3,$$

где t – количество фаз обмотки статора, $t = 3$.

При серийном производстве асинхронных электрических двигателей катушки (секции), из которых образуются обмотки фаз статора, укладываются в пазы статора в один или два слоя [4, 5].

Трехфазная однослойная концентрическая обмотка

В трехфазных однослойных обмотках с концентрическими катушками сторона каждой катушки занимает объем всего паза, в котором она размещается, и поэтому число катушек в обмотке фазы на протяжении длины двойного полюсного деления статора равняется q . Схема трехфазной однослойной обмотки с концентрическими катушками для асинхронного двигателя, имеющего 18 пазов, приведена на рис. 1. На рис. 2 показаны ступенчатые кривые распределения магнитодвижущих сил обмоток фаз $A-X$, $B-Y$, $C-Z$ и результирующей магнитодвижущей силы трехфазной обмотки с концентрическими катушками по длине окружности расточки статора. Построение кривых магнитодвижущих сил осуществлялось по методике, изложенной в [6, 7], для момента времени, когда ток в обмотке фазы $A-X$ равнялся своему амплитудному значению, а токи в обмотках фаз $B-Y$, $C-Z$ – половине значения тока в обмотке фазы $A-X$. Направления токов в проводниках сторон катушек обмоток фаз для рассматриваемого момента времени на рис. 1 показаны стрелками.

В соответствии с рис. 2 значения магнитодвижущих сил обмоток фаз статора распределяются по окружности зазора двигателя по закону, существенно отличающемуся от синусоидального закона.

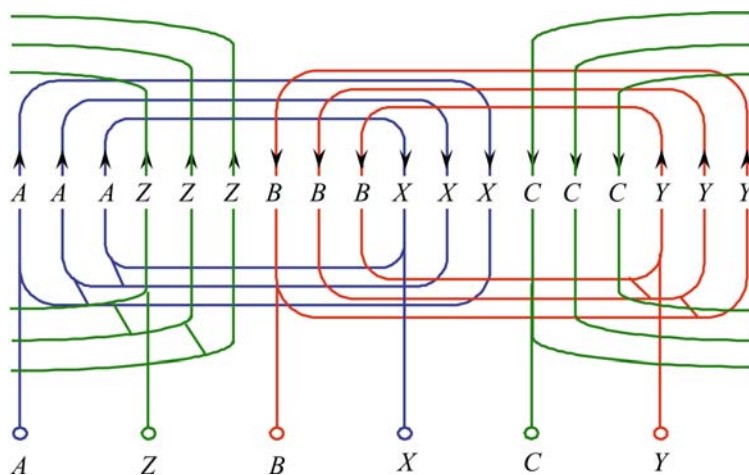


Рис. 1. Схема трехфазной концентрической обмотки статора асинхронного двигателя ($m = 3, 2p = 2, z = 18$)

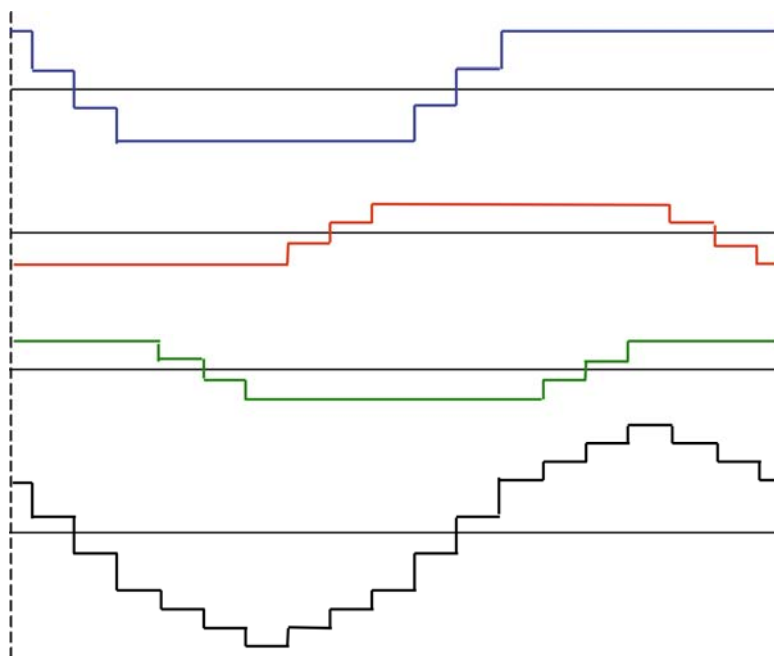


Рис. 2. Распределение магнитодвижущих сил обмоток фаз и трехфазной обмотки

Используя преобразования Фурье [8, 9], несинусоидальные кривые магнитодвижущих сил фаз обмотки статора можно представить суммой гармонических составляющих:

$$F_{\phi t} = \sum_{\nu=1,3,5\dots} F_{\phi\nu} \cos \omega t \cos \nu \alpha,$$

где $F_{\phi\nu}$ – амплитудное значение магнитодвижущей силы гармоники порядка ν ; ω – круговая частота переменного тока; t – время; α – пространственная координата;

$$F_{\phi\nu} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \frac{w \cdot k_{p\nu} \cdot k_{y\nu}}{\nu \cdot p} I,$$

w – число витков фазы обмотки; $k_{p\nu}, k_{y\nu}$ – коэффициенты распределения и укорочения обмотки статора для гармоники порядка ν ; I – действующее значение тока фазы,

$$k_{p\nu} = \frac{\sin \frac{\nu \cdot \pi \cdot p \cdot q}{z}}{q \cdot \sin \frac{\nu \cdot \pi \cdot p}{z}}, \quad k_{y\nu} = \sin \frac{\nu \cdot y \cdot \pi}{2\tau},$$

y, τ – ширина катушки и длина полюсного деления, $\omega = 2\pi f$.

Ступенчатая кривая распределения магнитодвижущей силы трехфазной обмотки по длине внутренней окружности статора (см. рис. 2) строится путем суммирования ординат кривых распределения магнитодвижущих сил отдельных фазных обмоток. Данная кривая при использовании преобразований Фурье математически представляется следующим выражением:

$$F_t = \sum_{v=6k\pm 1} F_v \cos(\omega t \mp v\alpha),$$

где F_v – амплитудное значение магнитодвижущей силы гармоники порядка v ,

$$F_v = \frac{m}{2} F_{\Phi v}.$$

Знак «+» под знаком суммы относится к гармоникам с порядковым номером 1, 7, 13, 19 и т.д., а знак «-» – к гармоникам 5, 11, 17 и т.д.

Расчет магнитного поля в зазоре между статором и ротором асинхронных электрических двигателей выполняется, как правило, с учетом ряда упрощающих допущений [10, 11]. Принимая эти допущения во внимание, магнитное поле в зазоре можно представить в виде ряда гармонических составляющих, каждая из которых создается соответствующей гармоникой магнитодвижущей силы. Амплитудное значение гармоники порядка v магнитного поля рассчитывается через амплитудное значение v -й гармоники магнитодвижущей силы по выражению

$$B_{mv} = \frac{\mu_0}{\delta} F_v,$$

где μ_0, δ – магнитная постоянная и высота зазора.

Трехфазные однослойные обмотки с концентрическими катушками по своим электромагнитным свойствам эквивалентны обмоткам с полным шагом, у которых ширина катушек равна длине полюсного деления: $y = \tau$. Для обмоток с полным шагом значения коэффициента укорочения k_{yv} для всех нечетных гармонических составляющих магнитодвижущей силы равны единице, и, следовательно, добиться подавления или хотя бы ос-

лабления высших пространственных гармоник магнитодвижущих сил обмоток фаз за счет укорочения шага обмотки не представляется возможным. Нельзя также подавить или ослабить высшие пространственные гармоники магнитного поля и электродвижущих сил.

Трехфазная однослойная шаблонная обмотка

Трехфазные однослойные шаблонные обмотки отличаются от концентрических обмоток только исполнением катушек, из которых образуются обмотки: все катушки выполняются одинаковой ширины и имеют одинаковую форму трапеции. Шаблонные обмотки в электромагнитном отношении, как и концентрические, эквивалентны обмоткам с полным шагом. Поэтому значения коэффициентов укорочения для всех нечетных гармоник магнитодвижущей силы, магнитного поля и электродвижущей силы равны единице. Следовательно, шаблонные обмотки, как и концентрические, также не позволяют подавить или ослабить высшие пространственные гармоники магнитодвижущей силы, магнитного поля и электродвижущей силы за счет укорочения шага обмоток.

Таким образом, ослабление негативного влияния высших пространственных гармоник магнитодвижущих сил, магнитного поля и электродвижущих сил на рабочие и эксплуатационные характеристики погружных асинхронных электрических двигателей с однослойными обмотками на статоре возможно только за счет уменьшения численных значений коэффициента распределения k_{pv} .

Трехфазная двухслойная обмотка статора

Улучшение рабочих и эксплуатационных характеристик погружных асинхронных электрических двигателей привода электроцентробежных насосов достигается при размещении в пазах статора трехфазных двухслойных обмоток с укороченным шагом [12]. Такие обмотки образуются катушками, имеющими одинаковую форму. Ширина катушек $b = \beta \cdot \tau$, где β – относительный шаг. Число катушек, образующих трех-

фазную обмотку, равняется количеству пазов на статоре. Активные стороны каждой катушки занимают половину объема пазов, в которых они размещаются, причем одна активная сторона размещается в верхнем слое, а другая – в нижнем.

На рис. 3 показано распределение в пазах статора активных сторон катушек трехфазной двухслойной обмотки с укороченным шагом асинхронного электрического двигателя, имеющего 18 пазов. На этом же рисунке приведены кривые распределения магнитодвижущих сил верхнего и нижнего слоев обмотки по длине окружности статора. Здесь же изображена ступенчатая кривая распределения результирующей магнитодвижущей силы обмотки статора, которая получается суммированием графиков магнитодвижущих сил отдельных слоев обмотки.

Кривые распределения магнитодвижущих сил по длине внутренней окружности статора относятся к моменту времени, когда ток в обмотке

фазы $A-X$ равняется амплитудному значению. Токи в обмотках фаз $B-Y$, $C-Z$ в данный момент составляют половину значения тока в обмотке фазы $A-X$. Направления токов в проводниках, расположенных в пазах статора, на рис. 3 условно изображаются точками и крестиками. Относительный шаг $\beta = 7/9$, а ширина катушек обмоток фаз статора $b = 7t_3$, где t_3 – величина зубцового деления, $t_3 = \pi d_{\text{вн}} / z$.

На основании сравнения графиков распределения результирующих магнитодвижущих сил по длине окружности расточки статора двигателей с однослойной обмоткой (см. рис. 2) и с двухслойной обмоткой с укороченным шагом (см. рис. 3) можно сделать вывод, что укорочение шага обмотки приближает распределение магнитодвижущей силы к синусоидальной форме. При этом посредством выбора величины относительного шага обмотки статора β становится возможным подавление той или иной нежелательной высшей

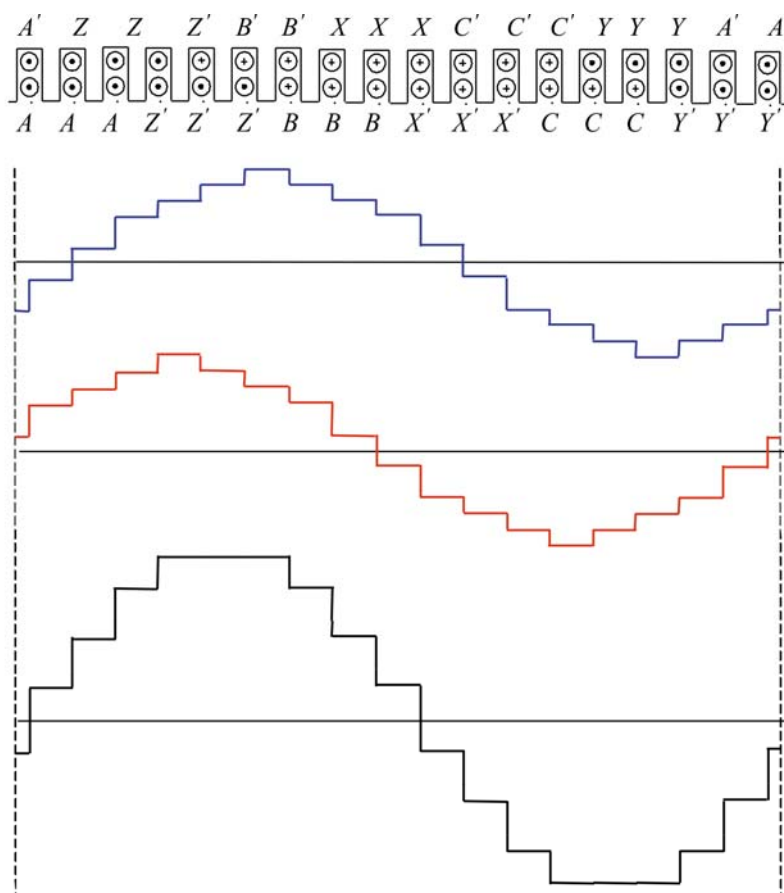


Рис. 3. Трехфазная двухслойная обмотка и кривые магнитодвижущих сил отдельных слоев и всей обмотки ($m = 3$, $2p = 2$, $z = 18$)

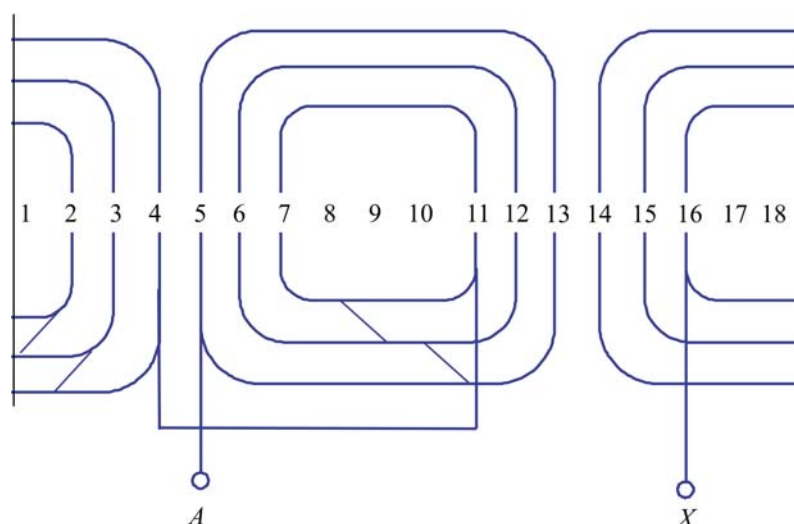


Рис. 4. Электрическая схема фазы $A-X$ обмотки «вразвалку» с градацией количества витков в катушках ($m = 3, 2p = 2, z = 18$)

гармоники магнитодвижущей силы, магнитного поля и электродвижущей силы. В условиях рассматриваемого примера получение кривой магнитодвижущей силы, форма которой близка к синусоидальной, достигается за счет подавления пятой пространственной гармоники.

Трехфазная двухслойная обмотка «вразвалку» с градацией количества витков в катушках

Распределение магнитодвижущей силы и магнитного поля в зазоре асинхронных двигателей, близкое к синусоидальному закону, достигается при размещении в пазах статора трехфазной обмотки, выполненной «вразвалку», с градацией количества витков катушек, образующих фазные зоны [13–15]. Анализ технических решений, изложенных в работах [13–15], показывает, что наиболее универсальной, применимой для широкого класса трехфазных электрических машин переменного тока, в том числе погружных асинхронных двигателей, является обмотка, защищенная патентом России, выданным Пермскому национальному исследовательскому политехническому университету [15].

Схема обмотки одной из фаз статора, для примера фазы $A-X$, двухполюсного погружного асинхронного двигателя, имеющего 18 пазов

на статоре, приведена на рис. 4. Обмотка содержит 6 катушек, из которых образованы 3 группы по 2 катушки в группе. Катушки одной из групп, назовем ее первой, выполняются минимальной ширины, которая составляет 4 зубцовых деления статора. Катушки второй группы имеют ширину в 6 зубцовых делений, что на 2 зубцовых деления статора больше ширины катушек первой группы. Катушки третьей группы имеют максимальную ширину, которая на 2 зубцовых деления статора больше ширины катушек второй группы, т.е. составляет 8 зубцовых делений. Катушки, образующие первую группу, выполняются с минимальным количеством витков, которое рассчитывается по выражению

$$W_1 = W_\Phi / 2 \sum_{i=1}^q i,$$

где W_Φ – количество витков обмотки фазы.

Количество витков в катушках второй группы находится по формуле

$$W_2 = W_1 + W_\Phi / 2 \sum_{i=1}^q i.$$

Катушки третьей группы образуются максимальным количеством витков:

$$W_3 = W_2 + W_\Phi / 2 \sum_{i=1}^q i.$$

Активные стороны катушек третьей группы, имеющие наибольшее количество витков, укладываются в пазы 5, 13 и 14, 4. Катушки, образующие вторую группу, размещаются в пазах 6, 12 и 15, 3, а катушки первой группы с наименьшим количеством витков – в пазах 7, 11 и 16, 2. По одной катушки различных групп на протяжении полюсного деления статора укладываются концентрично друг по отношению к другу. Так, катушки первой группы размещаются внутри катушек второй группы, которые сами располагаются внутри катушек третьей группы. Однако катушки одной и той же группы, размещаемые на соседних полюсных делениях, укладываются «вразвалку». Активные стороны всех катушек, образующих обмотку $A-X$, размещаются в пазах статора в один слой, занимая различные части объема пазов. Наименее заполненными являются пазы, в которые укладываются катушки первой группы, несколько большую часть объема пазов занимают катушки второй группы, а наиболее заполненными оказываются пазы с катушками, относящимися к третьей группе.

Обмотки фаз $B-Y$, $C-Z$ формируются по аналогичному принципу. Размещение катушек обмоток фаз $B-Y$, $C-Z$ в пазах статора необходимо осуществлять таким образом, чтобы пространственные углы между осями обмоток фаз $B-Y$, $C-Z$ и осью обмотки фазы $A-X$ были равны соответственно 120 и 240 град. Выполнение данного условия становится возможным, когда в каждом пазу статора располагаются активные стороны катушек, принадлежащих двум однофазным обмоткам. При практической реализации данного условия приходится сталкиваться с двумя комбинациями распределения активных сторон катушек в пазах статора: активная сторона катушки с наибольшим количеством витков, относящейся к одной фазе, и активная сторона катушки с минимальным количеством витков, принадлежащей второй фазе; активные стороны катушек двух различных фаз с одинаковым количеством витков. В обоих вариантах размещения активных сторон катушек фаз обеспечивается полное заполнение всего объе-

ма пазов при равенстве количества витков по пазам.

Электрическая схема соединения катушек обмотки фазы $A-X$ (см. рис. 4) обеспечивает одинаковое направление тока в проводниках активных сторон катушек, размещенных в пазах 2–7, а также одинаковое, но противоположное направление тока в проводниках активных сторон катушек, уложенных в пазах 11–16. Электрические схемы соединения катушек, образующих обмотки фаз $B-Y$, $C-Z$, повторяют схему соединения катушек обмотки фазы $A-X$.

Заключение

Расчеты гармонического состава магнитодвижущих сил и величин амплитуд отдельных пространственных гармоник для погружных асинхронных двигателей серии ПЭД и погружного асинхронного двигателя, на статоре которого уложена обмотка, описание которой приводится в [15], выполнялись с использованием методики [16, 17]. Результаты расчета и их анализ показывают, что погружной асинхронный двигатель с обмоткой статора [15] обеспечивает уменьшение амплитуды третьей гармоники в 2,13 раза, амплитуды пятой гармоники – в 8,38 раза, амплитуды седьмой гармоники – в 3,50. Такие результаты достигаются благодаря тому, что в двигателе с обмоткой статора [15] распределение магнитодвижущей силы по окружности статора ближе к синусоиде по сравнению с распределением магнитодвижущей силы в двигателе серии ПЭД. Это приближение формы кривой магнитодвижущей силы к синусоиде способствовало уменьшению значений обмоточных коэффициентов для высших пространственных гармоник.

Значительное ослабление высших пространственных гармоник магнитодвижущих сил и магнитного поля позволяет улучшить рабочие и эксплуатационные характеристики погружных асинхронных двигателей. В частности, увеличивается электромагнитный момент двигателей, особенно в зоне низких частот вращения ротора, уменьшаются потери и температура нагрева двигателей, снижаются шум и вибрации, сопровождающие

работу погружных двигателей электроцентробежных насосов.

К другим преимуществам обмотки статора [15] необходимо отнести сокращение при ее выполнении расхода меди и изоляционных материалов за счет уменьшения длины лобовых частей катушек. Снижение длины лобовых частей катушек приводит также к дополнительному уменьшению потерь и повышению КПД погружных двигателей. Схема

обмотки универсальна и реализуется в погружных асинхронных двигателях с четным и нечетным числом пазов на полюс и фазу.

Разработанная схема обмотки статора рекомендуется к использованию на предприятиях, осуществляющих серийное производство электрических машин трехфазного переменного тока, в том числе погружных асинхронных двигателей для нефтяной отрасли.

Список литературы

1. Нефтегазовое дело: в 6 т. / под ред. проф. А.М. Шаммазова. Т. 3. Добыча нефти и газа / Ю. В. Зейгман. – СПб.: Недра, 2011. – 285 с.
2. Каталог нефтяного оборудования, средств автоматизации, приборов и спецматериалов: в 2 т. / ВНИИОЭНГ. – М., 1994. – Т. 2. – 165 с.
3. Кисаримов Р.А. Справочник электрика. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Радиософт, 2010. – 512 с.
4. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч. 2. Машины переменного тока. – М.–Л.: Энергия, 1965. – 648 с.
5. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины и микромашины: учеб. для приборостроит. специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1971. – 430 с.
6. Геллер Б., Гамата В. Высшие гармоники в асинхронных машинах / пер. с англ. под ред. З.Г. Каганова. – М.: Энергия, 1981. – 352 с.
7. Кучера Я., Гапл И. Обмотки электрических вращательных машин. Прага: Изд-во Академии наук ЧССР, 1963. – 983 с.
8. Привалов И.И. Ряды Фурье. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Объединенное научно-техническое издательство, 1931. – 164 с.
9. Геллер Б., Гамата В. Дополнительные поля, моменты и потери мощности в асинхронных машинах / пер. с чеш. под ред. Ф.М. Юферова. – М.–Л.: Энергия, 1964. – 263 с.
10. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
11. Беляев Е.Ф., Шулаков Н.В. Дискретно-полевые модели электрических машин: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – Ч. I, II. – 457 с.
12. Обмотки электрических машин / В.И. Зимин, М.Я. Каплан, А.М. Палей, И.Н. Рабинович, В.П. Фёдоров, П.А. Хаккен. – 5-е изд., перераб. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 475 с.
13. Завгородний В.Д., Кедык Л.Н. Многофазная двухслойная концентрическая обмотка: пат. 1690103 Рос. Федерация № 4693769/07; заявл. 19.05.1989; опубл. 07.11.1991. – Бюл. № 41. – 9 с.
14. Данн Д.Б. мл., Форт У. Обмотка трехфазного двигателя: пат. 2,905,840 США. № 672,296; заявл. 16.07.1957; опубл. 22.09.1959. – 10 с.
15. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылёв П.Н. Обмотка статора трехфазных электрических машин переменного тока: пат.

References

1. Neftegazovoe delo [Oil and gas industry]: v 6 tomakh. Ed. A.M. Shammazova. Vol. 3. Zeigman Iu.V. Dobycha nefi i gaza [Oil and gas production]. Sankt-Peterburg: Nedra, 2011. 285 p.
2. Katalog nefianogo oborudovaniia, sredstv avtomatizatsii, priborov i spetsmaterialov [Catalog of oil equipment, automation equipment, apparatus and special materials]: v 2 tomah. Moscow: VNIIOENG, 1994, vol. 2, 165 p.
3. Kisarimov R.A. Spravochnik elektrika [Handbook of electrician]. 4 izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe. Moscow: Radiosoft, 2010. 512 p.
4. Kostenko M.P., Piotrovskii L.M. Elektricheskie mashiny. Chast' 2. Mashiny peremennogo toka [Electrical machinery. Part 2. AC Machines]. Moscow–Leningrad: Energiia, 1965. 648 p.
5. Bruskin D.E., Zorokhovich A.E., Khvostov V.S. Elektricheskie mashiny i mikromashiny [Electrical machines and micromachines]. Moscow: Vysshiaia shkola, 1971. 430 p.
6. Geller B., Gamata V. Vysshie garmoniki v asinkhronnykh mashinakh [Higher harmonics in asynchronous machines]. Perevod s angliiskogo pod redaktsiei Z.G. Kaganova. Moscow: Energiia, 1981. 352 p.
7. Kuchera Ia., Gapl I. Obmotki elektricheskikh vrashchattel'nykh mashin [The windings of electric rotary machines]. Praga: Izdatel'stvo Akademii nauk ChSSR, 1963. 983 p.
8. Privalov I.I. Riady Fur'e [Fourier series]. 2 izdanie, ispravlennoe i dopolnennoe. Moskva: Ob"edinennoe nauchno-tekhnicheskoe izdatel'stvo, 1931. 164 p.
9. Geller B., Gamata V. Dopolnitel'nye polia, momenty i poteri moshchnosti v asinkhronnykh mashinakh [Additional fields, moments and power loss in induction machines]. Perevod s cheshskogo pod redaktsiei F.M. Iuferova. Moscow–Leningrad: Energiia, 1964. 263 p.
10. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. 2 izdanie, pererabotannoe i dopolnennoe. Leningrad: Energiia, 1974. 840 p.
11. Beliaev E.F., Shulakov N.V. Diskretno-polevyie modeli elektricheskikh mashin: uchebnoe posobie [Discrete-field models of electric machines: a tutorial]. Perm': Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, part I, II, 457 p.
12. Zimin V.I., Kaplan M.Ia., Palei A.M., Rabinovich I.N., Fedorov V.P., Khakken P.A. Obmotki elektricheskikh mashin [The windings of electric machines]. 5 izdanie, pererabotannoe. Moscow–Leningrad: Gosenergoizdat, 1961. 475 p.

2508593 Рос. Федерация № 2012136476/07; заявл. 27.08.2012; опубл. 27.02.2014. – Бюл. № 6. – 10 с.

16. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылев П.Н. Трехфазный асинхронный электродвигатель с высоким значением коэффициента мощности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 4. – С. 91–102.

17. Цылев П.Н., Щапова И.Н. Направления повышения коэффициента мощности асинхронных электроприводов механизмов предприятий нефтегазовой отрасли // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2015. – № 16. – С. 77–85. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.9.

13. Zavgorodnii V.D., Kedyk L.N. Mnogofaznaia dvukhsloinaia kontsentrisheskaia obmotka: patent 1690103 Rossiiskaia Federatsiia № 4693769/07 [Multiphase two-layer concentric winding: Patent 1690103 Russian Federation № 4693769/07]. Zaiavlen 19.05.1989; opublikovan 07.11.1991. Biulleten' № 41. 9 p.

14. Dann D.B. ml., Fort U. Obmotka trekhfaznogo dvigatel'ia: patent 2,905,840 SShA. № 672,296 [The winding of the three-phase motor: Patent 2,905,840 USA № 672.296]. Zaiavlen 16.07.1957; opublikovan 22.09.1959. 10 p.

15. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsylev P.N. Obmotka statora trekhfaznykh elektricheskikh mashin peremennogo toka: patent 2508593 Rossiiskaia Federatsiia № 2012136476/07 [The stator winding of three-phase alternating current electric machines: Patent 2508593 Russian Federation № 2012136476/07]. Zaiavlen 27.08.2012; opublikovan 27.02.2014. Biulleten' № 6. 10 p.

16. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsylev P.N. Trekhfaznyi asinkhronnyi elektrodvigatel' s vysokim znacheniem koeffitsienta moshchnosti [Three-phase asynchronous electric motor with a high power factor]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2012, no. 4, pp. 91-102.

17. Tsylev P.N., Shchapova I.N. Napravleniia povysheniia koeffitsienta moshchnosti asinkhronnykh elektroprivodov mekhanizmov predpriatii neftegazovoi otrasli [Alternatives to improve capacity coefficient of induction motors for oil-gas industry]. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no. 16, pp. 77-85. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.9.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Погружные асинхронные электрические двигатели с улучшенными эксплуатационными характеристиками / Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылев, И.Н. Щапова, В.А. Щапов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т.15, №18. – С. 71–79. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.8

Please cite this article in English as:

Beliaev E.F., Tsylev P.N., Shchapova I.N., Shchapov V.A. Submersible asynchronous electric motors with improved performance characteristics. *Bulletin of PNRPU. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2016, vol.15, no.18, pp. 71-79. DOI: 10.15593/2224-9923/2016.18.8