ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ И ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕ

DOI: 10.15593/2224-9923/2015.16.9

УДК 622.276.53.05-886

© Цылев П.Н., Щапова И.Н., 2015

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ МЕХАНИЗМОВ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

П.Н. Цылев, И.Н. Щапова

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Автоматизация производственных процессов технологических объектов нефтегазовой отрасли осуществляется в большинстве случаев с помощью асинхронных электрических двигателей (АЭД). Работа асинхронных электроприводов сопровождается созданием магнитных полей, потреблением намагничивающего тока и реактивной мощности, влияние которых оценивается важнейшим энергетическим показателем – коэффициентом мощности ($\cos \varphi$).

Анализируется влияние частоты вращения магнитного поля асинхронных электрических двигателей и степени использования их паспортной мощности на $\cos \varphi$. Определяются условия, при которых работа АЭД осуществляется с наиболее высокими его значениями. Указывается на низкие значения $\cos \varphi$ тихоходных АЭД малой мощности и ставится задача по его повышению. Предлагается использование в асинхронных электрических двигателях внутренней компенсации реактивной мощности, которое достигается посредством размещения на статоре дополнительной компенсационной обмотки и ее подключения к конденсаторам. Показано, что коэффициент мощности асинхронных электрических двигателей такой конструкции близок к единице и инвариантен относительно величины нагрузки на валу.

Рассматривается новое направление повышения $\cos \varphi$ асинхронных электроприводов механизмов технологических объектов нефтепромыслов: использование вместо конденсаторов в цепи компенсационной обмотки емкости шихтованных сердечников статора АЭД. Показано, что выполнение изоляции стальных листов сердечника статора из материалов с аномально высокими значениями диэлектрической проницаемости позволяет получить емкости необходимой величины для компенсации реактивной мощности. Применение АЭД с внутренней компенсацией реактивной мощности в электроприводах механизмов технологических объектов нефтепромыслов позволяет уменьшить затраты электрической энергии на производство продукции, уменьшить габариты, вес и стоимость электрооборудования систем электрооборудования нефтепромыслов, повысить качество электрической энергии.

Ключевые слова: асинхронный электропривод механизмов технологических объектов нефтегазовой отрасли, энергетическая эффективность, коэффициент мощности, внутренняя компенсация реактивной мощности, емкость стального шихтованного сердечника асинхронного двигателя.

ALTERNATIVES TO IMPROVE CAPACITY COEFFICIENT OF INDUCTION MOTORS FOR OIL-GAS INDUSTRY

P.N. Tsylev, I.N. Shchapova

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

Automation of production processes at oil-gas facilities generally implies exploitation of induction motors. When induction motors operate magnetic fields are formed and exciting current and reactive power are consumed, which influence is measured by a crucial energy parameter named capacity coefficient ($\cos \varphi$).

The paper analyzes influence of magnetic field rotation speed in induction motors and their rated capacity exploitation on ($\cos \varphi$). The conditions are determined that produce the best operation parameters of induction motors. Low values of ($\cos \varphi$) in low speed induction motors are taken notice of and the problem of improving them is formulated. It is suggested to use internal compensation of reactive power in induction motors by installing additional compensating winding on a stator and connecting it to capacitors. It is shown that capacity coefficient in induction motors approached the 1 and does not depend on shaft load parameter.

New developments to improve $\cos \varphi$ in induction motors for oil-gas facilities are discussed, namely replacement of capacitors in the circuit of compensating winding by capacitance of laminated core of the stator. It is proved that isolation of steel plates of stator core by materials with anomalously high dielectric permeability makes it possible to reach required capacitance to compensate reactive power. All in all, application of induction motors with internal compensation of reactive power in electric drives at oil-gas producing facilities allows lowering energy costs, decreasing dimensions, weight and costs of electric equipment for oil industry, as well as to obtain electric power of a higher quality.

Keywords: induction motor in oil industry facilities, energy efficiency, capacity coefficient, internal compensation of reactive power, capacitance of steel laminated core of induction motor.

Введение

Работа большой группы механизмов на предприятиях нефтегазовой отрасли, в частности штанговых скважинных насосных установок, установки погружных электроцентробежных насосов, насосов станций внутри промысловой подготовки нефти, станций систем поддержания пластового давления и т.д., осуществляется с помощью трехфазных асинхронных электрических двигателей (АЭД). Широкая область практического использования асинхронных двигателей в нефтегазовой отрасли объясняется простотой конструкции АЭД, высокой надежностью их работы и сравнительно небольшой стоимостью.

Магнитные поля, намагничивающий ток и реактивная мощность асинхронных электроприводов механизмов нефтегазовой отрасли

Процесс преобразования электрической энергии, подводимой к обмотке статора АЭД, в механическую энергию на валу осуществляется за счет вращающегося магнитного поля [1–3]. Это поле существует в воздушном зазоре между статором и ротором и возбуждается реактивным намагничивающим током трехфазной обмотки статора. Прохождение намагничивающего тока по обмотке статора сопровождается потреблением из питающей электрической сети реактивной мощности, величина которой определяется выражением

$$Q_{10} = m_1 E_1 I_{1p},$$

где m_1 – число фаз обмотки статора; E_1 – электродвижущая сила, индуцируемая в обмотке фазы статора; I_{1p} – реактивный намагничивающий ток фазы статора.

Наряду с вращающимся магнитным полем, которое является основным магнитным полем, при работе асинхронных электрических двигателей возникают и существуют магнитные поля рассеяния статора и ротора [4, 5]. Магнитное поле

рассеяния статора возбуждается электрическими токами, проходящими по обмоткам фаз статора, а магнитное поле рассеяния ротора – электрическим током обмотки ротора. Для создания магнитных полей рассеяния статора и ротора из питающей сети трехфазного переменного напряжения потребляются реактивные мощности рассеяния, расчет которых выполняется с использованием выражений

$$Q_{1p} = m_1 x_{\sigma 1} I_1^2, \quad Q_{2p} = m_2 x_{\sigma 2} I_2^2,$$

где $x_{\sigma 1}, x_{\sigma 2}$ – индуктивные сопротивления рассеяния статора и ротора; I_1, I_2 – токи фаз статора и ротора; m_2 – число фаз обмотки ротора.

Общая реактивная мощность, потребляемая асинхронными электрическими двигателями из питающей сети, определяется как сумма реактивных мощностей основного магнитного поля и реактивных мощностей, связанных с полями рассеяния:

$$Q_1 = Q_{10} + Q_{1p} + Q_{2p}.$$

Реактивная мощность Q_1 асинхронных электрических двигателей оказывает влияние на величину их полной мощности S_1 , что непосредственно следует из формулы

$$S_1 = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2},$$

где P_1 – активная мощность, подводимая к обмотке статора асинхронного двигателя из питающей электрической сети, $P_1 = P_2 / \eta$; P_2 – полезная мощность на валу двигателя; η – коэффициент полезного действия двигателя.

Полная мощность асинхронного двигателя определяет силу тока в фазах обмотки статора:

$$I_1 = S_1 / \sqrt{3} U_1,$$

где U_1 – величина линейного напряжения в питающей электрической сети.

От значения токовой нагрузки статора зависят сечение провода обмотки статора и расход провода, размеры пазов и наружный диаметр стального сердечника, в которые укладываются секции обмотки, геометрические размеры двигателя в целом. С ростом потребления реактивной мощности Q_1 возрастает полная мощность двигателя S_1 , ток в обмотке статора I_1 и электрические потери в проводе обмотки $\Delta P_{м1}$, что негативным образом сказывается на весовых, габаритных и энергетических характеристиках двигателей и их стоимости.

Следует отметить также и то, что увеличение тока I_1 за счет реактивного намагничивающего тока $I_{1р}$, обусловленного потреблением реактивной мощности Q_1 , сопровождается загрузкой токоведущих частей электрооборудования систем внешнего и внутреннего электроснабжения объектов нефтяных предприятий. В состав электрооборудования систем внешнего и внутреннего электроснабжения, по которым осуществляется поставка электрической энергии на объекты нефтегазовых предприятий, входят генераторы электрических станций, повышающие и понижающие трансформаторы, электрооборудование распределительных устройств подстанций, воздушные и кабельные линии различных уровней напряжения. Передача реактивной мощности от электрических станций к местам установки асинхронных двигателей на технологических объектах нефтепромыслов приводит к потерям электрической энергии и напряжения в элементах систем внешнего и внутреннего электроснабжения, снижению коэффициента полезного действия систем электроснабжения, ухудшению показателей качества электрической энергии. Всё сказанное выше в конечном итоге приво-

дит к увеличению стоимости электроэнергии, которую сетевые компании поставляют предприятиям нефтегазовой отрасли, к ухудшению рабочих характеристик потребителей. Следствием этого является рост себестоимости продукции самих предприятий.

Коэффициент мощности – важнейший показатель энергоэффективности асинхронных электроприводов механизмов нефтегазовой отрасли

Оценка влияния реактивной мощности Q_1 на характеристики и работу асинхронных двигателей электроприводов производственных механизмов нефтегазовых предприятий производится с помощью коэффициента мощности $\cos \varphi$ [6]. Данный показатель является важнейшей характеристикой АЭД и вместе с коэффициентом полезного действия определяет их энергетическую эффективность.

Учитывая значимость $\cos \varphi$, как показателя, определяющего эффективность использования электрической энергии, ее качество, весогабаритные характеристики и стоимость электрооборудования, в России в 2000 г. в действие был введен ГОСТ Р51677–2000¹, которым устанавливаются минимально допустимые значения номинального коэффициента мощности для асинхронных электрических двигателей. Области значений номинальных мощностей и число типоразмеров асинхронных электрических двигателей с количеством пар полюсов обмотки статора p от одного до шести, на которые распространяется действие данного документа, представлены на рис. 1, 2.

Диаграммы (см. рис. 1, 2) показывают, что для асинхронных электрических двигателей с $p = 1$ и $p = 2$ стандарт распространяется на весь ряд номинальных

¹ ГОСТ Р51677–2000. Машины электрические асинхронные мощностью от 1 до 400 кВт включительно. Двигатели. Показатели эффективности. М.: Изд-во стандартов, 2001.

мощностей от 1,1 до 400 кВт. С увеличением количества пар полюсов статора диапазон номинальных мощностей двигателей с нормированием $\cos\phi$ уменьшается. В частности, при размещении на статоре обмотки, создающей при работе шесть пар полюсов, нормирование коэффициента мощности распространяется только на пять типоразмеров двигателей с номинальной мощностью от 45 до 110 кВт.

Рис. 1. Области значений номинальных мощностей асинхронных электрических двигателей с нормированием значений коэффициента мощности

Рис. 2. Количество типоразмеров асинхронных электрических двигателей с нормированием значений коэффициента мощности

С количеством пар полюсов обмотки статора p непосредственно связана частота вращения магнитного поля n_0 и частота вращения ротора n . Это следует из выражений

$$n_0 = \frac{60f}{p}, \quad n = n_0(1-s),$$

где f – частота напряжения в питающей сети, $f = 50$ Гц; s – скольжение. Очевидно, если $p = 1$, то $n_0 = 3000$ мин⁻¹; при $p = 2$ $n_0 = 1500$ мин⁻¹. Асинхронные электрические двигатели с частотой вращения магнитного поля 3000 и 1500 мин⁻¹ относятся к высокоскоростным двигателям, и действие стандарта Р51677–2000 распространяется на весь ряд типоразмеров таких двигателей. В АЭД с частотой вращения магнитного поля 1000 мин⁻¹ и менее действие стандарта распространяется на меньшее число типоразмеров.

Анализ влияния частоты вращения и коэффициента использования номинальной мощности АЭД на величину $\cos\phi$

Потребление реактивной мощности асинхронными электрическими двигателями и значения их коэффициента мощности существенным образом зависят от количества пар полюсов обмотки статора (рис. 3) и коэффициента загрузки, характеризующего степень использования номинальной мощности двигателей, $P_{\text{ном}}$ (рис. 4).

Рис. 3. Зависимости коэффициента мощности АЭД от количества пар полюсов: 1 – $P_{\text{ном}} = 30$ кВт; 2 – $P_{\text{ном}} = 4$ кВт

Согласно рис. 3 работа высокоскоростных асинхронных электрических двигателей ($p = 1$ и $p = 2$) осуществляется с наиболее высокими значениями $\cos\phi$, т.е. с меньшим потреблением реактивной мощности. Для осуществления работы АЭД с количеством пар полюсов три

и более требуется больший намагничивающий ток, что негативным образом отражается на величине $\cos\varphi$ двигателей. Снижение коэффициента мощности по мере роста числа пар полюсов статора наиболее сильно проявляется в асинхронных двигателях небольшой мощности (см. рис. 3).

Рис. 4. Зависимости коэффициента мощности от коэффициента загрузки: 1 – $n_0 = 1500 \text{ мин}^{-1}$; 2 – $n_0 = 500 \text{ мин}^{-1}$

Величина нагрузки на валу асинхронных электрических двигателей, создаваемая производственными механизмами нефтепромыслов, оказывает существенное влияние на коэффициент мощности. Графики (см. рис. 4) показывают, что работа двигателей с минимальными значениями $\cos\varphi$ приходится на режим холостого хода ($K_z = 0$). С ростом нагрузки на валу двигателей значения коэффициента мощности увеличиваются. В номинальном режиме работы ($K_z = 1$) асинхронные электрические двигатели осуществляют работу с коэффициентом мощности, близким к своему наибольшему значению. Согласно рис. 4 значения $\cos\varphi$ при заданном значении коэффициента загрузки зависят от частоты вращения ротора двигателя: с уменьшением частоты вращения ротора значения $\cos\varphi$ снижаются.

Характер зависимостей $\cos\varphi$ от коэффициента загрузки сохраняется и для асинхронных электрических двигателей с другими значениями n_0 . Изменения касаются лишь численных значений коэф-

фициента мощности, соответствующих заданной нагрузке.

Анализ влияния количества пар полюсов статора и степени загрузки АЭД на $\cos\varphi$, а также обеспечение требований эффективности использования электрической энергии и оптимизации весогабаритных и стоимостных показателей электрооборудования предполагают применение в электроприводах механизмов технологических объектов нефтегазовой отрасли высокоскоростных АЭД и их загрузку номинальной мощностью. Поэтому закономерным представляется то, что асинхронные электрические двигатели значительной части насосных агрегатов на технологических объектах нефтепромыслов осуществляют работу с частотой вращения магнитного поля 3000 и 1500 мин^{-1} и с нагрузкой на валу, которая оценивается в 65–80 % от паспортной мощности. Данные цифры базируются на результатах, которые получены авторами при обследовании электрических нагрузок технологических объектов ряда нефтепромыслов ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Особо следует остановиться на исследовании энергетической эффективности работы АЭД, которые устанавливаются на станках-качалках и используются в электроприводе штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ).

Применение на станках-качалках высокоскоростных асинхронных двигателей с номинальной частотой вращения ротора 1460 мин^{-1} совместно со штатным редуктором и клиноременной передачей позволяет получить 8–12,8 качаний балансира в минуту. Если дебит скважины не превышает 5 т/сут, то работа ШСНУ с таким числом качаний балансира осуществляется в циклическом режиме, для которого характерен ряд недостатков [7–11]. К наиболее существенным недостаткам относятся следующие: снижение добычи жидкости, рост ее обводненности, значительная установленная мощность АЭД привода ШСНУ.

Переход к непрерывному режиму эксплуатации скважин с дебитом 5 т/сут и менее позволяет устранить многие недостатки, которые присущи циклическому режиму работы ШСНУ. На это указывается, в частности, в работах [12, 13].

Для перевода скважин, характеризующихся низким дебитом, в непрерывный режим эксплуатации, при условии использования на станках-качалках штатного редуктора и клиноременной передачи, необходимы АЭД с частотой вращения магнитного поля 375–500 мин⁻¹. Производство таких АЭД, особенно с частотой вращения магнитного поля 375 мин⁻¹, сдерживается во многом из-за низких значений их коэффициента мощности.

Применение внутренней компенсации реактивной мощности асинхронных электроприводов

Перспективным направлением повышения коэффициента мощности АЭД с частотой вращения магнитного поля 375–500 мин⁻¹ и последующего широкого применения таких двигателей в электроприводе ШСНУ, осуществляющих добычу жидкости из скважин с низким дебитом, является компенсация реактивной мощности внутри самого двигателя².

На статоре асинхронных электрических двигателей с внутренней компенсацией реактивной мощности размещаются две трехфазные обмотки: сетевая и компенсационная. Фазы сетевой обмотки соединяются в схему «звезда» и включаются в сеть трехфазного переменного напряжения. Фазы компенсационной обмотки также соединяются по схеме «звезда» и подключаются к конденсаторам, соединенным в схему «треуголь-

ник». Количество секций фаз сетевой и компенсационной обмоток одинаково. Число витков и сечение провода в секциях обмоток отличаются друг от друга. Электрическая связь обмоток отсутствует.

Работа асинхронных двигателей с внутренней компенсацией реактивной мощности основана на использовании вращающегося магнитного поля, которое создается намагничивающим током трехфазной компенсационной обмотки. По фазам сетевой обмотки такого двигателя проходит ток, который содержит практически только активную составляющую, и поэтому из питающей электрической сети потребляется только активная мощность. Численные значения коэффициента мощности асинхронных двигателей с внутренней компенсацией реактивной мощности не зависят от нагрузки на валу и близки к своему теоретически максимальному значению ($\cos\varphi = 1$).

Размещение на статоре АЭД компенсационной обмотки сопровождается потерями энергии в активных сопротивлениях ее фаз. Одновременно с этим уменьшаются потери энергии в активных сопротивлениях фаз сетевой обмотки за счет компенсации реактивной составляющей тока. Общие потери в АЭД с компенсацией и без компенсации реактивной мощности, как показали проведенные расчеты, не отличаются друг от друга. Следовательно, внутренняя компенсация реактивной мощности и обусловленное ею повышение коэффициента мощности не сказываются на значениях коэффициента полезного действия двигателей. В результате работа асинхронных электрических двигателей, в которых применяется компенсация реактивной мощности, будет осуществляться с более высокими значениями энергетического коэффициента полезного действия, численные значения которого рассчитываются по выражению

$$\eta_{\text{эл}} = \eta \cdot \cos\varphi.$$

² Пат. 2478249 Российская Федерация. Трехфазный асинхронный электрический двигатель / Е.Ф. Беляев, А.А. Ташкинов, П.Н. Цылев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2011138279; заявл. 16.09.11; опубл. 27.03.13, Бюл. № 9. С. 9.

Для сравнения приведем следующие цифры. Номинальное значение коэффициента мощности АЭД с частотой вращения магнитного поля статора 375 мин^{-1} , производимых Владимирским электромоторным заводом для электропривода станков-качалок, составляет 0,44 [14]. Применение внутренней компенсации реактивной мощности в таких двигателях позволяет увеличить коэффициент мощности до значений 0,98–0,99, что обеспечивает рост энергетического коэффициента полезного действия в 2,2 раза.

Существенное повышение энергетической эффективности асинхронных электрических двигателей с внутренней компенсацией реактивной мощности достигается за счет незначительного усложнения конструкции двигателей и повышения их стоимости на 8–10 %.

Использование емкости шихтованных стальных сердечников статора для компенсации реактивной мощности

Новым направлением в разработке энергоэффективных асинхронных электрических двигателей для привода производственных механизмов предприятий нефтегазовой отрасли являются двигатели, в которых вместо конденсаторов в цепи компенсационной обмотки используются емкости шихтованных сердечников статора³.

Известно, что сердечники статоров асинхронных двигателей набираются из отдельных, изолированных друг от друга пластин электротехнической стали толщиной 0,35–0,50 мм. Шихтовка сердечников выполняется с целью уменьшения

вихревых токов и повышения коэффициента полезного действия двигателей.

В шихтованном сердечнике статора каждые две рядом расположенные пластины, разделенные слоем изоляции, образуют элементарный конденсатор, емкость которого определяется из выражения

$$C_s = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon \cdot S_{\text{л}}}{2 \cdot \Delta},$$

где $\epsilon_0 \cdot \epsilon$ – абсолютная диэлектрическая проницаемость материала изоляции; $S_{\text{л}}$ – площадь листа стали сердечника статора за вычетом площади пазов; Δ – толщина изоляции листа стали.

Относительная величина диэлектрической проницаемости ϵ изоляционных материалов, применяемых при производстве асинхронных двигателей, составляет несколько единиц. В этих условиях емкость элементарного конденсатора получается незначительной. Параллельное включение элементарных конденсаторов в фазы, каждая из которых образуется $n/3$ количеством пластин (n – общее число пластин), позволяет несколько увеличить емкость фаз. Однако и при параллельном включении элементарных конденсаторов емкость фаз остается недостаточной для практического осуществления компенсации реактивной мощности, которую двигатель потребляет из питающей сети.

Значительное увеличение емкостей фаз, образованных пластинами шихтованного сердечника статора, достигается при использовании в качестве изоляции между пластинами материалов с аномально высокими значениями относительной диэлектрической проницаемости [15, 16]. Примером такого материала является марганцово-цинковый феррит. Расчетами установлено, что если нанести на поверхность листов стали сердечника статора асинхронного двигателя 4А80А4У3 слой марганцово-цинкового феррита толщиной 0,1 мм, то емкость $n/3$

³ Пат. 2422967 Российская Федерация. Способ уменьшения реактивного намагничивающего тока в элементах систем электроснабжения и устройство для его осуществления / Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылев; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет». № 2010119825; заявл. 17.05.10; опубл. 27.06.11, Бюл. № 18. С. 11.

пластин его сердечника будет составлять 643,3 мкФ, что вполне достаточно для осуществления полной компенсации реактивной мощности двигателя.

Заключение

Широкое внедрение в электроприводах механизмов технологических объектов нефтепромыслов асинхронных электрических двигателей, в которых осуществлена внутренняя компенсация реактивной мощности с использованием конденсаторов или емкости шихтован-

ных сердечников, позволяет добиться существенной экономии электрической энергии и снижения удельных энергетических затрат на производство продукции. Одновременно с этим достигается снижение габаритов и стоимости электрооборудования систем внутреннего и внешнего электроснабжения предприятий нефтегазовой отрасли, а также увеличение коэффициента полезного действия при передаче электрической энергии от электростанций к технологическим объектам нефтяных предприятий.

Список литературы

1. Oberretl K. Zusätzliche wirbelstromverluste in nutenleitern infolge eindringendem luftspaltfeld // Arch. f. Elektr. – 1978. – Vol. 60, iss. 3. – S. 121–127. DOI: 10.1007/BF01578985
2. Kulda J., Adam J. Das Magnetfeld im einseitig genuteten Luftspalt // ETZ-A. – 1970. – Bd 91. – S. 109–113.
3. Levi E., Panzer M. Electromechanical power conversion. – New York: McGraw-Hill, 1966.
4. 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.
5. LeGal G., Canal M. Method pour une planification optimale de la compensation d l energie reactive sur les reseaux de distribution // AIM Liege. – CIRED. – 1971. – 13 Mai.
6. Кисаримов Р.А. Справочник электрика. – 4-е изд., испр. и доп. – М.: Радиософт, 2010. – 512 с.
7. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти: учеб. пособие для вузов. – М.: Нефть и газ, 2003. – 816 с.
8. Нефтегазовое дело: в 6 т.: учеб. пособие / под ред. проф. А.М. Шаммазова. Т. 3. Зейгман Ю.В. Добыча нефти и газа. – СПб.: Недра, 2011. – С. 156–157.
9. Повышение эффективности добычи нефти из низкодебитных скважин / Е.М. Огарков, П.Н. Цылев, А.Д. Коротаев, А.М. Бурмакин // Вестник Пермского государственного технического университета. Нефть и газ. – 2005. – № 6. – С. 172–175.
10. Совершенствование электропривода и электрооборудования системы электроснабжения станков-качалок куста низкодебитных скважин / П.Н. Цылев, Е.М. Огарков, И.Н. Щапова, А.Д. Коротаев // Вестник Пермского государственного технического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2007. – № 7. – С. 253–259.
11. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылев П.Н. Совершенствование электропривода станков-качалок нефтяных скважин с малым дебитом // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2012. – № 4. – С. 91–102.
12. Чаронов В.Я. Экономичные электроприводы для станков-качалок малодебитных скважин // Нефтяное хозяйство. – 1996. – № 12. – С. 46–48.
13. Модернизация электрооборудования станков-качалок низкодебитных нефтяных скважин / П.Н. Цылев, Е.М. Огарков, Е.Ф. Беляев, А.М. Бурмакин // Научные исследования и инновации. – 2009. – Т. 3, № 4. – С. 59–65.
14. Технический каталог электродвигателей ВЭМЗ (2010 г.) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.vemp.ru/prod/motors.html> (дата обращения: 26.03.2014).
15. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – Т. 3. – С. 6–13.
16. Мишин Д.Д. Магнитные материалы: учеб. пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – С. 197–232.

References

1. Oberretl K. Zusätzliche wirbelstromverluste in nutenleitern infolge eindringendem luftspaltfeld. Arch. f. Elektr., 1978, vol. 60, iss. 3, ss. 121–127. DOI 10.1007/BF01578985
2. Kulda J., Adam J. Das Magnetfeld im einseitig genuteten Luftspalt. ETZ-A, 1970, bd 91, ss. 109–113.
3. Levi E., Panzer M. Electromechanical power conversion. New York: McGraw-Hill, 1966.
4. Geller B., Gamata V. Dopolnitel'nye polia, momenty i poteri moshchnosti v asinkhronnykh mashinakh [Additional fields, torques and power loss in induction engines]. Moscow, Leningrad: Energiia, 1964. 263 p.
5. LeGal G., Canal M. Method pour une planification optimale de la compensation d l energie reactive sur les reseaux de distribution. AIM Liege. CIRED, 1971, 13 Mai.
6. Kisarimov R.A. Spravochnik elektrika [Electrician's reference book]. 4th ed. Moscow: Radiosoft, 2010. 512 p.
7. Mishchenko I.T. Skvazhinnaia dobycha nefi [Oil well production]. Moscow: Nef' i gaz, 2003. 816 p.
8. Zeigman Iu.V. Dobycha nefi i gaza [Petroleum engineering]. Neftgazovoe delo. Ed. by A.M. Shammazov. Saint Petersburg: Nedra, 2011, pp. 156–157.

9. Ogarkov E.M., Tsylev P.N., Korotaev A.D., Burmakin A.M. Povyshenie effektivnosti dobychi nefiti iz nizkodebitnykh skvazhin [Improving oil production from marginal wells]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Neft' i gaz*, 2005, no. 6, pp. 172-175.
10. Tsylev P.N., Ogarkov E.M., Shchapova I.N., Korotaev A.D. Sovershenstvovanie elektroprivoda i elektrooborudovaniia sistemy elektrosnabzheniia stankov-kachalok kusta nizkodebitnykh skvazhin [Improvement of electric drives and equipment for a system of power supply to beam-pumping units for marginal well cluster]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2007, no. 7, pp. 253-259.
11. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsylev P.N. Sovershenstvovanie elektroprivoda stankov-kachalok neftiannykh skvazhin s malym debitom [Improvement of electric drives of beam-pumping units for oil wells with low flow rate]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Geologiya. Neftegazovoe i gornoe delo*, 2012, no. 4, pp. 91-102.
12. Charonov V.Ia. Ekonomichnye elektroprivody dlia stankov-kachalok malodebitnykh skvazhin [Cost-efficient electric drives for beam-pumping units for low flow rate wells]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1996, no. 12, pp. 46-48.
13. Tsylev P.N., Ogarkov E.M., Beliaev E.F., Burmakin A.M. Modernizatsiia elektrooborudovaniia stankov-kachalok nizkodebitnykh neftiannykh skvazhin [Upgrade of electric equipment of beam-pumping units of low flow rate wells]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii*, 2009, vol. 3, no. 4, pp. 59-65.
14. Tekhnicheskii katalog elektrodvigatelei VEMZ. 2010 [Technical catalogue of electric drives VEMZ. 2010], available at: <http://www.vemp.ru/prod/motors.html> (accessed 26 March 2014).
15. Spravochnik po elektrotekhnicheskim materialam [Reference book of electrotechnical materials]. Eds. Iu.V. Koritskogo, V.V. Pasyukova, B.M. Tareeva. 3rd ed. Leningrad: Energoatomizdat, 1988. Vol. 3, pp. 6-13.
16. Mishin D.D. Magnitnye materialy [Magnetic materials]. 2nd ed. Moscow: Vysshiaia shkola, 1991, pp. 197-232.

Об авторах

Цылев Павел Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: pcpn@pstu.ru).

Щапова Ирина Николаевна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры горной электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: irina.shchapova@gmail.com).

About the authors

Pavel N. Tsylev (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department Of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: pcpn@pstu.ru).

Irina N. Shchapova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department Of Mining Electromechanics, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29; e-mail: irina.shchapova@gmail.com).

Получено 31.03.2015

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

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

Please cite this article in English as:

Tsylev P.N., Shchapova I.N. 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