

УДК 622.323:621.313.334

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2017

## ДВУХФАЗНЫЙ МНОГОПОЛЮСНЫЙ КОМПЕНСИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылев, И.Н. Щапова

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

## BIPHASE MULTI-POLE COMPENSATED ASYNCHRONOUS MOTOR FOR OIL INDUSTRY

Evgeniy F. Belyaev, Pavel N. Tsylev, Irina N. Shchapova

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

Получена / Received: 21.06.2017. Принята / Accepted: 27.07.2017. Опубликовано / Published: 15.09.2017

### Ключевые слова:

низкопродуктивная скважина, электропривод плунжера, двухфазный асинхронный двигатель, внутренняя компенсация реактивной мощности, математическая модель двухфазного компенсированного двигателя.

### Key words:

low-productive well, plunger electrical drive, biphas asynchronous motor, internal reactive power compensation, mathematical model of a biphas compensated motor.

Перевод низкопродуктивных нефтяных скважин в непрерывный, более оптимальный, режим эксплуатации возможен при применении для электропривода плунжера плунжерных насосов тихоходных асинхронных электрических двигателей. Производство таких двигателей до настоящего времени сдерживается из-за больших габаритов и низких значений важнейшего энергетического показателя – коэффициента мощности.

Предлагается использование для привода плунжера плунжерных насосов оригинальной конструкции двухфазного тихоходного компенсированного асинхронного двигателя, в которой отсутствуют фазосдвигающие элементы, а магнитное поле в воздушном зазоре имеет круговую форму в диапазоне скольжений от 1 до 0.

Уменьшение числа фаз обмотки статора с трех до двух позволяет в 1,5 раза уменьшить габариты двигателя, а осуществление внутренней компенсации намагничивающих токов сетевых обмоток двигателя обеспечивает увеличение коэффициента мощности практически до единицы.

Разработана математическая модель двухфазного тихоходного компенсированного асинхронного двигателя, в основу которой положено уравнение магнитного поля и уравнения Кирхгофа для двух сетевых и двух компенсационных обмоток статора. Описывается последовательность решения уравнений и расчета векторного магнитного потенциала и рабочих характеристик двухфазного тихоходного компенсированного асинхронного двигателя.

Приводятся технические данные и результаты моделирования опытного образца двухфазного компенсированного асинхронного двигателя, на статоре которого размещается обмотка, ее токи возбуждают 10 пар полюсов. Анализ полученных результатов подтверждает возможность и целесообразность разработки и массового внедрения в нефтяной промышленности высокоэкономичных энергоэффективных двухфазных компенсированных тихоходных асинхронных двигателей.

Shift of low-productive oil wells into a continuous more optimal operation mode is possible when plunger electrical drive of plunger pumps is equipped with low-speed asynchronous electric motors. Production of such engines has been constrained until today because of the large dimensions and low values of the most important energy indicator such as power coefficient.

It is proposed to use in the plunger drive of plunger pumps a biphas low-speed compensated asynchronous motor of an original design. A motor has no phase-shifting elements. A magnetic field in an air gap has circular shape in the slip range from 1 to 0.

Reduction of the number of phases of the stator winding from 3 to 2 allows to reduce dimensions of the engine in 1.5 times. Internal compensation of magnetizing currents of network windings of a motor provides an increase in a power coefficient to almost 1.

A mathematical model of a biphas low-speed compensated asynchronous motor is developed. A model is based on the magnetic field equation and the Kirchhoff's equation for two network and two compensated stator windings. A sequence of solution of the equations and calculation of a vector magnetic potential and performance characteristics of a biphas low-speed compensated asynchronous motor are described.

Technical data and results of simulation of a prototype of a biphas compensated asynchronous motor, on whose stator the winding is located, are presented. Its currents excite 10 pairs of poles. An analysis of obtained results confirms the possibility and expediency of development and mass implementation in the oil industry of highly economical energy efficient biphas compensated low-speed asynchronous motors.

**Беляев Евгений Фролович** – доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и электромеханики (тел.: +007 342 237 84 51, e-mail: [irina.shchapova@gmail.com](mailto:irina.shchapova@gmail.com)).

**Цылев Павел Николаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики, профессор (тел.: +007 342 219 84 21, e-mail: [pcpn@pstu.ru](mailto:pcpn@pstu.ru)).

**Щапова Ирина Николаевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики (моб. тел.: +007 902 787 08 07, e-mail: [irina.shchapova@gmail.com](mailto:irina.shchapova@gmail.com)).

Контактное лицо для переписки.

**Evgeniy F. Belyaev** (Author ID in Scopus: 7006634296) – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Electrical Engineering and Mechanics (tel.: +007 342 237 84 51, e-mail: [irina.shchapova@gmail.com](mailto:irina.shchapova@gmail.com)).

**Pavel N. Tsylev** (Author ID in Scopus: 6504320743) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mine Electromechanics, Professor (tel.: +007 342 219 84 21, e-mail: [pcpn@pstu.ru](mailto:pcpn@pstu.ru)).

**Irina N. Shchapova** (Author ID in Scopus: 55750286100) – PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Mine Electromechanics (mob. tel.: +007 902 787 08 07, e-mail: [irina.shchapova@gmail.com](mailto:irina.shchapova@gmail.com)). The contact person.

## Введение

Механическое и электрическое оборудование, посредством которого осуществляется подъем нефти на поверхность, во многом определяется дебитом скважин [1]. Скважины с высоким и средним дебитом эксплуатируются центробежными насосами с электроприводом от погружных асинхронных двигателей. Частота вращения кругового магнитного поля таких двигателей, которое возбуждается токами трехфазной обмотки статора, составляет, как правило,  $3000 \text{ мин}^{-1}$  [2]. Момент на валу погружных асинхронных двигателей, развиваемый электромагнитными силами, зависит от площади наружной поверхности ротора электрического двигателя. Из-за малого диаметра ротора погружных асинхронных двигателей необходимая для работы центробежного насоса величина момента обеспечивается выбором соответствующей длины ротора и двигателя в целом.

Эксплуатация низкопродуктивных скважин с дебитом, не превышающим  $5 \text{ м}^3$  в сутки, производится скважинными штанговыми насосными установками (СШНУ). Возвратно-поступательное движение плунжера плунжерных насосов СШНУ в подавляющем большинстве случаев осуществляется с помощью трехфазных асинхронных электрических двигателей с повышенным пусковым моментом или с повышенным скольжением [3, 4]. На практике преимущественное применение получили асинхронные электрические двигатели номинальной мощностью 15, 22, 30 кВт с частотой вращения магнитного поля статора 750, 1000,  $1500 \text{ мин}^{-1}$  [5]. Если учесть, что клиноремная передача, посредством которой вращающий момент с вала электрического двигателя передается на входной вал редуктора, изменяет частоту вращения в 2,86–4,5 раза, в зависимости от диаметра шкива на валу двигателя, а передаточное отношение редуктора составляет 40, то указанные асинхронные двигатели обеспечивают работу СШНУ с количеством двойных ходов плунжера 4–12,5 в минуту. При такой частоте двойных ходов плунжера и низком дебите скважин периоды включения СШНУ в работу чередуются с периодами ее отключения, в продолжение которых осуществляется накопление жидкости. Данный режим работы СШНУ, называемый в технической литературе циклическим, характеризуется рядом существенных недостатков, на которые указывается в работах [6–8]. Переход к наиболее оптимальному «непрерывному» режиму работы

скважинных штанговых насосных установок, осуществляющих подъем жидкости из скважин с низким дебитом, предполагает установку на станках-качалках асинхронных электрических двигателей с частотой вращения магнитного поля  $375, 200, 150 \text{ мин}^{-1}$  [9–11].

Среди первоочередных проблем, которые возникают при разработке тихоходных электромеханических преобразователей энергии, необходимо выделить две: необходимость снижения габаритных размеров двигателей и повышение значений их важнейшего энергетического показателя – коэффициента мощности [12–14].

Остановимся на возможных подходах к решению отмеченных выше проблем.

### Новое направление совершенствования электропривода скважинных штанговых насосных установок

Из теории электрических машин переменного тока известно, что частота вращения кругового магнитного поля статора асинхронных электрических двигателей  $n_0$ , частота напряжения в питающей сети  $f$  и число пар полюсов обмотки статора  $p$  связаны между собой выражением [15–17]

$$n_0 = 60 f / p. \quad (1)$$

Очевидно, что при частоте питающего напряжения 50 Гц частота вращения кругового магнитного поля статора однозначно определяется количеством пар полюсов его обмотки.

#### Зависимость частоты вращения кругового магнитного поля от количества пар полюсов обмотки статора

$p, \text{ о.е.}$	1	2	3	4	6	8	10	15	20
$n_0, \text{ мин}^{-1}$	3000	1500	1000	750	500	375	300	200	150

Согласно приведенным данным, разработка асинхронных электрических двигателей с частотой вращения магнитного поля 300, 200,  $150 \text{ мин}^{-1}$  предполагает размещение в пазах статора трехфазной обмотки с числом пар полюсов 10, 15, 20 соответственно.

От числа пар полюсов трехфазной обмотки статора зависит диаметр внутренней расточки статора:

$$d_c = 2 p \tau / \pi, \quad (2)$$

где  $\tau$  – длина полюсного деления. С ростом количества пар полюсов трехфазной обмотки диаметр внутренней расточки статора, следовательно, и наружный диаметр статора

возрастают. Увеличивается также наружный диаметр ротора, который меньше диаметра внутренней расточки статора на удвоенную величину воздушного зазора, принимаемого для двигателей малой и средней мощности 0,35–0,70 мм [18]. Из сказанного выше следует, что габариты двигателя возрастают с ростом числа пар полюсов обмотки статора и уменьшением частоты вращения его магнитного поля. Увеличение же диаметра ротора, обусловленное ростом числа пар полюсов обмотки статора, приводит к возрастанию махового момента ротора и негативно отражается на быстродействии двигателя и динамике электропривода плунжера.

Одним из решений, способствующих снижению габаритных размеров асинхронных двигателей электропривода плунжера СШНУ и увеличению их быстродействия, является размещение в пазах статора двухфазной обмотки. Такое техническое решение позволяет в 1,5 раза уменьшить длину полюсного деления обмотки статора, что способствует снижению в той же мере внутреннего диаметра статора и наружного диаметра ротора.

Однако до последнего времени асинхронные электрические двигатели с двухфазной обмоткой на статоре не рассматривались в качестве альтернативы асинхронным электрическим двигателям с трехфазной обмоткой. Такое положение дел во многом объяснялось худшими рабочими характеристиками двухфазных асинхронных двигателей и более сложной их конструкцией. Первый недостаток асинхронных электрических двигателей с двухфазной обмоткой на статоре объясняется эллиптичностью формы магнитного поля, существующего в воздушном зазоре, второй – использованием в конструкции двигателя фазосмещающего элемента [19–21].

Разработка оригинальной конструкции двухфазного асинхронного электрического двигателя [22] кардинальным образом изменяет положение дел.

В пазах стального шихтованного сердечника статора такого двигателя размещаются две равные по числу группы секций, выполненных изолированным проводом, как правило медным. Секции одной группы отличаются от секций другой группы количеством витков и сечением провода. Укладка секций групп по пазам и схемы их соединения при формировании однофазных обмоток осуществляются таким образом, чтобы обеспечивался пространственный сдвиг осей обмоток на  $90^\circ$ . Выводы однофазной обмотки, образованной секциями, имеющими меньшее количество витков, подключаются на одно из фазных напряжений четырехпроводной трех-

фазной питающей сети. Выводы однофазной обмотки, образованной секциями с большим числом витков, подключаются на междуфазное напряжение питающей сети, которое изменяется во времени со сдвигом по фазе относительно упомянутого выше фазного напряжения на  $90^\circ$ . Пространственный сдвиг осей однофазных обмоток на  $90^\circ$  и временной сдвиг на  $90^\circ$  кривых изменения напряжений, действующих на выводах обмоток, позволяют получить в воздушном зазоре двигателя круговое магнитное поле. Важно при этом подчеркнуть, что круговая форма магнитного поля в зазоре между статором и ротором сохраняется в диапазоне скольжений от 1 до 0. Рабочие характеристики, рассчитанные на математической модели такого двухфазного асинхронного двигателя, аналогичны рабочим характеристикам трехфазных асинхронных двигателей [23].

Второй существенный недостаток, характерный для тихоходных трехфазных асинхронных электрических двигателей, а именно низкие значения коэффициента мощности, не устраняется и в двухфазных асинхронных двигателях описанной выше конструкции. Причина данного недостатка заключается в том, что силовые линии магнитного поля, созданного токами обмоток фаз статора, на протяжении каждой пары полюсов дважды пересекают воздушный зазор, обладающий большим магнитным сопротивлением. Для преодоления магнитного сопротивления воздушного зазора между статором и ротором требуется значительный по величине намагничивающий ток, что непосредственно следует из выражения [24]

$$I_\mu = \frac{pF_0}{0,9mwk_0}, \quad (3)$$

где  $I_\mu$  – намагничивающий ток;  $F_0$  – магнитодвижущая сила, приходящаяся на пару полюсов;  $m$  – число фаз двигателя;  $w$  – количество витков в обмотке фазы;  $k_0$  – обмоточный коэффициент. Негативное влияние намагничивающего тока на коэффициент мощности особенно велико в электромеханических преобразователях энергии небольшой мощности, которые в наибольшем количестве требуются для привода плунжера СШНУ, осуществляющих подъем жидкости из скважин с низким дебитом. Например, тихоходные ( $n_0 = 375 \text{ мин}^{-1}$ ) асинхронные двигатели мощностью 4,5 кВт, предназначенные для привода плунжера СШНУ, производство которых освоено на предприятии ООО «Владимирский электромоторный завод», имеют коэффициент мощности 0,46 [25].

Неудовлетворительные значения коэффициента мощности и обусловленная этим низкая энергетическая эффективность тихоходных асинхронных двигателей негативно отражаются на росте загрузки токоведущих элементов систем электроснабжения и являются сдерживающим фактором для организации их массового серийного производства.

Новым направлением работ, способствующих повышению энергетической эффективности тихоходных двухфазных асинхронных двигателей, является внутренняя компенсация намагничивающих токов обмоток статора. С этой целью в пазах стального сердечника статора, кроме двух однофазных сетевых обмоток, размещаются две однофазные компенсационные обмотки, выводы которых подключаются к конденсаторам. Для осуществления работы такого двигателя сетевые обмотки подключаются к сети трехфазного переменного напряжения. Круговое магнитное поле, которое при этом создается токами этих обмоток, наводит в компенсационных обмотках электродвижущие силы, под действием которых по компенсационным обмоткам протекает электрический ток, имеющий опережающий характер. Следствием этого является рост суммарной магнитодвижущей силы и электродвижущих сил сетевых обмоток, что обуславливает уменьшение намагничивающих токов сетевых обмоток. Такой процесс продолжается до того момента, пока электродвижущие силы сетевых обмоток совместно с падениями напряжения на их сопротивлениях не достигнут значений напряжений, действующих на зажимах обмоток.

#### Математическая модель двухфазного компенсированного асинхронного двигателя электропривода плунжера СШНУ

С целью проверки работоспособности двухфазного компенсированного асинхронного двигателя использована математическая модель [26, 27]. В основу работы математической модели положены уравнение магнитного поля [28, 29] и уравнения Кирхгофа [30, 31], число которых равно количеству однофазных обмоток, размещенных в пазах статора.

Уравнение магнитного поля асинхронного двигателя с обмоткой ротора типа «беличья клетка» записывается в следующем виде:

$$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \varphi^2} - \mu_0 \gamma (1 + k_{\sigma 2}) \omega \frac{\partial A}{\partial \varphi} - \mu_0 \gamma (1 + k_{\sigma 2}) \omega \frac{\partial A}{\partial t} - qA = -\mu_0 J_c, \quad (4)$$

где  $A$  – векторный потенциал магнитного поля ( $z$  – составляющая);  $R_0$  – радиус средней окружности воздушного зазора;  $\varphi$  – тангенциальная координата цилиндрической системы координат;  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $\gamma$  – расчетная электропроводность проводников «беличьей клетки» ротора, распределенных в зазоре двигателя;  $k_{\sigma 2}$  – коэффициент рассеяния ротора;  $\omega$  – угловая частота вращения ротора;  $q$  – коэффициент, учитывающий магнитные сопротивления участков магнитопровода двигателя.

Краевая задача, описываемая уравнением (4), решается с учетом граничных условий периодического типа, выражающих равенство векторных потенциалов и их производных в точке сопряжения.

При синусоидальном характере изменения во времени расчетных величин решение задачи можно упростить, если перейти к комплексным функциям. В этом случае дифференциальное уравнение (4) приводится к виду

$$\frac{1}{R_0^2} \frac{\partial^2 \dot{A}}{\partial \varphi^2} - \mu_0 \gamma (1 + k_{\sigma 2}) \omega \frac{\partial \dot{A}}{\partial \varphi} - (j\omega \mu_0 \gamma (1 + k_{\sigma 2}) + q) \dot{A} = -\mu_0 \dot{J}_c, \quad (5)$$

где  $\dot{A}$  – комплекс векторного потенциала;  $j$  – мнимая единица;  $\dot{J}_c$  – комплекс токовой нагрузки статора.

Система уравнений Кирхгофа, составленных для сетевых и компенсационных обмоток статора, записывается следующим образом:

$$\dot{U}_A = j\omega \dot{\Psi}_A + \dot{I}_A (Z_A + jX_{2SA}), \quad (6)$$

$$\dot{U}_B = j\omega \dot{\Psi}_B + \dot{I}_B (Z_B + jX_{2SB}), \quad (7)$$

$$0 = j\omega \dot{\Psi}_{AK} + \dot{I}_{AK} (Z_{AK} + jX_{2SAK} - jX_{CA}), \quad (8)$$

$$0 = j\omega \dot{\Psi}_{BK} + \dot{I}_{BK} (Z_{BK} + jX_{2SBK} - jX_{CB}). \quad (9)$$

Уравнения (6)–(9) записаны с использованием комплексных величин. Приняты следующие обозначения:  $\dot{U}_A, \dot{U}_B$  – фазное и линейное напряжения;  $\dot{\Psi}$  – потокосцепление;  $\dot{I}$  – ток;  $Z$  – полное сопротивление;  $X_{2S}$  – приведенное значение индуктивного сопротивления ротора;  $X_C$  – емкостное сопротивление конденсатора. Индексы «А», «В», «АК», «БК» означают принадлежность данного параметра к соответствующей сетевой или компенсационной обмотке.

Потокасцепления сетевых и компенсационных обмоток двухфазного асинхронного двигателя обусловлены токами, проходящими по обмоткам, и рассчитываются по выражениям

$$\dot{\Psi}_A = L_{11}\dot{I}_A + L_{12}\dot{I}_B + L_{13}\dot{I}_{AK} + L_{14}\dot{I}_{BK}, \quad (10)$$

$$\dot{\Psi}_B = L_{21}\dot{I}_A + L_{22}\dot{I}_B + L_{23}\dot{I}_{AK} + L_{24}\dot{I}_{BK}, \quad (11)$$

$$\dot{\Psi}_{AK} = L_{31}\dot{I}_A + L_{32}\dot{I}_B + L_{33}\dot{I}_{AK} + L_{34}\dot{I}_{BK}, \quad (12)$$

$$\dot{\Psi}_{BK} = L_{41}\dot{I}_A + L_{42}\dot{I}_B + L_{43}\dot{I}_{AK} + L_{44}\dot{I}_{BK}. \quad (13)$$

В правые части уравнений (10)–(13) входят комплексные коэффициенты самоиндукции ( $L$  с двумя одинаковыми индексами) и взаимной индукции ( $L$  с двумя различным индексами).

После подстановки (10)–(13) в уравнения Кирхгофа (6)–(9) и выполнения соответствующих преобразований приходим к системе из четырех уравнений, в которой неизвестными являются четыре тока – два тока сетевых обмоток и два тока компенсационных обмоток:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A = & (j\omega_0 L_{11} + Z_A + jX_{2SA})\dot{I}_A + \\ & + j\omega_0 L_{12}\dot{I}_B + j\omega_0 L_{13}\dot{I}_{AK} + j\omega_0 L_{14}\dot{I}_{BK}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_B = & j\omega_0 L_{21}\dot{I}_A + (j\omega_0 L_{22} + Z_B + jX_{2SB})\dot{I}_B + \\ & + j\omega_0 L_{23}\dot{I}_{AK} + j\omega_0 L_{24}\dot{I}_{BK}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} 0 = & j\omega_0 L_{31}\dot{I}_A + j\omega_0 L_{32}\dot{I}_B + \\ & + (j\omega_0 L_{33} + Z_{AK} + jX_{2SA} - jX_{CA})\dot{I}_{AK} + \\ & + j\omega_0 L_{34}\dot{I}_{BK}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} 0 = & j\omega_0 L_{41}\dot{I}_A + j\omega_0 L_{42}\dot{I}_B + j\omega_0 L_{43}\dot{I}_{AK} + \\ & + (j\omega_0 L_{44} + Z_{BK} + jX_{2SB} - jX_{CB})\dot{I}_{BK}. \end{aligned} \quad (17)$$

Для решения системы уравнений (14)–(17) и расчета значений токов в сетевых и компенсационных обмотках необходимо знание коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции. Расчет этих коэффициентов целесообразно производить с использованием метода суперпозиций в следующей последовательности.

Задаются значением одного из токов при нулевых значениях трех других токов. Решается уравнение магнитного поля (5), в результате чего определяется величина векторного потенциала в точках разбиения пространственной координаты  $\varphi$ , соответствующих расположению проводников обмоток статора. Принимая, что все проводники, лежащие в пазу статора, пронизываются одним и тем же по величине потоком, посредством интегрирования значений векторного потенциала в точках расположения проводников каждой из обмоток рассчитываются потокосцепления катушек:

$$\Psi_K = w_K (A_H - A_K) l_\delta, \quad (18)$$

где  $w_K$  – количество витков в катушке;  $A_H, A_K$  – значения векторного потенциала в точках, координаты которых соответствуют координатам сторон витка;  $l_\delta$  – длина активной части проводника, т.е. части витка, лежащей в пазу статора. Выполняя суммирование потокосцеплений катушек, принадлежащих сетевым и компенсационным обмоткам статора, определяем потокосцепления обмоток  $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_{AK}, \Psi_{BK}$  и далее рассчитываем коэффициенты само- и взаимной индукции:

$$\begin{aligned} L_{11} = \frac{\dot{\Psi}_A}{\dot{I}_A}, L_{21} = \frac{\dot{\Psi}_B}{\dot{I}_A}, \\ L_{31} = \frac{\dot{\Psi}_{AK}}{\dot{I}_A}, L_{41} = \frac{\dot{\Psi}_{BK}}{\dot{I}_A}. \end{aligned} \quad (19)$$

С помощью выполнения подобных процедур для второй сетевой обмотки, а затем для компенсационных обмоток статора рассчитываются все оставшиеся неизвестными значения коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции, входящие в систему уравнений (14)–(17).

При известных значениях коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции и заданных величинах емкости конденсаторов, включенных в цепь компенсационных обмоток, решается система уравнений (14)–(17) и определяются токи в сетевых и компенсационных обмотках.

Мощность  $P$ , потребляемая двигателем из питающей сети, электромагнитная мощность  $P_{эм}$ , полезная мощность на валу  $P_2$ , электромагнитный момент  $M_{эм}$ , коэффициент мощности  $\cos\varphi$ , коэффициент полезного действия  $\eta$  рассчитываются с использованием известных выражений:

$$P = \operatorname{Re}(\dot{U}_A \bar{I}_A + \dot{U}_B \bar{I}_B), \quad (20)$$

$$P_{эм} = P - R_A I_A^2 - R_B I_B^2, \quad (21)$$

$$P_2 = P(1 - s), \quad (22)$$

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega}, \quad (23)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{U_A I_A + U_B I_B}, \quad (24)$$

$$\eta = \frac{P_2}{P}, \quad (25)$$

где  $\operatorname{Re}$  – символ вещественной части комплексного числа;  $\bar{I}_A, \bar{I}_B$  – комплексы действующих значений

токов, сопряженных с комплексами действующих значений токов сетевых обмоток;  $R_A, R_B$  – активные сопротивления сетевых обмоток;  $s$  – скольжение;  $\omega$  – круговая частота;

$$\omega = \omega_0 \frac{1-s}{p}. \quad (26)$$

В качестве модели тихоходного двухфазного асинхронного электромеханического преобразователя энергии использовался асинхронный двигатель, имеющий следующие параметры:

- число пар полюсов  $p$  – 10;
- диаметр рачотки статора  $d_c$  – 383 мм;
- воздушный зазор между статором и ротором  $\delta$  – 0,554 мм;
- длина статора в осевом направлении  $l_a$  – 200 мм;
- число витков  $w_A$  сетевой обмотки фазы «A-X» – 80;
- число витков  $w_B$  сетевой обмотки фазы «B-Y» – 139;
- число витков  $w_{AK}$  компенсационной обмотки фазы «A-X» – 35;
- число витков  $w_{BK}$  компенсационной обмотки фазы «B-Y» – 35;
- расчетная электропроводность материала клетки ротор  $\gamma$  –  $190 \cdot 10^6$  См;
- коэффициент  $q$  – 1320;
- активное сопротивление сетевой обмотки фазы «A-X» – 0,36 Ом;
- индуктивное сопротивление сетевой обмотки фазы «A-X» – 0,756 Ом;
- активное сопротивление сетевой обмотки фазы «B-Y» – 1,08 Ом;
- индуктивное сопротивление сетевой обмотки фазы «B-Y» – 2,268 Ом;
- активное сопротивление компенсационной обмотки фазы «A-X» – 0,02225 Ом;
- индуктивное сопротивление компенсационной обмотки фазы «A-X» – 0,04725 Ом;
- активное сопротивление компенсационной обмотки фазы «B-Y» – 0,02225 Ом;
- индуктивное сопротивление компенсационной обмотки фазы «B-Y» – 0,04725 Ом;
- индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам сетевой обмотки фазы «A-X» – 1,37 Ом;
- индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам сетевой обмотки фазы «B-Y» – 4,11 Ом;
- индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам компенсационной обмотки фазы «A-X» – 0,0856 Ом;
- индуктивное сопротивление обмотки ротора, приведенное к параметрам компенсационной обмотки фазы «B-Y» – 0,0856 Ом;

- емкость конденсатора в цепи компенсационной обмотки фазы «A-X» – 900 мкФ;
- емкость конденсатора в цепи компенсационной обмотки фазы «B-Y» – 900 мкФ;
- комплекс напряжения на сетевой обмотке фазы «A-X» – 219,4 В;
- комплекс напряжения на сетевой обмотке фазы «B-Y» –  $-j380$  В.

Моделирование рабочего режима некомпенсированного двухфазного асинхронного двигателя и двухфазного асинхронного двигателя, в котором осуществляется компенсация намагничивающего тока и реактивной мощности, выполнялось при условии, что величина скольжения  $s$  равна 0,05. Некоторые результаты моделирования указанных двухфазных асинхронных двигателей приводятся ниже в виде матрицы коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции и значений ряда важнейших показателей их работы (таблица). Результаты моделирования отражены также векторными диаграммами (рис. 1, 2), на которых изображены векторы напряжений на сетевых обмотках статора и векторы их магнитодвижущих сил.

Матрица коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции индуктивности  $L$

$$\begin{matrix} 0,0148 - 0,0163j; 0,0256 + 0,0253j; 0,0064 - \\ - 0,0071j; 0,0064 + 0,0063j; \\ - 0,0256 - 0,0253j; 0,0443 - 0,4890j; -0,0111 - \\ - 0,011j; 0,0111 - 0,0122j; \\ 0,0064 - 0,0063j; 0,0111 + 0,0110j; 0,0028 - \\ - 0,0031j; 0,0028 + 0,0027j; \\ - 0,0064 - 0,0063j; 0,0111 - 0,0122j; -0,0028 - \\ - 0,0027j; 0,0028 - 0,00310j. \end{matrix}$$

Значения ряда основных показателей работы двухфазного асинхронного двигателя

Наименование показателя	Отсутствие компенсации	Наличие компенсации
Ток в сетевой обмотке фазы «A-X», А	14,63	11,95
Ток в сетевой обмотке фазы «B-Y», А	8,45	6,90
Ток в компенсационной обмотке фазы «A-X», А	0	27,86
Ток в компенсационной обмотке фазы «B-Y», А	0	27,86
Электромагнитная мощность, Вт	4120,1	5137,7
Электромагнитный момент, Нм	131,15	163,54
Коэффициент полезного действия, о.е.	0,61	0,93
Коэффициент мощности, о.е.	0,64	0,98

Анализ результатов моделирования наглядно показывает, что значения коэффициентов самоиндукции и взаимной индукции инвариантны по отношению к току компенсационных обмоток. Применение компенсации приводит к уменьшению токов

в сетевых обмотках. Наблюдается увеличение электромагнитной мощности и электромагнитного момента. Существенно возрастают значения энергетических показателей двигателя, его энергетическая эффективность. Рост значений энергетических показателей и уменьшение токов, потребляемых из питающей сети трехфазного переменного напряжения, способствуют уменьшению токовой нагрузки токоведущих элементов систем электроснабжения, создают резерв для подключения дополнительных электрических нагрузок к существующим электрическим сетям. Сказанное выше иллюстрируется векторными диаграммами, представленными на рис. 1, 2.

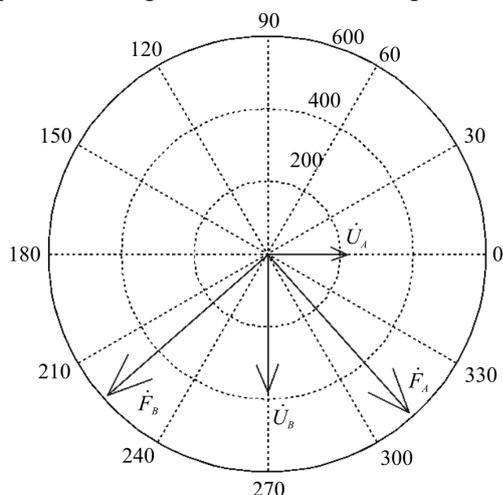


Рис. 1. Векторная диаграмма напряжений и магнитодвижущих сил однофазного асинхронного двигателя без компенсации

Хорошо видно, что в двухфазном асинхронном двигателе с сетевыми обмотками на статоре между векторами напряжений на сетевых обмотках и векторами магнитодвижущих сил существует значительный по величине угол, в токах сетевых обмоток присутствует значительная по величине намагничивающая составляющая, обуславливающая потребление из питающей сети реактивной мощности. Укладка в пазах статора компенсационных обмоток и их подключение к конденсаторам позволяют практически полностью

устранить намагничивающую составляющую в токах сетевых обмоток. Углы сдвига фаз между векторами напряжений на зажимах сетевых обмоток и векторами магнитодвижущих сил в этом случае близки нулю, и из питающей сети переменного напряжения двигатель потребляет практически только активную мощность.

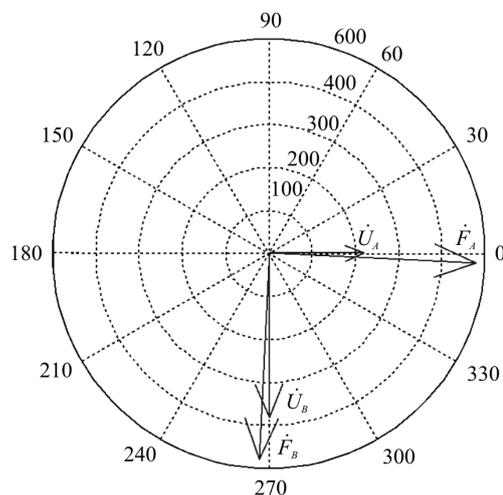


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и магнитодвижущих сил однофазного компенсированного асинхронного двигателя

### Заключение

Исследования работы двухфазного асинхронного компенсированного двигателя на математической модели позволяют утверждать, что полученные результаты и выводы остаются справедливыми для диапазона скольжений от 1 до 0. Производство и широкое внедрение двухфазных асинхронных компенсированных двигателей в приводе плунжера скважинных штанговых насосных установок позволяют простыми средствами осуществить переход к непрерывному, наиболее рациональному, режиму эксплуатации низкодебитных нефтяных скважин, добиться повышения энергетической эффективности процесса добычи нефти, экономии энергетических ресурсов.

### Библиографический список

1. Построение статистических моделей оценки коэффициента извлечения нефти для эксплуатационных объектов Пермского Прикамья / В.И. Галкин, С.В. Галкин, В.Л. Воеводкин, В.Г. Пермяков // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 2. – С. 86–88.
2. Справочная книга по добыче нефти / под ред. Ш.К. Гиматудинова. – М.: Недра, 1974. – 704 с.
3. Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / под общ. ред. И.П. Копылова, Б.К. Клокова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
4. Alves M.F., Burke P.E. Single-sided linear induction motor with magnetic material in the secondary // Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference 1973, Eighth Annual Meeting. – Milwaukee, 1973. – P. 321–329.
5. Каталог нефтяного оборудования, средств автоматизации, приборов и спецматериалов / В.Л. Архангельский [и др.]. – М.: ВНИИОЭНГ, 1994. – Т. 2. – 216 с.
6. Нефтегазовое дело: учеб. пособие: в 6 т. / под ред. А.М. Шаммазова. Т. 3. Добыча нефти и газа / под ред. Ю.В. Зейгмана. – СПб.: Недра, 2011. – 285 с.

7. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов. – М.: Нефть и газ, 2003. – 816 с.
8. Цылев П.Н., Щапова И.Н. Направления повышения коэффициента мощности асинхронных электроприводов механизмов предприятий нефтяной 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
9. Цылев П.Н., Щапова И.Н., Щапов В.А. Повышение энергоэффективности асинхронных электромеханических преобразователей энергии электропривода скважинных штанговых насосов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 5. – С. 110–113.
10. Чаронов В.Я. Экономичные электроприводы для станков-качалок малodeбитных скважин // Нефтяное хозяйство. – 1996. – № 12. – С. 46–48.
11. Retter G.J. The dyadic analysis of partially asymmetrical machines // Archiv für Elektrotechnik. – 1978. – Vol. 60, iss. 2. – P. 69–78. DOI: 10.1007/BF01578628
12. Цылев П.Н., Щапова И.Н. Высокоэффективные тихоходные асинхронные преобразователи энергии малой мощности для нефтяной промышленности // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 4. – С. 62–65.
13. Page C.H. Reactive power in nonsinusoidal situations // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 1980. – Vol. 29, iss. 4. – P. 420–423. DOI: 10.1109/TIM.1980.4314971
14. A new definition of instantaneous active-reactive current and power in three-phase circuits, and its application / A. Nabae, A. Yoshikawa, L. Cao, T. Tanaka // Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi). – 1997. – Vol. 121, iss. 2. – P. 83–91.
15. Кисаримов Р.А. Справочник электрика. – 4-е изд., исправл. и доп. – М.: Радиософт, 2010. – 512 с.
16. Eldhemy S.A. Theory of zero-sequence performance in induction machines without/with multiple armature reaction // Electric Machines and Power Systems. – 1989. – Vol. 17, № 4–5. – P. 295–313. DOI: 10.1080/07313568908909434
17. Vaske P. Über die Drehfelder und Drehmomente symmetrischer Komponenten in Induktionsmaschinen // Archiv für Elektrotechnik. – 1963. – Vol. 48, iss. 2. – P. 97–117. DOI: 10.1007/BF01419338
18. Ермолин Н.П. Электрические машины: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1975. – 295 с.
19. Вольдек А.И. Электрические машины. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – 839 с.
20. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
21. Кацман М.М. Электрические машины автоматических систем: учеб. для электроприборостроит. спец. техникумов / под ред. Ф.М. Юферова. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1979. – 261 с.
22. Тихоходный асинхронный преобразователь энергии: пат. 2402141 Рос. Федерация / Беляев Е.Ф., Цылев П.Н., Власов Е.А. – № 2009141468/07; заявл. 09.11.09; опубл. 20.10.10, Бюл. № 29. – 9 с.
23. Повышение эффективности добычи нефти из низкодебитных скважин за счет совершенствования электрооборудования станков-качалок / Е.Ф. Беляев, Е.А. Власов, Е.М. Огарков, П.Н. Цылев // Нефтепромысловое дело. – 2010. – № 7. – С. 66–70.
24. Сергеев П.С., Виноградов Н.В., Гореинов Ф.А. Проектирование электрических машин. – М.: Энергия, 1970. – 632 с.
25. Технический каталог электродвигателей ВЭМЗ (2010 г.) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vemp.ru/prod/motors.html> (дата обращения: 26.03.2014).
26. 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.
27. Petrov L.P. Die Modelierung der energieverluste in asynchronmotoren unter beachtung der elektromagnetischen ubergangsprozesse // Elektr. – 1980. – Vol. 34, № 7. – S. 375–379.
28. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для электротехн. и энергет. вузов и факультетов: в 3 ч. Ч. 3. Теория электромагнитного поля. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 232 с.
29. Vas P. Modified symmetrical components theory and its application in the theory of asymmetrical induction motors // Periodica Polytechnica, Electrical Engineering. – 1978. – Vol. 22, iss. 1. – P. 3–12.
30. Нейман Л.Р., Калантаров П.Л. Теоретические основы электротехники: учебник для электротехн. и энергет. вузов и факультетов: в 3 ч. Ч. 1. Физические основы электротехники и теория цепей постоянного тока. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 296 с.
31. Ching-Yin Lee, Wei-Yin Lee. Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 1999. – Vol. 14, № 2. – P. 193–201. DOI: 10.1109/60.766983

## References

1. Galkin V.I., Galkin S.V., Voevodkin V.L., Permiakov V.G. Postroenie statisticheskikh modelei otsenki koeffitsienta izvlecheniia nefiti dlia ekspluatatsionnykh ob"ektov Permskogo Prikam'ia [Construction of statistical models for estimating the oil recovery factor for operational facilities of Perm Kama Region]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2011, no.2, pp.86–88.
2. Spravochnaia kniga po dobyche nefiti [Reference book on oil production]. Ed. Sh.K. Gimatudinov. Moscow, Nedra, 1974, 704 p.
3. Spravochnik po elektricheskim mashinam [Reference book of electrical machines]. Ed. I.P. Kopylov, B.K. Klovov. Moscow, Energoatomizdat, 1988, vol.1, 456 p.
4. Alves M.F., Burke P.E. Single-sided linear induction motor with magnetic material in the secondary. *Conference Record of the IEEE Industry Applications Conference 1973, Eighth Annual Meeting*. Milwaukee, 1973, pp.321–329.
5. Arkhangel'skii V.L. et al. Katalog neftianogo oborudovaniia, sredstv avtomatizatsii, priborov i spetsmaterialov [Catalog of oil equipment, automation, instruments and special materials]. Moscow, VNIIOENG, 1994, vol.2, 216 p.
6. Neftgazovoe delo. Vol. 3: Dobycha nefiti i gaza [Oil and gas business. Vol. 3: Oil and gas production]. Ed. Iu.V. Zeigman. Saint Petersburg, Nedra, 2011, 285 p.
7. Mishchenko I.T. Skvazhinnaia dobycha nefiti [Downhole oil production]. Moscow, Neft' i gaz, 2003, 816 p.
8. Tsylev P.N., Shchapova I.N. Alternatives to improve capacity coefficient of induction motors for

oil-gas industry. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil & Gas Engineering & Mining*, 2015, no.16, pp.77-85. DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.9

9. Tsylev P.N., Shchapova I.N., Shchapov V.A. Povyshenie energoeffektivnosti asinkhronnykh elektromekhanicheskikh preobrazovatelei energii elektroprivoda skvazhinnykh shtangovykh nasosov [Direction to increase the energy efficiency of asynchronous electromechanical energy converters for electric drive of sucker rod pumping installations]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2014, no.5, pp.110-113.

10. Charonov V.Ia. Ekonomichnye elektroprivody dlia stankov-kachalok malodebitnykh skvazhin [Economical electric drives for rocking machines of low-yield wells]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1996, no.12, pp.46-48.

11. Retter G.J. The dyadic analysis of partially asymmetrical machines. *Archiv für Elektrotechnik*, 1978, vol.60, iss. 2, pp.69-78. DOI: 10.1007/BF01578628

12. Tsylev P.N., Shchapova I.N. Vysokoeffektivnye tikhokhodnye asinkhronnye preobrazovatelei energii maloi moshchnosti dlia neftianoï promyshlennosti [Low-speed high efficiency asynchronous energy converters of low power for the oil industry]. *Neftianoe khoziaistvo*, 2013, no.4, pp.62-65.

13. Page C.H. Reactive power in nonsinusoidal situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1980, vol. 29, iss. 4, pp.420-423. DOI: 10.1109/TIM.1980.4314971

14. Nabae A., Yoshikawa A., Cao L., Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power in three-phase circuits, and its application. *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, 1997, vol.121, iss.2, pp.83-91.

15. Kisarimov R.A. Spravochnik elektriika [Directory of the electrician]. Moscow, Radiosoft, 2010, 512 p.

16. Eldhemy S.A. Theory of zero-sequence performance in induction machines without/with multiple armature reaction. *Electric Machines and Power Systems*, 1989, vol. 17, no. 4-5, pp. 295-313. DOI: 10.1080/07313568908909434

17. Vaske P. Über die drehfelder und drehmomente symmetrischer komponenten in induktionsmaschinen. *Archiv für Elektrotechnik*, 1963, vol.48, iss.2, pp.97-117. DOI: 10.1007/BF01419338

18. Ermolin N.P. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Moscow, Vysshiaia shkola, 1975, 295 p.

19. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad, Energiia, 1974, 839 p.

20. Kopylov I.P. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Moscow, Energoatomizdat, 1986, 360 p.

21. Katsman M.M. Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh sistem [Electric machines of automatic systems]. Ed. F.M. Iuferov. Moscow, Vysshiaia shkola, 1979, 261 p.

22. Beliaev E.F., Tsylev P.N., Vlasov E.A. Tikhokhodnyi asinkhronnyi preobrazovatel' energii [Low-speed asynchronous power converter]. Patent 2402141 Russian Federation, no.2009141468/07.

23. Beliaev E.F., Vlasov E.A., Ogarkov E.M., Tsylev P.N. Povyshenie effektivnosti dobychi nefti iz nizkodebitnykh skvazhin za schet sovershenstvovaniia elektrooborudovaniia stankov-kachalok [Increasing the efficiency of oil production from low-yield wells by improving the electrical equipment of rocking machines]. *Neftepromyslovoe delo*, 2010, no.7, pp.66-70.

24. Sergeev P.S., Vinogradov N.V., Goreinov F.A. Proektirovanie elektricheskikh mashin [Design of electrical machines]. Moscow, Energiia, 1970, 632 p.

25. Tekhnicheskii katalog elektrodvigateli VEMZ, 2010, available at: <http://www.vemp.ru/prod/motors.html> (accessed 26 March 2014).

26. Beliaev E.F., Shulakov N.V. Diskretno-polevye modeli elektricheskikh mashin [Discrete field models of electrical machines]. Perm', Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2009, part I, II. 457 p.

27. Petrov L.P. Die modelierung der energieverluste in asynchronmotoren unter beachtung der elektromagnetischen ubergangsprozesse. *Elektrie*, 1980, vol.34, no.7, pp.375-379.

28. Neiman L.R., Kalantarov P.L. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Part 3: Teoriia elektromagnitnogo polia [Theoretical bases of electrical engineering. Part 3: Theory of the electromagnetic field]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1959, 232 p.

29. Vas P. Modified symmetrical components theory and its application in the theory of asymmetrical induction motors. *Periodica Polytechnica, Electrical Engineering*, 1978, vol.22, iss.1, pp.3-12.

30. Neiman L.R., Kalantarov P.L. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Part 1: Fizicheskie osnovy elektrotekhniki i teoriia tsepei postoiannogo toka [Theoretical bases of electrical engineering. Part 1: Physical fundamentals of electrical engineering and the theory of DC circuits]. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat, 1959, 296 p.

31. Ching-Yin Lee, Wei-Yin Lee. Effects of nonsinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1999, vol.14, no.2, pp.193-201. DOI: 10.1109/60.766983

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Беляев Е.Ф., Цылев П.Н., Щапова И.Н. Двухфазный многополюсный компенсированный асинхронный двигатель для нефтяной промышленности // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2017. – Т.16, №3. – С.238–246. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.4

Please cite this article in English as:

Belyaev E.F., Tsylev P.N., Shchapova I.N. Biphas multi-pole compensated asynchronous motor for oil industry. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2017, vol.16, no.3, pp.238-246. DOI: 10.15593/2224-9923/2017.3.4