

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАНКОВ-КАЧАЛОК НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН С МАЛЫМ ДЕБИТОМ

Е.Ф. Беляев, А.А. Ташкинов, П.Н. Цылёв

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

Отмечается экономическая целесообразность перевода малопродуктивных нефтяных скважин, эксплуатируемых установками скважинных штанговых насосов с балансирными станками-качалками, из циклического режима работы в непрерывный режим эксплуатации. Для реализации непрерывного режима добычи нефти из малопродуктивных нефтяных скважин необходимо уменьшать частоту хода плунжера насосов. Приводится анализ технических решений, направленных на снижение частоты хода плунжера насосов. Производится сопоставление вариантов с изменением передаточного числа звеньев кинематической цепи станка-качалки, с применением регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока, с использованием асинхронных электродвигателей с низкой частотой вращения ротора. В качестве приоритетного направления работ по реализации непрерывного режима эксплуатации малопродуктивных нефтяных скважин рассматривается направление, связанное с использованием в электроприводе станков-качалок асинхронных электродвигателей с низкой частотой вращения ротора. Дается описание новых оригинальных конструкций асинхронных электродвигателей с низкой частотой вращения ротора. В частности, приводятся результаты внедрения на станках-качалках асинхронных электродвигателей со статором в форме дуги. Описывается конструкция двухфазного асинхронного электродвигателя без пусковых устройств в цепи статора, обладающего характеристиками трёхфазных электродвигателей. Указывается на необходимость оптимизации энергетических показателей асинхронных электродвигателей с низкой частотой вращения ротора. Рассматриваются пути повышения коэффициента полезного действия и коэффициента мощности асинхронных электродвигателей привода станков-качалок скважин с малым дебитом. Делается ссылка на разработку конструкции асинхронного электродвигателя, работающего с коэффициентом мощности, значение которого близко к единице и не зависит от степени загрузки электродвигателя.

Ключевые слова: малопродуктивная нефтяная скважина, станок-качалка, плунжерный насос, электропривод, кинематическая цепь, асинхронный электродвигатель с низкой частотой вращения ротора, электродвигатель со статором в форме дуги, двухфазный асинхронный электродвигатель с круговым магнитным полем, энергетическая эффективность, коэффициент полезного действия, коэффициент мощности.

IMPROVEMENTS OF THE BEAM PUMPING UNIT ELECTRICAL DRIVE OF THE DRIPPER

E.F. Beliaev, A.A. Tashkinov, P.N. Tsyliov

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia

There is the economic feasibility of transfer of marginal oil wells operated by units of well sucker-rod pumps with a pumping unit counterweight, from cyclic mode of operation in continuous mode of operation. To implement the continuous operation of oil production from marginal oil wells it is necessary to reduce the incidence of piston pumps stroke. An analysis of technical solutions aimed at reducing the frequency of stroke plunger pumps is being held. Options are compared with the change of gear units of the kinematic chain of pumping unit, with adjustable electric DC and AC induction motors with a low rotor speed. As a priority area of work for the implementation of a continuous mode of operation is considered marginal oil wells direction associated with the use of electric drive pumping units of asynchronous electric motors with a low rotor speed. A new original design of induction motors with a low rotor speed is being described. In particular, the results of the introduction to the pumping unit of induction motor with stator in the form of an arc are given. The construction of a two-phase induction motor with no starters in the chain of the stator, which has the characteristics of three-phase motors is being described. The need to optimize the energy performance of induction motors with a low rotor speed is being showed. There are considered ways to improve the efficiency and power factor of induction motors drive pumping units of wells with low flow rates. Reference is made to develop the design induction motor, which work is carried out with a power factor value, which is close to unit and is independent of the motor decking.

Keywords: unproductive oil well pumping unit, plunger pump, electric, kinematic chain, asynchronous motor with a low rotor speed, the motor with the stator in the form of an arc, a two-phase asynchronous motor with a circular magnetic field, energy efficiency, the efficiency coefficient capacity.

Введение

Количество нефтяных скважин с малым дебитом (менее 5 т/сут) только в Пермском крае в настоящее время составляет более 2 тысяч. Имеет место негативная тенденция к увеличению числа таких скважин. Объясняется это во многом истощением находящихся в эксплуатации месторождений нефти. В связи с этим остро встаёт проблема оптимальной эксплуатации скважин с малым дебитом.

Многочисленные эксперименты на нефтяных скважинах с низким дебитом показывают, что добычу нефти можно существенно увеличить, если перевести скважину из циклического режима эксплуатации в непрерывный режим работы.

Для подъёма нефти из скважин с низким дебитом преимущественно используются станки-качалки с плунжерными насосами. Для реализации режима непрерывной работы таких скважин частоту хода плунжера насоса приходится уменьшать до одного хода в минуту [1, 2]. Дальнейшее снижение частоты хода плунжера может оказаться нецелесообразным из-за роста влияния утечек добываемой жидкости через зазор между корпусом насоса и плунжером. При снижении частоты хода плунжера пропорционально уменьшается теоретическая производительность насоса при сохранении на прежнем уровне утечек жидкости. Реальная производительность насоса при этих условиях может уменьшиться до нуля.

Частота хода плунжера насоса определяется частотой вращения вала электродвигателя, установленного на станке-качалке, и передаточным числом звеньев кинематической цепи станка-качалки. Поэтому снижение частоты хода плунжера возможно осуществить двумя способами: увеличением передаточного числа звеньев кинематической цепи станка-качалки и уменьшением частоты вращения вала электродвигателя.

Двухступенчатый редуктор, установленный на станках-качалках, имеет передаточное число i_1 , величина которого равна 40, в процессе эксплуатации станков-качалок оно сохраняется постоянной. Передаточное число клиноременной передачи i_2 можно изменять в пределах 2,8–4,5 за счёт замены шкива одного диаметра на валу электродвигателя шкивом другого диаметра. Следовательно, наибольшее значение передаточного числа i_3 кинематической цепи станка-качалки составляет 180.

Синхронная частота вращения вала ротора асинхронных электродвигателей при частоте напряжения питающей сети 50 Гц определяется числом пар полюсов обмотки статора. В асинхронных электродвигателях, находящихся в эксплуатации на станках-качалках отечественного и зарубежного производства [3–5], на статоре укладываются обмотки с числом пар полюсов 2, 3, 4, обеспечивающие в процессе работы электродвигателя вращение вала ротора с синхронной частотой 1500, 1000, 750 об/мин.

Таким образом, минимальная частота хода плунжера насоса, которая может быть получена на станках-качалках со штатным механическим и электрическим оборудованием, составляет 4 мин^{-1} . Такая частота хода плунжера насоса превышает её значение, требуемое для осуществления непрерывного режима отбора жидкости из скважин с малым дебитом.

Решение важной практической задачи перевода скважин с низким дебитом в непрерывный режим эксплуатации становится возможным как за счёт изменения передаточного числа звеньев кинематической цепи станков-качалок, так и посредством уменьшения частоты вращения электродвигателей, что может быть осуществлено с помощью регулируемых электроприводов постоянного и переменного тока или благодаря использованию тихоходных асинхронных электродвигателей.

Пути перевода малопродуктивных нефтяных скважин в непрерывный режим работы с увеличением передаточного числа звеньев кинематической цепи

Известен ряд технических решений, позволяющих изменять значение передаточного числа звеньев кинематической цепи станка-качалки [6]. К таким решениям относятся: применение дополнительной ременной передачи, использование мотор-редукторов, замена существующих ременной передачи и редуктора трёхступенчатым редуктором, сочленённым с валом ротора многоскоростного асинхронного электродвигателя. Однако данные конструктивные решения не получили на практике широкого применения из-за необходимости проведения реконструкции станков-качалок и дополнительных затрат на обслуживание и ремонт механического оборудования.

Реализация непрерывного режима эксплуатации низкодебитных нефтяных скважин посредством регулирования частоты вращения электродвигателей станков-качалок

Внедрение регулируемого электропривода постоянного тока на станках-качалках, установленных на скважинах с низким дебитом, относится к 1987 г. В указанном году по заданию руководства объединения «Пермнефть» учёные кафедр «Электротехника и электроника» и «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Пермского политехнического института установили на трёх станках-качалках Козубаевского месторождения нефти и газа вместо трёхфазных асинхронных электродвигателей электродвигатели постоянного тока. Подключение электродвигателей постоянного тока к питающей сети было осуществлено через полупроводниковые управляемые выпрямители, что позволяло производить глубокое и плавное регулирование частоты вращения электродвигателей и частоты хода плунжера насосов [7].

Замена нерегулируемых асинхронных электроприводов станков-качалок регулируемыми электроприводами постоянного тока позволила осуществить переход от циклического режима эксплуатации скважин к непрерывному режиму их работы и установить оптимальную по объёму добываемой нефти частоту хода плунжеров насосов. Опытная эксплуатация регулируемых электроприводов постоянного тока в течение года и наблюдения за работой скважин позволили установить, что добыча нефти на этих скважинах возросла в 2,2 раза. Одновременно было выявлено существенное снижение обводнённости добываемой нефти.

Частотно-регулируемый асинхронный электропривод [6] по своим функциональным возможностям подобен регулируемому электроприводу постоянного тока. В этом варианте электропривода используется асинхронный электродвигатель, установленный на станке-качалке, но его обмотка статора подключается к питающей сети трёхфазного переменного напряжения не напрямую, а посредством полупроводникового преобразователя частоты. Изменением частоты и величины напряжения на обмотке статора с помощью преобразователя достигается глубокое и плавное регулирование числа оборотов вала ротора асинхронного электродвигателя, что позволяет устанавливать требуемую для оптимального отбора нефти из скважины частоту хода плунжера насоса. Внедрение частотных электроприводов на станках-качалках экономически целесообразнее применения электроприводов постоянного тока, что объясняется меньшей стоимостью асинхронных электродвигателей по сравнению с электродвигателями постоянного тока и меньшими затратами на их обслуживание.

Регулируемые электроприводы постоянного и переменного тока имеют ряд недостатков, главными из которых являются: высокая стоимость, эксплуатационные затраты на их обслуживание, по-

явление в питающей сети трёхфазного переменного напряжения высших временных гармоник. Эти недостатки регулируемых электроприводов сдерживают их широкое использование для оптимизации процесса добычи нефти из скважин с малым дебитом.

Обоснование экономической целесообразности внедрения асинхронных электродвигателей с пониженной частотой вращения ротора на станках-качалках, осуществляющих подъём нефти из скважин с низким дебитом, приводится в работе [2]. Отмечается, в частности, что при установке на станке-качалке асинхронного электродвигателя с синхронной частотой вращения 500 об/мин на место промежуточной ременной передачи и асинхронного двигателя, имеющего синхронную частоту вращения ротора 1000 об/мин, достигаются увеличение коэффициента полезного действия электропривода и существенная экономия электрической энергии.

Применение тихоходных асинхронных двигателей малой мощности в электроприводе станков-качалок – новое направление повышения эффективности добычи нефти из малопродуктивных нефтяных скважин

Одним из направлений работ по переводу скважин с малым дебитом в непрерывный режим эксплуатации является разработка новых нетрадиционных конструкций тихоходных асинхронных электродвигателей, в частности, асинхронных электродвигателей со статором в форме дуги [8–10].

Идея применения трёхфазных асинхронных электродвигателей со статором в форме дуги для привода плунжерных насосов станков-качалок, установленных на скважинах с низким дебитом, принадлежит сотрудникам кафедры «Электротехника и электроника» Пермского государственного технического университета. В 2005 г. на станке-качалке, установ-

ленной на скважине № 292 цеха № 10 Кокуйского месторождения нефти и газа ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ», был введён в эксплуатацию опытный образец трёхфазного асинхронного электродвигателя номинальной мощностью 2,3 кВт, статор которого был выполнен в форме дуги с центральным углом 120 град. Ротор электродвигателя в рабочем режиме вращался с частотой 68 об/мин, осуществляя перемещение плунжера насоса с частотой 0,4 мин⁻¹. Электродвигатель успешно эксплуатировался в течение двух лет, обеспечивая всё это время непрерывный режим работы скважины, прирост объёма добываемой нефти в 3,3 раза и снижение расхода электрической энергии. Низкая частота вращения ротора электродвигателя способствовала уменьшению динамических нагрузок на звенья кинематической цепи, а использование непрерывного режима эксплуатации позволило увеличить срок службы сальников, размещённых на устье скважины, и продлить сроки межремонтного периода.

Успешные промышленные испытания явились основанием для проведения более глубоких исследований вопросов применения асинхронных электродвигателей со статором в форме дуги для электропривода плунжерных насосов станков-качалок скважин с низким дебитом. С этой целью в 2006 г. холдинговая компания ОАО «Привод» (г. Лысьва, Пермский край), используя результаты электромагнитных расчётов и эскизные чертежи активных частей электродвигателя, выполненные на кафедре «Электротехника и электромеханика» Пермского государственного технического университета, осуществила проектирование, разработку и изготовление трех промышленных образцов электродвигателей с дугообразной формой статора для ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ». Схема такого двигателя представлена на рис. 1, а основные параметры данных электродвигателей приведены ниже:

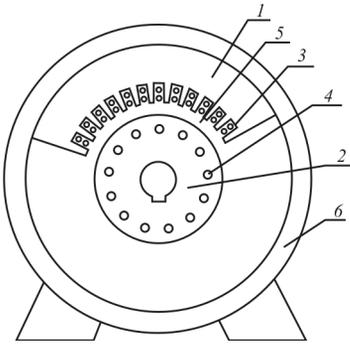


Рис. 1. Асинхронный электродвигатель с дугообразной формой статора: 1 – стальной сердечник статора; 2 – стальной сердечник ротора; 3 – обмотка статора; 4 – обмотка ротора; 5 – воздушный зазор; 6 – корпус двигателя

номинальное напряжение обмотки статора (линейное).....	380 В;
номинальная мощность.....	3 кВт;
номинальный ток.....	11 А;
частота напряжения питающей сети.....	50 Гц;
номинальная частота вращения ротора.....	190 об/мин;
номинальный момент на валу.....	150 Нм;
кратность пускового момента.....	1,4 о.е.;
кратность максимального момента.....	2,2 о.е.;
номинальный коэффициент полезного действия.....	0,73 о.е.;
номинальный коэффициент мощности.....	0,6 о.е.;
величина воздушного зазора между статором и ротором.....	0,5 мм.

Изготовленные электродвигатели были установлены на станках-качалках нефтепромыслов ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» взамен работавших ранее трёхфазных асинхронных электродвигателей номинальной мощностью 22 кВт и синхронной частотой вращения ротора 1500 об/мин.

Наблюдения за работой скважин с электроприводом плунжерных насосов от трёхфазных асинхронных двигателей с дуговой формой статоров проводились в период с 14.12.2006 по 01.07.2007 г. Анализ результатов наблюдений позволяет констатировать, что переход от циклического

режима эксплуатации скважин к непрерывному сопровождался увеличением количества добываемой нефти. В качестве примера приведём динамику изменения добычи нефти на скважине № 11 Кокуйского месторождения нефти и газа ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ».

Отбор нефти из скважины в период, предшествующий замене электропривода, составлял 0,2 м³/сут. После введения в эксплуатацию асинхронного электропривода со статором в форме дуги добыча нефти на скважине сначала возросла в 6,5 раза и достигла 1,3 м³/сут, однако через 10 дней добыча уменьшилась до величины 0,5 м³/сут и на этом уровне сохранялась на протяжении последующих 50 дней. В середине февраля добыча нефти на скважине вновь возросла до 0,8 м³/сут и на этом уровне сохранялась до окончания промысловых испытаний. Несложные подсчёты показывают, что перевод скважины № 11 Кокуйского месторождения нефти и газа ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» из циклического режима эксплуатации в непрерывный режим позволил увеличить объём добываемой нефти в среднем в 3,5 раза. К положительным результатам проведённых испытаний следует отнести также снижение расхода электрической энергии, достигнутое за счёт уменьшения номинальной мощности электродвигателей в 7,3 раза и эксплуатации электродвигателей в режиме, характеризующемся оптимальными значениями коэффициента загрузки и коэффициента полезного действия.

Одной из проблем, с которой приходится сталкиваться при проектировании электрических двигателей с низкой частотой вращения вала ротора, является обеспечение приемлемых массогабаритных показателей. Проблемой является то, что для получения низкой синхронной частоты вращения вала ротора при частоте напряжения питающей сети 50 Гц на статоре электродвигателей приходится укладывать трёхфазные обмотки с большим количеством пар полюсов. Это непосредственно следует из формулы

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

где n_0 – синхронная частота вращения вала электродвигателя, об/мин; f – частота напряжения, Гц; p – количество пар полюсов обмотки статора, о.е.

Так, например, синхронная частота вращения вала электродвигателя 200 об/мин достигается при размещении на статоре трёхфазной обмотки с числом пар полюсов, равным 15. Для получения синхронной частоты вращения вала электродвигателя 150 об/мин необходимое количество пар полюсов обмотки статора составляет 20.

От количества полюсов трёхфазной обмотки статора зависит диаметр внутренней его расточки, значение которого определяется по формуле

$$D_{в.с} = \frac{2p\tau}{\pi},$$

где $D_{в.с}$ – внутренний диаметр статора, м; τ – полюсное деление статора, равное ширине катушек, образующих обмотку статора, м.

В частности, если длина полюсного деления τ равна 0,1 м, а количество пар полюсов обмотки статора p равно 15, то в соответствии с приведённой формулой диаметр внутренней расточки статора электродвигателя будет составлять 0,995 м. Если количество пар полюсов p увеличить до 20, то при той же длине полюсного деления обмотки статора τ $D_{в.с} = 1,274$ м.

Большая величина диаметра внутренней расточки статора приводит к необходимости уменьшения его длины, так как мощность электродвигателя зависит от произведения параметров $D_{в.с}^2 \cdot l$, где l – длина двигателя. Стальной сердечник статора электродвигателя конструктивно приобретает форму кольца. Катушки обмотки статора будут иметь малую длину актив-

ных сторон, создающих электромагнитный момент, и большую длину лобовых частей, не принимающих участия в создании электромагнитного момента. Последствиями изложенного являются уменьшение величины коэффициента полезного действия двигателя и увеличенный расход провода, используемого для выполнения обмотки статора.

Наружный диаметр ротора электродвигателя $D_{н.р}$ отличается от диаметра внутренней расточки статора на удвоенную величину воздушного зазора между статором и ротором, который для асинхронных электродвигателей может быть принят равным 0,5 мм. Следовательно, можно записать

$$D_{н.р} \approx D_{в.с},$$

т.е. в тихоходных асинхронных электродвигателях наружный диаметр ротора также имеет большие размеры. Поэтому высота яма ротора, определяемая как разность радиуса ротора, радиуса вала ротора и высоты пазов ротора, оказывается значительной. Это приводит к тому, что магнитная индукция в яме ротора оказывается многократно заниженной по сравнению с допустимыми для стали яма значениями. В результате плохого использования стали яма, получившего в технической литературе название «скрытый отход электротехнической стали» [11], возрастает расход активных материалов, что приводит к удорожанию ротора и двигателя в целом.

Отметим также, что электродвигатели с большим диаметром ротора характеризуются значительным маховым моментом, что негативно отражается на динамических режимах работы электропривода станков-качалок, в частности, при включении станков-качалок в работу.

Уменьшение диаметра внутренней расточки статора и наружного диаметра ротора, а также устранение других недостатков, присущих тихоходным электродвигателям, могут быть достигнуты за счёт сокращения

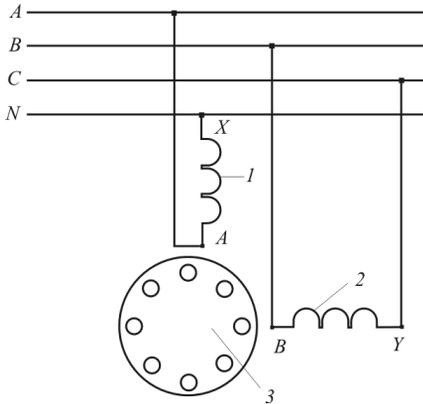


Рис. 2. Схема двухфазного асинхронного двигателя:
1, 2 – обмотки статора; 3 – ротор

с 3 до 2 количества фазных обмоток, уложенных в пазах статора [12]. В этом случае внутренний диаметр статора и наружный диаметр ротора уменьшаются в 1,5 раза. Однако для получения той же мощности электродвигателя, что и у трёхфазного, необходимо увеличить длину электродвигателя для того, чтобы сохранить на неизменном уровне величину произведения $D_{в.с}^2 l$. Следовательно, переходом от трёхфазного электродвигателя к двухфазному достигается перераспределение линейных размеров двигателей: уменьшается их диаметр и увеличивается длина.

Схема двухфазного тихоходного электродвигателя для привода плунжерных насосов станков-качалок, осуществляющих подъём нефти из скважин с низким дебитом, приведена на рис. 2.

На статоре электродвигателя уложены две фазные обмотки, оси которых смещены в пространстве на 90 электрических градусов. Обмотка А–Х подключается на фазное напряжение сети, а обмотка В–У – на линейное напряжение, которое сдвинуто по фазе во времени относительно напряжения на обмотке А–Х на 90 электрических градусов. Параметры обмоток статора различны и рассчитаны исходя из условия равенства магнитодвижущих сил обмоток и получения в зазоре электродвигателя кругового магнитного поля в рабочих и пусковых режимах.

Рабочие характеристики двухфазного электродвигателя аналогичны рабочим характеристикам трёхфазных асинхронных электродвигателей, причём получение таких характеристик двухфазного электродвигателя достигается без использования фазосдвигающих элементов в цепи обмоток статора, что характерно для двухфазных электродвигателей известных конструкций [13].

Разработка тихоходных электродвигателей для станков-качалок, установленных на скважинах с низким дебитом, требует решения проблемы энергосбережения [14], что непосредственно связано с обеспечением высоких значений энергетических показателей электромеханических преобразователей энергии. К таким показателям электромеханических преобразователей энергии переменного тока относятся коэффициент полезного действия (КПД) и коэффициент мощности ($\cos \varphi$).

Анализ каталожных и справочных данных на асинхронные электродвигатели различных серий показывает, что по мере увеличения количества пар полюсов обмотки статора и уменьшения синхронной частоты вращения ротора энергетические показатели асинхронных преобразователей энергии снижаются. Это наглядно проиллюстрировано на рис. 3, 4, на которых изображены зависимости КПД и $\cos \varphi$ от числа пар полюсов обмоток статоров электродвигателей с номинальной мощностью 30 и 5,5 кВт, устанавливаемых на станках-качалках типа СКД8–3–4000 и СКД3–1,5–710.

Приведённые на рис. 3, 4 графики также позволяют констатировать, что у двигателей с одинаковым количеством пар полюсов обмоток статоров значения энергетических показателей различны: их величины уменьшаются с уменьшением номинальной мощности электродвигателей. Следует также принимать во внимание имеющую место тенденцию к снижению численных величин энергетических пока-

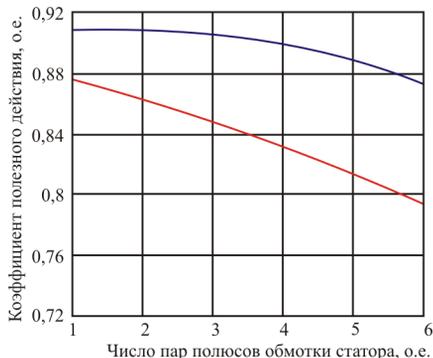


Рис. 3. Зависимости КПД от числа пар полюсов двигателя: — $P_{2ном} = 30$ кВт; — $P_{2ном} = 5,5$ кВт

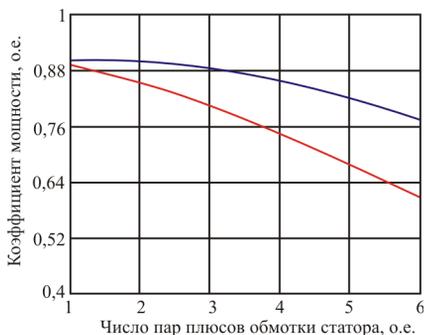


Рис. 4. Зависимости $\cos \varphi$ от числа пар полюсов двигателя: — $P_{2ном} = 30$ кВт; — $P_{2ном} = 5,5$ кВт

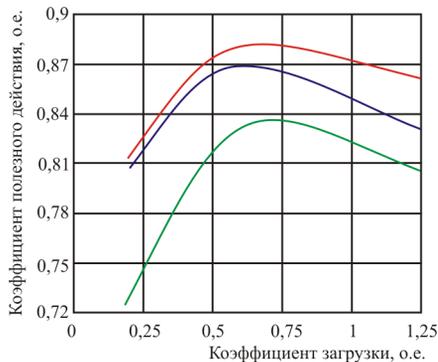


Рис. 5. Зависимости КПД от коэффициента загрузки двигателя: — $n_0 = 1500$ об/мин; — $n_0 = 1000$ об/мин; — $n_0 = 750$ об/мин

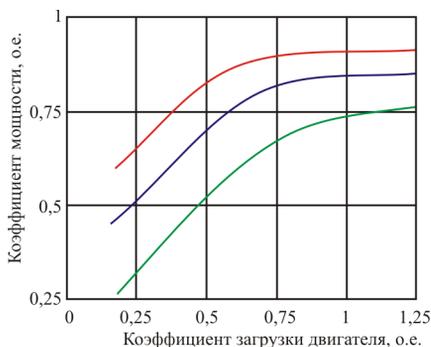


Рис. 6. Зависимости $\cos \varphi$ от коэффициента загрузки двигателя: — $n_0 = 1500$ об/мин; — $n_0 = 1000$ об/мин; — $n_0 = 750$ об/мин

зателей асинхронных преобразователей энергии по мере ухудшения использования их номинальной мощности (рис. 5, 6).

Этот факт приобретает особую значимость для электродвигателей станков-качалок, номинальная мощность которых при работе используется в среднем на 17 % [15].

Направления работ по повышению коэффициента полезного действия асинхронных преобразователей энергии известны [16–18] и сводятся к следующему:

- снижение электромагнитных нагрузок;
- использование при изготовлении стальных сердечников статора и ротора более тонкой и высококачественной электротехнической стали;

– применение в качестве материала обмоток статоров и роторов меди вместо алюминия;

– уменьшение воздушного зазора между статором и ротором за счёт совершенствования технологического оборудования и технологии производства.

Использование высокоэффективных асинхронных электродвигателей в электроприводе станков-качалок – важнейшее направление энергосбережения в нефтяной отрасли

Практическое решение задачи повышения КПД электромеханических преобразователей энергии потребовало принятия законодательных актов в этом направлении. Так, в США в 1992 г. был принят за-

конодательный акт ЕРАСТ (Energy Policy Act), установивший минимальный уровень КПД трёхфазных асинхронных электродвигателей общего применения мощностью 0,75–150 кВт. В Канаде и Германии приняты стандарты, аналогичные ЕРАСТ. В Европейском союзе существует проект «Энергосбережение в электроприводе», в соответствии с которым с фирмами-изготовителями электрических машин заключено соглашение о переходе с 2000 г. на классификацию электродвигателей по 3 уровням КПД: EFF3 – нормальный, EFF2 – повышенный, EFF1 – высокий. Исследовательский центр Европейского союза в августе 2005 г. организовал в Швеции конференцию по энергетической эффективности систем электроприводов, на которой было принято решение по ужесточению требований к КПД электрических машин и введению с 2010 г. четырёх категорий энергетически эффективных электродвигателей: D – минимальный уровень стандартного электродвигателя, соответствующий уровню EFF1, C – хороший электродвигатель 2005 г., соответствующий по энергетической эффективности требованиям ЕРАСТ, B – лучший электродвигатель 2005 г., соответствующий по КПД NEMA Premium, A – лучший электродвигатель 2010 г. с потерями на 20 % ниже, чем у электродвигателей категории B.

Асинхронные электрические двигатели с повышенными значениями КПД выпускаются фирмами США, Англии, Германии, Бразилии, Украины. В информации ряда фирм, посвященной опыту проектирования и эксплуатации электродвигателей, встречаются данные по расходу меди и электротехнической стали при их производстве. Так, при производстве асинхронных электродвигателей, значения КПД которых отвечают уровню EFF1, расход меди и электротехнической стали на 15–30 % больше, чем при производстве асинхронных двигателей с КПД, значения которых соответствуют уровню EFF2. Дальнейший рост величины коэффициента полезного действия асинхронных электрических дви-

гателей на 1 %, становится возможным за счёт увеличения расхода меди и электротехнической стали на 3–6 %. Отметим также, что увеличение расхода активных материалов влечёт за собой повышение маховых масс двигателей и ухудшение динамических показателей работы электропривода.

Издержки, связанные с увеличением КПД асинхронных электродвигателей, компенсируются снижением электрических потерь в электродвигателях и элементах систем электроснабжения. Исследования показывают, что применение асинхронных электродвигателей с повышенными значениями КПД на практике становится экономически оправданным, если двигатель находится в работе не менее 80 часов в неделю.

Процесс преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию в асинхронных электродвигателях осуществляется за счёт вращающегося магнитного поля, возбуждаемого токами, проходящими по обмоткам статоров. Для создания в асинхронных электродвигателях вращающегося магнитного поля из питающей сети ими потребляется реактивный намагничивающий ток. Показателем, характеризующим влияние реактивного намагничивающего тока на работу асинхронных двигателей, является коэффициент мощности, от величины которого зависят габариты и стоимость двигателей: с увеличением коэффициента мощности габариты и стоимость электродвигателей уменьшаются и наоборот.

Реактивный намагничивающий ток вырабатывается синхронными генераторами электрических станций. Его прохождение по токоведущим частям элементов систем электроснабжения обуславливает потери электрической энергии и напряжения, что негативно отражается на качестве электрической энергии, энергетических показателях систем электроснабжения, рабочих характеристиках приёмников электрической энергии, включая электродвигатели

станков-качалок. Следовательно, низкие значения коэффициента мощности электродвигателей станков-качалок негативно отражаются не только на габаритах и стоимости самих электродвигателей, но и на показателях качества электрической энергии в системах электроснабжения, их энергетических показателях, рабочих характеристиках потребителей электрической энергии, подключённых к данной системе электроснабжения.

Для уменьшения реактивного намагничивающего тока в элементах систем электроснабжения, принадлежащих генерирующим и сетевым компаниям, в распределительных устройствах напряжением 6–10 кВ главных понизительных подстанциях нефтедобывающих предприятий устанавливаются батареи статических конденсаторов. С помощью этих же батарей статических конденсаторов осуществляется компенсация реактивного намагничивающего тока трансформаторов, установленных на главных понизительных подстанциях и принадлежащих, как правило, нефтедобывающим предприятиям. Однако распределительные электрические сети нефтедобывающих предприятий напряжением 6–10 кВ, сети низкого напряжения, высоковольтные и низковольтные потребители электрической энергии, в том числе и электродвигатели станков-качалок, от реактивного намагничивающего тока при этом не разгружаются.

Заключение

Разработка асинхронных электродвигателей с низкой частотой вращения ротора для электропривода станков-качалок скважин с низким дебитом требует новых конструктивных решений, способствующих снижению потребления

реактивного намагничивающего тока. К таким решениям относятся асинхронные электрические двигатели с внутренней компенсацией реактивного намагничивающего тока [19–21]. При этом в работе [19] уменьшение потребления реактивного намагничивающего тока достигается использованием дополнительных элементов, а в работах [20, 21] предлагаются варианты без их применения. Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные авторами указанных выше работ, позволили установить, что такие электродвигатели реактивный намагничивающий ток из питающей сети трёхфазного переменного напряжения практически не потребляют. Работа двигателей осуществляется с коэффициентом мощности, значение которого близко к единице, и данная его величина сохраняется не только в рабочих режимах работы, но и в режиме холостого хода и при перегрузках.

Серийное производство асинхронных электрических двигателей с внутренней компенсацией реактивного намагничивающего тока и последующее их внедрение на нефтепромыслах позволяют осуществить разгрузку по току токоведущих элементов систем производства, передачи, распределения и преобразования электрической энергии. Следовательно, в выпуске электродвигателей с внутренней компенсацией реактивного намагничивающего тока заинтересованы не только нефтедобывающие компании, являющиеся потребителями электрической энергии, но и генерирующие и сетевые компании, соответственно вырабатывающие электрическую энергию и осуществляющие её поставку потребителям.

Список литературы

1. Архипов К.И., Попов В.И., Попов И.В. Справочник по станкам-качалкам: монография. – Альметьевск, 2000. – С. 52–58.
2. Чаронов В.Я. Экономичные электроприводы для станков-качалок малodeбитных скважин // Нефтяное хозяйство. – 1996. – № 12. – С. 46–48.
3. Каталог нефтяного оборудования, средств автоматизации, приборов и спецматериалов: в 2 т. Т. 2 / ВНИИОЭНГ. – М., 1994. – С. 17–31.

4. Composite Catalog of Oil Field Equipment and Services // Published by World Oil. – 1968–1969. – Vol 3. – P. 4218, 5012.
5. Composite Catalog of Oil Field Equipment and Services // Published by World Oil. – 1968–1969. – Vol. 2. – P. 2992–2993.
6. Скважинные насосные установки для добычи нефти / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров, В.С. Каштанов, С.С. Пекин. – М.: Нефть и газ (РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина), 2002. – С. 458–484, 695–706.
7. Регулируемый электропривод станков-качалок малodeбитных нефтяных скважин / П.Н. Цылёв [и др.] // Электрические машины и электромашинные системы: межвуз. сб. науч. тр. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 1995. – С. 161–171.
8. Привод станка-качалки для добычи нефти из низкодебитных скважин: пат. 47990 Рос. Федерация / В.К. Гладков, А.С. Ипанов, А.Д. Коротаев, В.А. Лобанов, Е.М. Огарков, П.Н. Цылёв, В.А. Чекменёв. №2005107540/22; заявл. 17.03.2005; опубл. 10.09. 2005. Бюл. № 25. – 2 с.
9. Williams F., Laithwaite E., Piggott L. Bruchless variable – speed Induction Motors // Proceedings of IEE, pt. A. – 1957. – 14. – P. 102–118.
10. Johnson W., Laithwaite E., Slater R. An experimental impact – extrusion machine driver by a linear induction motor // Proc. Instn. Mech. Engrs. – 1964–1965. – Vol. 179, pt. 1, № 1. – P. 15–35.
11. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1988. – С. 361–363.
12. Тихоходный асинхронный преобразователь энергии: пат. 2402141 Рос. Федерация / Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылёв, Е.А. Власов. № 2009141468/07; заявл. 09.11.2009; опубл. 20.10.2010. Бюл. № 29. – 9 с.
13. Вольдек А.И. Электрические машины: учеб. для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергия, 1974. – С. 609–614.
14. Ергин Д. Добыча: всемирная история борьбы за нефть, деньги и власть / пер. с англ. Д. Ергина. – М.: Альпина Паблишер, 2011. – С. 860–861.
15. Валовский В.М., Валовский К.В. Цепные приводы скважинных штанговых насосов / ВНИИОЭНГ. – М., 2004. – С. 472–477.
16. Альбертьян Н.А., Безрученко В.А. Резервы повышения коэффициента полезного действия // Электро. – 2004. – № 3. – С. 44–48.
17. Перспективы разработки и производства стандартных асинхронных электродвигателей / А. Кравчик [и др.] // Электроцех. – 2006. – Август. – С. 12–18.
18. Чувашев В.А., Броди В.Я., Папазов Ю.Н. Совершенствование асинхронных двигателей малой мощности // Электротехника. – 2002. – № 10. – С. 21–26.
19. Мугалимова А.Р., Мугалимов Р.Г. Энергосберегающий электропривод нефтяного станка-качалки на основе асинхронного электродвигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электромеханические преобразователи энергии: материалы междунар. науч.-техн. конф., 20–22 октября 2005 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – С. 196–199.
20. Способ уменьшения реактивного намагничивающего тока в элементах систем электроснабжения и устройство для его осуществления: пат. 2422967 Рос. Федерация / Е.Ф. Беляев, П.Н. Цылёв. №2010119825/07; заявл. 17.05.2010; опубл. 27.06.2011. Бюл. № 18. – 11 с.
21. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылёв П.Н. Трёхфазный асинхронный электродвигатель с высоким значением коэффициента мощности // Научные исследования и инновации. – 2011. – Т. 5, № 4. – С. 64–68.

References

1. Arkhipov K.I., Popov V.I., Popov I.V. Spravochnik po stankam-kachalkam [Handbook of pumping unit]. Al'met'evsk, 2000, pp. 52–58.
2. Charonov V.Ia. Ekonomichnye elektroprivody dlia stankov-kachalok malodebitnykh skvazhin [Cost-electric pumping units for marginal wells]. *Neftianoe khoziaistvo*, 1996, no. 12, pp. 46–48.
3. Katalog neftianogo oborudovaniia, sredstv avtomatizatsii, priborov i spetsmaterialov [Products of petroleum equipment, automation equipment, instruments, and special materials]. Moscow: VNIIOENG, 1994, pp. 17–31.
4. Composite Catalog of Oil Field Equipment and Services. Published by World Oil, 1968–69, Vol 3, p. 4218, 5012.
5. Composite Catalog of Oil Field Equipment and Services. Published by World Oil, 1968–69, Vol 2, pp. 2992–2993.
6. Ivanovskii V.N., Darishchev V.I., Sabirov A.A., Kashtanov V.S., Pekin S.S. Skvazhinnye nasosnye ustanovki dlia dobychi nefti [Downhole pumping systems for oil]. *Neft' i gaz (RGU nefti i gaza im. I.M. Gubkina)*, 2002, pp. 458–484, 695–706.

7. Tsypliov P.N. et al. Reguliruemiy elektropriwod stankov-kachalok malodebitnykh neftianykh skvazhin [Adjustable electric pumping units stripper oil wells]. *Mezhvuz. sb. nauch. trudov "Elektricheskie mashiny i elektromashinnye sistemy"*, Perm, 1995, pp. 161–171.

8. Gladkov V.K., Ipanov A.S., Korotaev A.D., Lobanov V.A., Ogarkov E.M., Tsyliov P.N., Chekmeniov V.A. Privod stanka-kachalki dlia dobychi nefti iz nizkodebitnykh skvazhin [The drive pumping unit for the extraction of oil from low debit wells]. pat.47990 Ros. Federatsiia. №2005107540/22; zaiavl. 17.03.2005; opubl. 10.09. 2005. Biul. № 25. 2 s.

9. Williams F., Laithwaite E., Piggott L. Bruchless variable – speed Induction Motors. *Proceedings of IEE, pt. A*, 1957, 14, pp. 102–118.

10. Johnson W., Laithwaite E., Slater R. An experimental impact – extrusion machine driver by a linear induction motor. *Proc. Instn. Mech. Engrs*, 1964–65, Vol. 179, pt. 1. no. 1, pp. 15–35.

11. Iuferov F.M. Elektricheskie mashiny avtomaticheskikh ustroystv [Electrical machinery automation devices]. Moscow: Vysshaya shkola, 1988, pp. 361–363.

12. Beliaev E.F., Tsyliov P.N., Vlasov E.A.. Tikhokhodnyy asinkhronnyy preobrazovatel' energii [Low-speed asynchronous transmitter power]. pat. 2402141 Ros. Federatsiia. № 2009141468/07; zaiavl. 09.11.2009; opubl. 20.10.2010. Biul. no. 2. 9 s.

13. Vol'dek A.I. Elektricheskie mashiny [Electric machines]. Leningrad: Energiia, 1974, pp. 609–614.

14. Ergin D. Dobycha: Vsemirnaia istoriia bor'by za neft', deng'i i vlast': per. s angl. Daniela Ergina [Production: World history of the struggle for oil, money and power]. Moscow: Al'pina Publisher, 2011, pp. 860–861.

15. Valovskii V.M., Valovskii K.V. Tsepnye privody skvazhinnykh shtangovykh nasosov [Chain drives downhole sucker rod pump]. Moscow: VNIIOENG, 2004, pp. 472–477.

16. Al'bert'ian N.A., Bezruchenko V.A. Rezervy povysheniia koefitsienta poleznogo deystviia [Provisions for increasing the efficiency]. *Elektro*, 2004, no. 3, pp. 44–48.

17. Kravchik A. et al. Perspektivy razrabotki i proizvodstva standartnykh asinkhronnykh elektrodvigatelei [Prospects for the development and manufacture of standard induction motors]. *Elektrotekh*, 2006, august, pp. 12–18.

18. Chuvashv V.A., Brodi V.I.a., Papazov Iu.N. Sovershenstvovanie asinkhronnykh dvigatelei maloi moshchnosti [Improvement of low-power induction motors]. *Elektrotehnika*, 2002, no. 10, pp. 21–26.

19. Mugalimova A.R., Mugalimov R.G. Energoberegaiushchii elektropriwod neftianogo stanka – kachalki na osnove asinkhronnogo elektrodvigatelea s individual'noi kompensatsiei reaktivnoi moshchnosti [Energy-saving electric stankakachalki petroleum-based induction motor with the individual compensation of reactive power]. *Materialy mezhdunarod. nauch.-tekhn. konf "Elektromekhanicheskie preobrazovateli energii"*, Tomsk, 2005, pp. 196–199.

20. Beliaev E.F., Tsyliov P.N. Sposob umen'sheniia reaktivnogo namagnichivaiushchego toka v elementakh sistem elektrosnabzheniia i ustroystvo dlia ego osushchestvleniia [Way to reduce the reactive magnetizing current in the elements of power systems and apparatus for its implementation]: pat. 2422967 Ros. Federatsiia №2010119825/07; zaiavl. 17.05.2010; opubl. 27.06.2011. Biul. №18. 11 s.

21. Beliaev E.F., Tashkinov A.A., Tsyliov P.N. Triokhfaznyy asinkhronnyy elektrodvigel' s vysokim znacheniem koefitsienta moshchnosti [Three-phase asynchronous motor with a high power factor]. *Nauchnye issledovaniia i innovatsii*, 2011, Vol. 5, no. 4, pp. 64–68.

Об авторах

Беляев Евгений Фролович (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: shulakov@pstu.ru).

Ташкинов Анатолий Александрович (Пермь, Россия) – доктор физико-математических наук, профессор, ректор Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: tash@pstu.ru).

Цылев Павел Николаевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, г. Пермь, Комсомольский просп., 29; e-mail: shulakov@pstu.ru).

About the authors

Beliaev Evgeniy F. (Perm, Russia) – doctor of science, professor, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: shulakov@pstu.ru).

Tashkinov Anatoliy A. (Perm, Russia) – doctor of science, professor, rector, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: tash@pstu.ru).

Tsyliov Pavel N. (Perm, Russia) – candidate of science, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky ave., 29; e-mail: shulakov@pstu.ru).

Получено 4.05.2012