



ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА СТАНКА-КАЧАЛКИ

Р.Ф. Ярыш¹, А.Р. Гарифуллина², Р.И. Гарифуллин³, А.Н. Якунин²

¹Казанский государственный энергетический университет

²Альметьевский государственный нефтяной институт

³Инженерный центр ПАО «Татнефть»

ar.garifullina@yandex.ru

Резюме: Проанализированы режимы работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки с использованием динамограмм, ваттметрграмм и математической модели станка-качалки, определено влияние формы динамограммы на режим работы электродвигателя станка-качалки. Выполнено сравнение способов защиты вентиля в составе преобразователя частоты от повышения напряжения при переходе двигателя в генераторный режим.

Ключевые слова: станок-качалка, преобразователь частоты, асинхронный двигатель, генераторный режим, тормозной резистор, функция предотвращения рекуперации.

DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.

Для цитирования: Ярыш Р.Ф., Гарифуллина А.Р., Гарифуллин Р.И., Якунин А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 56-64. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.

INVESTIGATION OF OPERATING MODES OF FREQUENCY-REGULATED ELECTRIC DRIVE OF PUMPJACK

R.F. Yarish¹, A.R. Garifullina², R.I. Garifullin³, A.N. Yakunin²

¹Kazan State Power Engineering University,

²Almetyevsk State Oil Institute,

³Engineering center of PJSC «Tatneft»

Abstract: The analysis of the operating modes of the frequency-controlled electric drive of the pumpjack with the use of dynamometer cards, wattmeter diagrams and the mathematical model of the pump-jack, the effect of the shape of the dynamometer card on the operating mode of the electric motor of the pumpjack is determined. The ways of protection of the transistors in the frequency converter from voltage increase are considered at the transition of the electric motor to the regeneration.

Key words: pumpjack, frequency converter, induction motor, power regeneration, braking resistor, regeneration avoidance function.

For citation: R.F. Yarish, A.R. Garifullina, R.I. Garifullin, A.N. Yakunin. Investigation of operating modes of frequency-regulated electric drive of pumpjack. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS 2018. vol. 20. № 11-12. pp. 56-64. DOI:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.

На нефтяных месторождениях в поздней стадии эксплуатации существуют проблемы изменения забойных давлений в скважинах из-за циклической (сезонной) закачки воды в целях поддержания пластового давления. Это требует изменения параметров наземного привода (числа качаний) установки штангового глубинного насоса (УШГН). Число качаний УШГН изменяют:

- заменой шкива на двигателе;
- заменой двигателя на двигатель с иной скоростью вращения;
- изменением частоты напряжения на статоре двигателя с помощью преобразователя частоты (ПЧ).

Замена шкивов требует выезда ремонтной бригады, что в зимних условиях связано с расчисткой дороги и, как следствие, высокими эксплуатационными расходами. Замена двигателя связана со значительными капитальными вложениями и эксплуатационными расходами.

Наиболее приемлемым способом изменения числа качаний является применение частотного регулирования электропривода УШГН, которое может осуществляться переносным или стационарным преобразователем частоты [1]. Изменение параметров наземного привода с помощью переносных, так называемых «реанимационных», ПЧ не позволяет предприятию избежать финансовых потерь, связанных с простоем скважины во время перенастройки привода, затратами на обеспечение подъездных путей и затратами на подключение ПЧ.

В связи с этим целесообразно внедрение на таких «проблемных» скважинах стационарных ПЧ в составе станции управления УШГН.

Большинство УШГН приводится в действие наземным приводом в виде станка-качалки (СК). Станок-качалка – установка добычи нефти, сочетающая в себе свойства насосной установки и подъемного механизма. Практика внедрения ПЧ показала, что применение ПЧ на подъемных механизмах связано с проблемой возникновения генераторного режима, который обычно возникает при спуске груза.

Для анализа режимов работы электропривода СК рассмотрена кинематическая схема СК (рис. 1), по которой составлена математическая модель механической части СК.

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $P_{СКВ}$ – сила, действующая в точке подвеса штанг (ТПШ) со стороны скважины; $P_{ГР}$ – сила веса грузов; $F_{Ш}$ – усилие в шатуне; $F_{СКВ}$ – тангенциальная составляющая силы, действующей на кривошип со стороны скважины; $F_{ГР}$ – тангенциальная составляющая силы веса грузов; $r_{БЛ1}$ – переднее плечо балансира; $r_{БЛ2}$ – заднее плечо балансира; $r_{кр}$ – радиус кривошипа; $r_{ГР}$ – радиус центра тяжести расположения противовесов на кривошипах; $B(x_B, y_B)$ – точка сочленения шатуна с балансиром и её координаты в плоскости $x-y$, начало координат которой совмещено с осью кривошипа; $K(x_K, y_K)$ – точка сочленения шатуна с кривошипом и её координаты.

Кинематическая схема СК включает кривошипно-шатунный механизм, преобразующий вращательное движение электродвигателя в возвратно-поступательное движение колонны штанг с плунжерным насосом. При ходе плунжера вверх в ТПШ к балансиру 1 прикладывается сила $P_{СКВ}$, обусловленная, в основном, весом штанг и столба жидкости. Эта сила посредством шатуна 2 передается на кривошип 3 и создаёт момент сопротивления, который преодолевается электродвигателем 5.

Углы α , δ , θ находятся с помощью координат характерных точек кинематической схемы СК, определяемых при решении обратной задачи кинематики для кинематической схемы СК [4, 5].

Характер изменения нагрузки в ТПШ описывается с помощью динамограммы, которая представляет собой графическую зависимость нагрузки, действующей в ТПШ в течение насосного цикла, в функции координаты этой точки относительно самого нижнего её положения за цикл качания. Динамограмма образует замкнутую фигуру, размеры которой зависят от действующих усилий и длины хода полированного штока. При нормальной работе насоса динамограмма имеет форму параллелограмма [3, 6].

С целью определения влияния формы динамограммы на режим работы электродвигателя СК исследовано несколько «проблемных» скважин на различных нефтяных месторождениях Татарстана методом динамометрирования.

На рис. 2 показаны практические динамограммы двух разных скважин, оборудованных СК типа СК8-3,5-4000 с длиной хода 3,5 м. Верхняя ветвь динамограммы образуется при подъеме штанг, нижняя ветвь – при спуске. Эти практические динамограммы явились входными данными для математического моделирования режимов работы электропривода СК. На рис. 3 показаны соответствующие динамограммам кривые моментов сопротивления на валу двигателя в функции перемещения ТПШ за цикл, полученные математическим моделированием механической части СК.

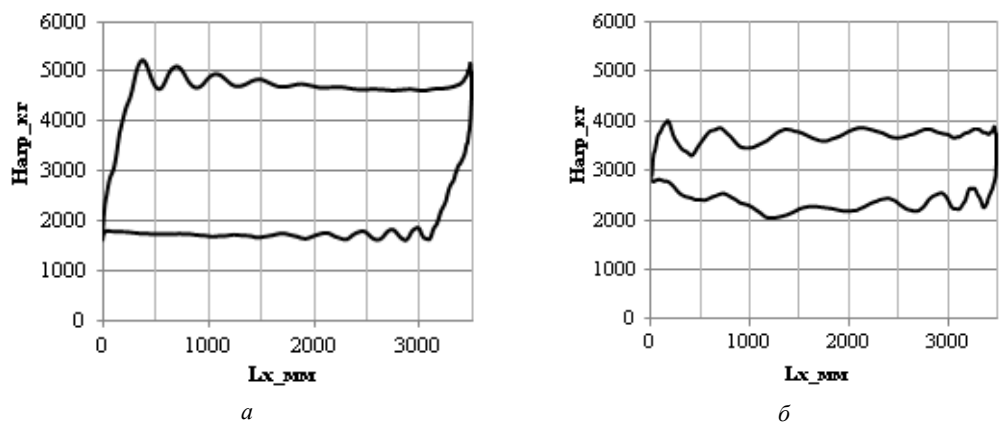


Рис. 2. Динамограммы нагрузок в ТПШ

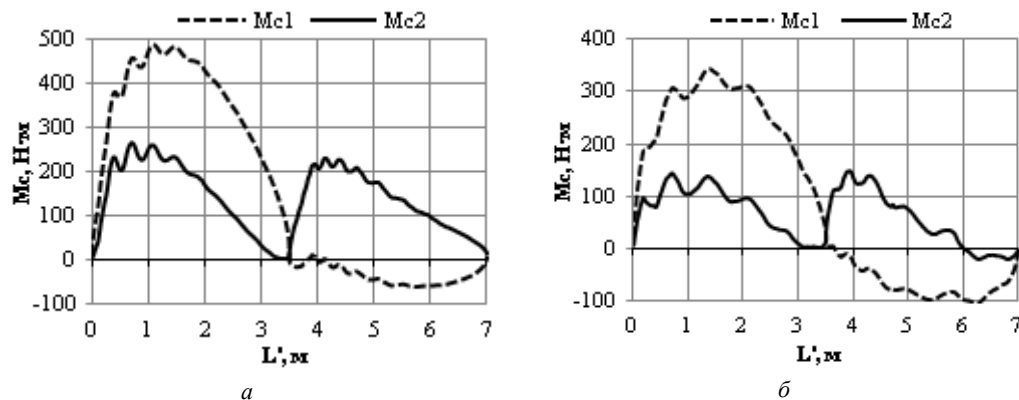


Рис. 3. Кривые момента на кривошипе

На рис. 3 пунктиром (M_{c1}) показаны кривые моментов, полученные при минимальном весе уравнивающего груза, сплошными линиями (M_{c2}) показаны кривые моментов при уравнивании, близком к полному.

Кривая момента сопротивления M_c на валу двигателя имеет такую же форму, как момент на кривошипе, отличаясь лишь масштабом за счет передаточного числа и КПД механической передачи (редуктора и ременной передачи):

$$M_c = \frac{M_{кр}}{i_{ред}i_{рем}\eta_{ред}\eta_{рем}} + M_{тр} \quad \text{— при положительном моменте на кривошипе,}$$

$$M_c = \frac{M_{кр}\eta_{ред}\eta_{рем}}{i_{ред}i_{рем}} + M_{тр} \quad \text{— при отрицательном моменте на кривошипе,}$$

где $M_{тр}$ — момент трогания (момент сухого трения) [7]; $i_{ред}$ — передаточное число редуктора;

$$i_{рем} = \frac{d_{шк.ред}}{d_{шк.рем}} \quad \text{— передаточное число ременной передачи; } d_{шк.ред}, d_{шк.дв} \text{ — диаметры}$$

шкивов редуктора и двигателя; $\eta_{ред}, \eta_{рем}$ — КПД редуктора и ременной передачи.

По кривой момента на валу двигателя можно судить о режиме его работы. Положительный момент свидетельствует о двигательном режиме, а отрицательный — о генераторном режиме работы. Как видно из рис. 2 и 3, на возникновение генераторного режима электродвигателя СК влияют уравнишенность СК и высота динамограммы.

Неуравновешенность СК (слишком малый вес груза) является причиной перехода двигателя в генераторный режим при любой нормальной динамограмме. В то же время полное или близкое к полному уравнивание не исключает возможности генераторного режима. Если динамограмма достаточно высокая, т.е. при существенной разнице между максимальной и минимальной нагрузками в ТПШ, как на рис. 2, а, уравнивание позволяет избежать генераторного режима (линия M_{c2} на рис. 3, а). Если разница между максимальной и минимальной нагрузками невелика, динамограмма имеет малую высоту (рис. 2, б), и даже при полном уравнивании генераторный режим будет иметь место в конце подъема или в конце спуска штанг (на рис. 3, б линия M_{c2} на интервале от 6 до 7 м — в конце спуска).

В генераторном режиме электрическая машина вырабатывает электрическую энергию. Обычные преобразователи частоты не могут передавать вырабатываемую электрической машиной энергию в сеть, так как не имеют в своей схеме инвертирующего звена, которое могло бы провести поток энергии из цепи постоянного тока ПЧ в трехфазную сеть (рис. 4). При переходе электродвигателя в генераторный режим вырабатываемая им энергия накапливается в виде высокого потенциала на шинах постоянного тока ПЧ, что может привести к пробоем полупроводниковых вентилях и выходу ПЧ из строя.

Для исключения возможности повышения напряжения применяют два способа [8]:

- 1) включение тормозного резистора к шинам постоянного напряжения ПЧ;
- 2) программная подстройка частоты.

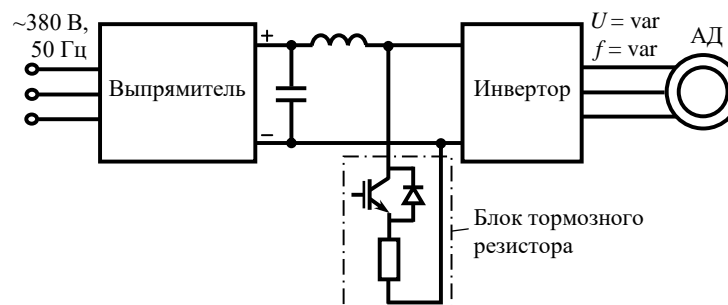


Рис. 4. Схема преобразователя частоты

В схеме с тормозным резистором при превышении заданного значения напряжения на шинах постоянного тока транзистор блока тормозного резистора открывается и позволяет провести через резистор обратный ток электродвигателя, вся вырабатываемая энергия рассеивается в виде тепла на тормозном резисторе.

Программная подстройка частоты – при возникновении обратного тока ПЧ повышает выходную частоту так, чтобы скорость вращения магнитного поля машины стала чуть больше скорости вращения ротора. Таким способом не допускается переход электродвигателя в генераторный режим. В каталоге фирмы *Mitsubishi Electric* [8], которая является одним из флагманов в производстве ПЧ, такая подстройка частоты называется функцией предотвращения рекуперации (ФПР). *Mitsubishi Electric* предлагает использовать эту функцию для механизмов с переменным моментом, таких как вентиляторы, насосы, воздуходувки.

Недостатками первого способа являются дороговизна и большие габариты тормозного резистора. При большой мощности торможения для него приходится устанавливать отдельный шкаф. Кроме того, наличие тормозного резистора приводит к увеличению потребления электроэнергии. Второй способ не требует дополнительных вложений.

Существуют также рекуперирующие ПЧ, имеющие в своем составе дополнительный инвертирующий комплект вентиля [8, 9]. Однако в настоящее время такие ПЧ весьма дороги, их стоимость в несколько раз превышает стоимость обычных нерекуперирующих ПЧ.

Исследование с помощью ваттметрграмм СК «проблемных» скважин позволило выявить, в каких режимах в действительности работают электродвигатели СК. На рис. 5 показаны ваттметрграммы работы СК от ПЧ с тормозным резистором и от ПЧ с ФПР за два цикла качания. Двигательному режиму работы соответствуют положительные значения мощности, генераторному – отрицательные. В данном случае генераторный режим электродвигателя возникает в конце хода вниз. Наличие тормозного резистора обеспечивает двигателю свободный переход от двигательного режима к генераторному и обратно. При включении ФПР возникновение генераторного режима исключается, вместо этого двигатель работает в режиме, близком к холостому ходу. ФПР приводит к уменьшению длительности цикла качания, в данном случае приблизительно на 1 с.

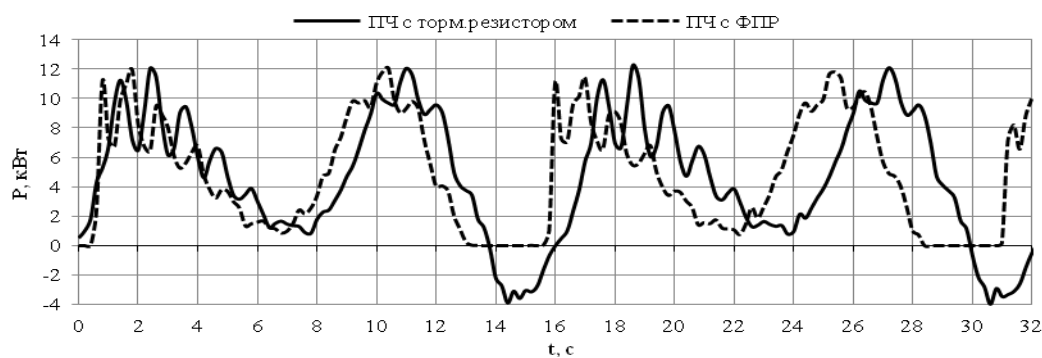
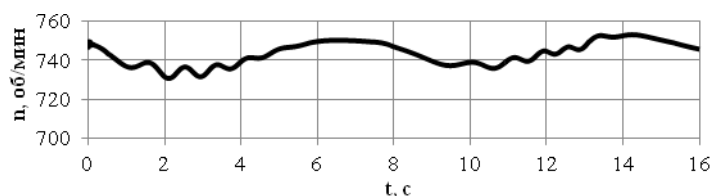
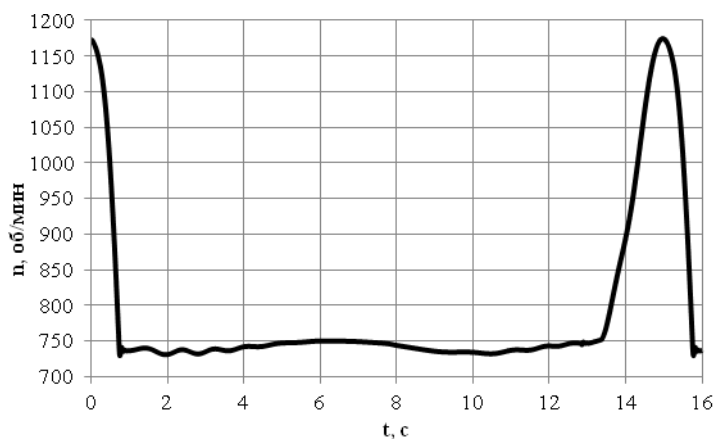


Рис. 5. Ваттметрgramмы работы СК

Если в генераторном режиме электромагнитный момент машины оказывает на ротор тормозящее действие, то в режиме работы с ФПР электромагнитный момент близок к нулю, но остается вращающим. Таким образом, в конце хода штока вниз, когда происходит торможение колонны штанг, ставший отрицательным момент сопротивления и электромагнитный момент разгоняют двигатель. Это приводит к более резкому торможению, а затем, в начале хода вверх, к такому же резкому ускорению колонны штанг, возникают динамические удары в конструкции СК. Математическое моделирование электромагнитных и механических процессов, происходящих в электроприводе СК, показало, что скорость ротора при включении ФПР на мгновение может достигать значения 1170 об/мин, при том что номинальная скорость двигателя 720 об/мин (рис. 6, б). Такие резкие ускорения двигателя приводят к появлению дополнительных инерционных усилий во всех элементах СК [10].



а



б

Рис. 6. График изменения скорости электродвигателя СК за цикл качания:
а – при работе от ПЧ с тормозным резистором; б – при работе от ПЧ с ФПР

Выводы

1. Приводные электродвигатели СК работают с периодически изменяющимся моментом на валу, при определенных условиях переходя в генераторный режим; на режим работы электродвигателя влияют уравнишенность СК и амплитуда нагрузок в ТПШ (высота динамограммы).

2. ФПР имеет существенные недостатки при использовании на СК со знакопеременной нагрузочной диаграммой: во-первых, уменьшение длительности цикла, что делает невозможным обеспечение требуемого по расчету числа качаний СК; во-вторых, увеличение инерционных усилий во всех элементах СК, приводящее к уменьшению временного ресурса работы оборудования.

3. ПЧ с тормозным резистором делает возможным рекуперативное торможение, благодаря чему обеспечиваются практически равномерное вращение двигателя на протяжении всего цикла качания (рис. 6, а), и, соответственно, более благоприятные режимы эксплуатации оборудования.

4. ПЧ без тормозных резисторов с ФПР можно использовать только на СК, не подверженных периодическому воздействию знакопеременных моментов на двигателе; ФПР может применяться во избежание отключения СК при внезапных скачках нагрузки на штоке, однако длительная работа СК с периодическим включением этой функции нежелательна.

Литература

1. К вопросу оптимизации закона движения выходного звена привода скважинной штанговой насосной установки / В.Н. Ивановский, Н.В. Садчиков, С.К. Улюмджиев // Территория Нефтегаз. 2012. № 5. С. 86–91.
2. Архипов К.И., Попов В.И., Попов И.В. Справочник по станкам-качалкам. Альметьевск: Отдел оперативной полиграфии управления «ТатАСУнефть» АО «Татнефть», 2000 146 с.
3. Gabor Takacs. Sucker-Rod Pumping Handbook. 1st Edition. Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.
4. Теория механизмов и механика машин :Учебник (8-е издание). / Под ред. Г.А. Тимофеева. Москва: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. 568 с.
5. Сакаев А.Ф. Системы и алгоритмы энергосберегающего управления частотно-регулируемыми электроприводами штанговых скважинных насосных установок. Дис. ... канд. техн. наук. Санкт-Петербург, 2009.
6. Адонин А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами. М.: Недра, 1979. 213 с.
7. Воронин С.Г. Электропривод летательных аппаратов: Учебно-методический комплекс. Offline версия 1.0. Челябинск, 1995-2011. файлов 489, ил.
8. Mitsubishi Electric. Семейство FR. Преобразователи частоты. Интеллектуальная техника приводов. Москва, 2014.
9. Сравнительный анализ динамических показателей разомкнутой и замкнутой систем электропривода станка-качалки / О.А. Лысова, В.П. Фрайштетер // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2014. № 8. С. 93–97.
10. Некоторые особенности динамического взаимодействия штанговой колонны и станка-качалки как однорядного кривошипно-шатунного механизма / И.Е. Ишемгузин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. 2014. № 1. С. 16–20.

Авторы публикации

Ярыш Равия Фоатовна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Релейная защита и автоматизация электроэнергетических систем» (РЗА) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Гарифуллина Алсу Радиковна – канд. техн. наук, доцент кафедры «Автоматизация и информационные технологии» Альметьевского государственного нефтяного института.

Гарифуллин Роберт Иршатович – начальник отдела оптимизации энергоресурсов и сырья Инженерного центра ПАО «Татнефть».

Якунин Анатолий Николаевич – старший преподаватель кафедры «Электро- и теплоэнергетика» Альметьевского государственного нефтяного института.

References

1. On the optimization of the law of motion of the output link of the drive of a downhole rod pump installation / V.N. Ivanovsky, N.V. Sadchikov, S.K. Ulyumdzhiyev // Territory of Neftegaz. 2012. No. 5. P. 86–91.
2. Arkhipov K.I., Popov V.I., Popov I.V. Handbook of pumpjacks. Almeteyevsk, Department of operative Polygraphy of "TatASUneft" JSC "Tatneft", 2000. 146 p.
3. Gabor Takacs. Sucker-Rod Pumping Handbook. 1st Edition. Production Engineering Fundamentals and Long-Stroke Rod Pumping. Gulf Professional Publishing, 2015. 598 p.
4. Theory of mechanisms and mechanics of machines. Textbook (8th edition). Edited by G.A. Timofeev. Moscow: Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2016. 568 p.
5. Sakaev A.F. Systems and algorithms for energy-saving control of frequency-regulated electric drives of sucker rod pumping units. Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences. St. Petersburg, 2009.
6. Adonin A.N. Extraction of petroleum by sucker-rod pumps. M.: Nedra, 1979. 213 p.
7. Voronin S.G. The electric drive of flying machines: Educational-methodical complex. Offline version 1.0. Chelyabinsk, 1995-2011. Files 489, ill.
8. Mitsubishi Electric. FR-Family. Frequency converters. Intelligent drive technology Moscow, 2014.
9. Comparative analysis of dynamic parameters of open and closed systems of the electric pumping unit / O.A. Lysova, V.P. Frayshteter // News of the Higher Institutions. Mining Journal. . 2014. № 8. P. 93–97.
10. Some specific features of dynamic interaction of a rod string and a beam-pumping unit as a single-row crank mechanism / I.E. Ishemguzhin // Equipment and technologies for oil and gas complex. 2014. № 1. P. 16–20.

Authors of the publication

Raviya F. Yarish – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Department of Relay protection and automation of electric power systems, Kazan State Power Engineering University.

Alsu R. Garifullina – PhD in Engineering sciences, Associate Professor, Department of Automation and information technology, Almeteyevsk State Oil Institute.

Robert I. Garifullin – Head of the Energy Resources and Materials Optimization Department, Engineering Center of PJSC Tatneft.

Anatoly N. Yakunin – Senior Lecturer Department of Electric and heat power engineering, Almeteyevsk State Oil Institute.