

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКИХ ДЕФЕКТОВ ПО ПАРАМЕТРАМ ВАТТМЕТРОГРАММЫ ШТАНГОВЫХ СКВАЖИННЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Манахов В.А., Цветков А.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

Valeriy_Manakhov@mail.ru

Резюме: *ЦЕЛЬ.* Целью данной работы является разработка метода диагностики оборудования штанговых скважинных насосных установок (ШСНУ) в процессе эксплуатации посредством спектрального анализа сигнала массива ваттметрограммы. В качестве измерительного элемента применяется модуль ваттметрирования, инструментом для обработки сигналов служит разработанное программное обеспечение в программном комплексе MatLab. Амплитудные спектры исследуемого объекта, построенные из массива ваттметрограммы путем быстрого преобразования Фурье, в программной среде MatLab, применяются для анализа технического состояния ШСНУ.

МЕТОДЫ. Метод ваттметрирования и спектрального анализа сигнала массивов ваттметрограммы позволяет осуществлять контроль ШСНУ во время его работы. Этот метод контроля отличается высокой точностью, чувствительностью к формированию повреждений и позволяет использовать компьютерные технологии для обработки и анализа сигналов в целях диагностики устройств.

РЕЗУЛЬТАТЫ. Метод спектрального анализа раскрыт в полном объеме. Рассмотрено понятие спектра и его построения. Раскрыт метод ваттметрирования, также принцип работы и основные характеристики датчика ваттметрирования. Произведено снятие и оценка экспериментальных данных с действующей ШСНУ во время ее работы. Приведен пример ваттметрограммы и по массиву данных построен спектр. Анализ ваттметрограммы ШСНУ с осложненными условиями работы, у которой наблюдалось пенообразование, показал скачок электрической нагрузки в верхней точке положения балансира. Спектральный анализ показал рост амплитуд на определенных частотах, которые могут говорить о наличии вспенивания нефти в цилиндре насоса.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Данный метод спектрального анализа сигнала ваттметрограммы с помощью программы MatLab позволяет выявлять механико-химические дефекты ШСНУ по амплитудно-частотным характеристикам параметров ваттметрограммы.

Ключевые слова: спектр; спектральное разложение Фурье; ваттметрограмма; диагностика; штанговая скважинная насосная установка; датчик ваттметрирования; спектральный анализ; сигнал; массив; пенообразование; гистограмма; Microsoft Excel MatLab.

Для цитирования: Манахов В.А., Цветков А.Н. Спектральный анализ механических дефектов по параметрам ваттметрограммы штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2022. Т.24. № 4. С. 50-62. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-50-62.

SPECTRAL ANALYSIS OF MECHANICAL AND CHEMICAL DEFECTS BY THE PARAMETERS OF THE WATTMETROGRAM OF DRAWER DRIVE PUMPING UNIT IN THE PROCESS OF OPERATION

VA. Manakhov AN. Tsvetkov,

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

Valeriy_Manakhov@mail.ru

Abstract: *TARGET.* The purpose of this work is to develop a method for diagnosing the equipment of sucker-rod pumping units (SRPU) during operation by spectral analysis of the

wattmetergram array signal. A wattmetering module is used as a measuring element, the developed software in the MatLab software package serves as a signal processing tool. The amplitude spectra of the object under study, constructed from an array of wattmetrograms by fast Fourier transform, in the MatLab software environment, are used to analyze the technical condition of the SRPU.

METHODS. The method of wattmetering and spectral analysis of the signal of wattmetergram arrays makes it possible to control the SRPU during its operation under voltage. This control method is characterized by high accuracy, sensitivity to damage formation and allows the use of computer technologies for signal processing and analysis in order to diagnose devices.

RESULTS. The method of spectral analysis is fully disclosed. The concept of spectrum and its construction is considered. The method of wattmetry is disclosed, as well as the principle of operation and the main characteristics of the wattmetry sensor. The removal and evaluation of experimental data from the operating SRPU during its operation was carried out. A wattmetrogram is constructed and a spectrum is constructed from the signal data array. The wattmetrogram of the SRPU with complicated working conditions, in which foaming was observed, showed a jump in the electrical load at the upper point of the balancer position. Spectral analysis showed an increase in amplitudes at certain frequencies, which may indicate the presence of oil foaming in the pump cylinder.

CONCLUSION. This method of spectral analysis of the wattmetrogram signal with the help of the MatLab program makes it possible to identify mechanical and chemical defects of the SRPU according to the amplitude-frequency characteristics of the wattmetrogram parameters.

Keywords: spectrum; spectral Fourier decomposition; wattmeter diagram; diagnostics; sucker rod pumping unit; wattmetering sensor spectral analysis; signal; array; foaming; histogram; Microsoft Excel; MatLab.

For citation: Manakhov VA. Tsvetkov A.N Spectral analysis of mechanical and chemical defects by the parameters of the wattmetrogram of drawer drive pumping unit in the process of operation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2022;24(4):50-62. doi:10.30724/1998-9903-2022-24-4-50-62.

Введение

Практически в каждой технической или энергетической системе приходится встречаться с таким понятием как сигнал, служащий для переноса информации между элементами этой системы. Такие сигналы можно назвать информационными или сигнал – это есть материальный носитель информации. Сигналы существуют как во временной, так и в частотной областях; мы можем одинаково точно думать о них как о значениях, изменяющихся во времени (временная область), или как о сочетаниях основных частот (спектральная область).

Метод определения этих основных частот по временным изменениям называется спектральным разложением Фурье или спектральным анализом. Спектральное разложение Фурье используется сегодня так широко, что даже мимолетное упоминание о его наиболее важных приложениях является длительным занятием. Спектральный анализ используется в квантовой физике для раскрытия структуры материи в мельчайших масштабах, а в космологии - для изучения Вселенной в целом. Спектроскопия и рентгеновская кристаллография полагаются на спектральный анализ для определения химического состава и физической структуры из мельчайших количеств материалов, а спектральный анализ света от звезд говорит нам о составе и температуре тел, отделенных от нас световыми годами. Инженеры рутинно вычисляют преобразования Фурье при анализе механических колебаний, при акустическом проектировании концертных залов, а также при строительстве самолетов и мостов. В медицине методы Фурье призваны реконструировать работу органов, полученные с помощью компьютерной томографии и МРТ, для выявления нарушений работы сердца и нарушений сна. Спектральный анализ может помочь нам отличить музыкальные инструменты, сделанные мастерами, от некачественных копий, могут помочь вернуть к жизни испорченные аудиозаписи великих вокалистов и могут помочь в проверке истинной личности говорящего.

В электроэнергетике существуют электромагнитные величины такие как ток I , напряжение U , напряженность электрического поля $\vec{E}$ и другие величины физически представлены именно в виде сигналов, изменяющихся во времени. Следовательно, функция

времени $S(t)$, с размерностью соответствующей физической величины – есть математическая модель данного сигнала.

Одним из ведущих отраслей Российской Федерации является нефтегазовая отрасль. Для обеспечения требуемой надежности и эффективности добычи нефти, актуально остается вопрос выявления дефектов и неисправностей в штанговых скважинных насосных установках в процессе добычи.

Научная новизна данной статьи состоит в исследовании и разработке возможного метода диагностики механических дефектов штанговых скважинных насосных установок путем спектрального анализа данных, полученных по параметрам ваттметрограммы. Практическая новизна состоит в том, что данные дефектов, диагностированные в процессе эксплуатации, могут быть использованы в качестве базы дефектов нефтяных установок, выявленных с использованием спектрального анализа.

Литературный обзор (Literature Review)

Более ста лет назад Жан Батист Фурье показал, что любая форма волны, существующая в реальном мире, может быть сгенерирована путем сложения синусоидальных волн. Проиллюстрируем это на рисунке 1 для простой формы волны, состоящей из двух синусоидальных волн.

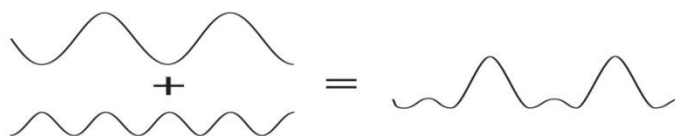


Рис. 1. Сложение синусоидальных волн

Fig.1. Addition of sinusoidal waves

Правильно выбирая амплитуды, частоты и фазы этих синусоидальных волн, мы можем генерировать форму волны, идентичную нашему желаемому сигналу. И наоборот, мы можем разбить любой существующий сигнал на те же самые синусоидальные волны. Можно показать, что эта комбинация синусоидальных волн уникальна. Любой сигнал может быть представлен только одной комбинацией синусоидальных волн. [1-3]

Очень часто информация кодируется в синусоидах, которые образуют сигнал. Это относится как к естественным сигналам, так и к тем, которые были созданы человеком. Многие вещи колеблются в нашей вселенной. Например, речь – это результат вибрации голосовых связок человека; звезды и планеты меняют свою яркость, вращаясь вокруг своих осей и вращаясь друг вокруг друга; корабельные винты генерируют периодическое смещение воды и так далее. Форма сигнала во временной области не важна в этих сигналах; ключевая информация находится в частоте, фазе и амплитуде составляющих синусоид. Для извлечения этой информации используется быстрое преобразование Фурье.[4-6]

Рассмотрены приложения спектрального анализа российских авторов: Татаринов В.Н., Татаринов С. В., Харкевич А.А., Недольский А.Н., Бойко Б.П., Тюрин В.А. а также были рассмотрены и зарубежные авторы: Хайкин., Персиваль и Уолден., Порат., Терриен, что показало различные точки зрения о построении и структуре спектра и его анализа.

Что касается, предположений о возможности применения ваттметрограмм для контроля над работой ШСНУ были впервые высказаны профессором Куликовским Лонгином Францевичем еще в 1948 г., и в то время не были разработаны методики расшифровки ваттметрограмм, из-за малых мощностей вычислительной техники.

С помощью метода ваттметрирования можно определить:

- состояние работы насоса;
- степень неуравновешенности станка-качалки (СК);
- наличие отрицательных усилий, ведущих к преждевременному выходу из строя редуктора;
- степень износа и состояние отдельных узлов станка-качалки;
- состояние ремней передачи;
- степень загрузки электродвигателя [7].

В настоящее время спектральным анализом механических дефектов в ШСНУ активно занимается доктор технических наук Хакимьянов Марат Ильгизович из Уфимского государственного нефтяного технического университета, им написано более 30 работ по данной и смежным тематикам.[8]

Результаты литературного обзора показали, что эти проблемы совершенно недостаточно разработаны и слабо освещены, в том числе и в нормативной литературе. Предлагаемые методы главным образом направлены либо на диагностику самой ваттметрограммы, либо диагностику по динамограмме. В связи с этим предложен новый

метод диагностирования, широко не используемый в диагностике механических дефектов ШСНУ, основанный на спектральном анализе сигнала, полученный по параметрам ваттметрограммы [1-18].

На сегодняшний день в связи с повышенными требованиями к диагностике и надежности ШСНУ при минимальных затратах на обслуживание, спектральный анализ химических и механических дефектов по параметрам ваттметрограммы ШСНУ заслуживает внимания и дальнейшего развития.

Материалы и методы (Materials and methods)

В электроэнергетике и электронике часто используется математическая модель сигнала $F(\omega)$ – функция частоты, известная как спектр сигнала. Функция времени $S(t)$ и спектр описывают один и тот же сигнал, следовательно, они взаимосвязаны. Спектр сигнала существует, если сигнал $S(t)$ можно представить в виде суммы гармонических колебаний [2].

Представление $S(t)$ в виде суммы гармонических колебаний называют спектральным разложением Фурье, которое в 1965 году, благодаря появлению второго поколения ЭВМ (переход к транзисторной элементной базе, появление первого монитора с параметрами: производительность – $5 \cdot 10^4$ коротких операций в секунду, разрядность – 24–48 бит, емкость ОЗУ–64–512 Кбайт) сделало цифровые вычисления спектра практически осуществимыми.

Рисунок 2 представляет собой трехмерный график сложения синусоидальных волн. Две оси – это время и амплитуда, по временной области. Третья ось – это частота, которая позволяет нам визуальнo отделять синусоидальные волны, чтобы дать нам нашу сложную форму волны. Если мы наложим этот трехмерный график вдоль оси частот, мы получим представление (рис. 2 б). Это представление синусоидальных волн во временной области. Сложение их вместе в каждый момент времени дает исходную форму сигнала.

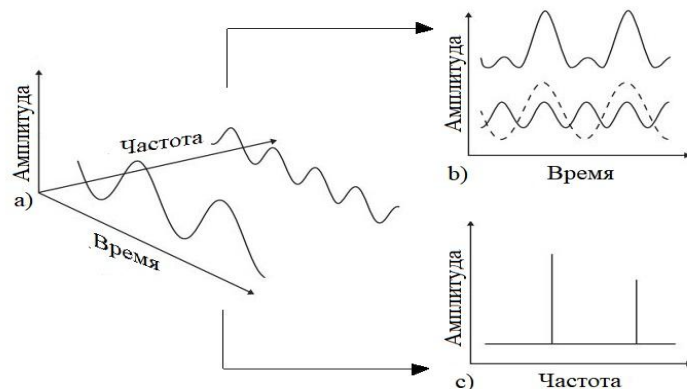


Рис. 2 Взаимосвязь между временной и частотной областями.

а) Трехмерные координаты времени, частоты и амплитуды;
б) Временная область; в) Частотная область.

Fig.2 The relationship between the time and frequency domains.

a) Three-dimensional coordinates of time, frequency and amplitude;
b) Time domain; c) Frequency domain.

Однако, если мы посмотрим на наш график вдоль оси частоты, как показано на рисунке 2.с), мы получим совершенно иную картину. Здесь у нас есть оси амплитуды и частоты, то, что обычно называют частотной областью. Каждая отдельная волна, которую мы отделили от входного сигнала, отображается в виде вертикальной линии. Её высота представляет амплитуду сигнала, а положение вертикальной линии представляет частоту этого сигнала. Исходя из рисунков 2 б и 2с, видим, что каждая линия представляет собой синусоидальную волну, мы однозначно охарактеризовали наш входной сигнал в частотной области. Это представление частотной области нашего сигнала называется спектром сигнала. Каждая синусоидальная линия спектра является составляющей общего сигнала.

Спектр сигнала существует, если сигнал $S(t)$ можно представить в виде суммы гармонических колебаний, или его еще называют *спектральным разложением Фурье*.

$$S(t) = A \cos(2\pi f t + \Phi) \quad (1)$$

Аргумент функции $(2\pi f t + \Phi)$, (рад) называется текущей фазой. Колебание полностью определено, если известны три параметра: начальная фаза Φ , амплитуда A , частота f . Начальная фаза может быть любой в интервале $-\pi < \Phi < \pi$. Амплитуда A может быть любой, но обязательно положительной величиной. Частота f является физическим параметром, размерность которого Герц.

В теории сигналов под энергией сигнала понимается величина:

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} S^2(t) dt \quad (2)$$

В свою очередь, средняя мощность в общем виде определяется как

$$P_{cp} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} S^2(t) dt \quad (3)$$

Если средняя мощность является конечной, а – энергия сигнала E бесконечная величина, то спектральное разложение сигнала $S(t)$ имеет вид ряда:

$$S(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t + \Phi_n) \quad (4)$$

Если энергия сигнала E – конечная величина, спектральное разложение имеет интегральное представление

$$S(t) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} F(\omega) \cos \omega t + \Phi(\omega) d\omega \quad (5)$$

В разложении (4) частота принимает дискретные значения ω_n . Множество амплитуд A_n и множество начальных фаз Φ_n гармонических колебаний представляют дискретный спектр сигнала $S(t)$.

В разложении (5) роль амплитуды играет дифференциал

$$dA = \frac{1}{\pi} F(\omega) d\omega \quad (6)$$

Сигнал $S(t)$, в данном случае, формируется суммой гармонических колебаний *всех частот*. Амплитуда (6) на фиксированной частоте бесконечно мала и её значение не определено, поскольку бесконечно малый интервал частот d не имеет конкретного значения. Однако сигнал (5) полностью определен, если известны *амплитудная спектральная плотность* $F(\omega)$ и начальная фаза $\Phi(\omega)$ как функции частоты. Функции $F(\omega)$ и $\Phi(\omega)$ представляют непрерывный спектр сигнала $S(t)$ [2].

Анализ выражений (4) и (5), дает понять, что они имеют общие свойства, следовательно, спектр сигнала $S(t)$ – это есть множество начальных фаз гармонических колебаний кратных частот и амплитуд, сумма которых равна сигналу $S(t)$.

Спектр периодического сигнала

Сигнал $S_T(t)$ называется периодическим, если все его значения повторяются через промежутки времени, кратные T , где T – период повторения сигнала, $k \in Z$. Такой сигнал можно разложить в гармонический ряд Фурье:

$$S_T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cdot \cos 2\pi n F_1 t + b_n \cdot \sin 2\pi n F_1 t) \quad (7)$$

где A_0 – постоянная составляющая сигнала, определяемая выражением

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T s_T(t) dt. \quad (8)$$

Частота первой гармоники F_1 обратно пропорциональна периоду сигнала:

$$F_1 = \frac{1}{T} \quad (9)$$

Коэффициенты ряда Фурье a_n и b_n определяются выражениями:

$$\begin{aligned} a_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) \cdot \cos(2\pi n F_1 t) dt, \\ b_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} s_T(t) \cdot \sin(2\pi n F_1 t) dt, \end{aligned} \quad (10)$$

Зависимость коэффициентов $\{A_0, a_n, b_n\}$ от частоты называют гармоническим спектром периодического сигнала в квадратурной форме. Эта зависимость изображается в виде дискретной функции частоты для значений $f = n \cdot F_1$, $n = 1, 2, \dots \infty$. Коэффициент A_0 определен при $f = 0$. Если функция сигнала $s(t)$ нечётная, то коэффициенты $a_n = 0$., если чётная, то $b_n = 0$.

Периодический сигнал $S_T(t)$ также можно представить в амплитудно-фазовой форме ряда Фурье:

$$S_T(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(2\pi n F_1 t + \phi_n) \quad (11)$$

$n \cdot F_1$ – частота n -й гармоники периодического сигнала.

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}, \quad (12)$$

где A_n – амплитуда n -й гармоники периодического сигнала, определяемая по формуле:

$$\phi_n = \begin{cases} -\arctg \frac{b_n}{a_n}, a > 0, \\ -\arctg \frac{b_n}{a_n} \pm \pi, a < 0, \end{cases} \quad (13)$$

ϕ_n – начальная фаза n -й гармоники периодического сигнала

Односторонним фазовым спектром сигнала называют зависимость начальной фазы гармоник от частоты, в то же время односторонний амплитудный спектр есть зависимость амплитуд гармоник периодического сигнала от частоты.

Обе зависимости определены для значений частоты $f = n \cdot F_1$, $n = 1, 2, \dots \infty$. Общий вид этих зависимостей приведен на рисунке 3.

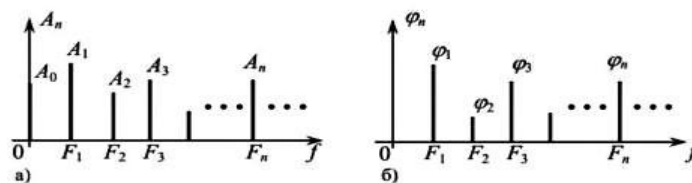


Рис.3. Односторонний спектр периодического сигнала: а) амплитудный спектр, б) фазный спектр.

Fig.3. One-sided spectrum of a periodic signal amplitude spectrum, b) phase spectrum.

Для расчета односторонних спектров необходимо знать аналитическое выражение сигнала $S(t)$. Тогда по формуле (8) вычисляется постоянная составляющая сигнала A_0 , по формуле (9) – частота первой гармоники F_1 , по формулам (10) – коэффициенты a_n, b_n , по формулам (12) и (13) – амплитуды и начальные фазы гармоник сигнала.

На рисунке 4 показано преобразование гармонического сигнала первой, третьей и пятой гармоник в амплитудно-частотный спектральный вид.

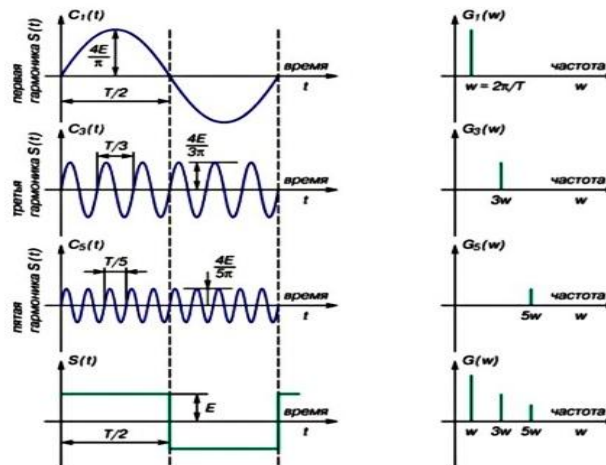


Рис.4. Преобразование Фурье для представления гармонического сигнала в спектр.

Fig.4. Fourier transform to represent a harmonic signal into a spectrum.

Результаты (Results)

Для построения спектра нам нужно получить периодический сигнал и сделать процедуру преобразования Фурье. Периодическим сигналом будет служить ваттметрограмма, которая представляет собой зависимость мощности, потребляемой электродвигателем, измеряемого станка-качалки действующей нефтяной штанговой скважинной насосной установки, во времени. Массив данной ваттметрограммы, путем измерения мгновенных значений тока и напряжения с их последующим преобразованием в мощность, являются исходными данными для анализа. (Рисунок 5.)

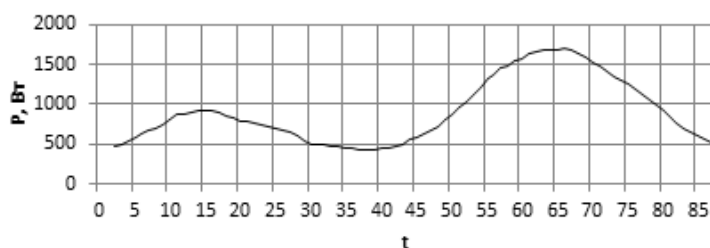


Рис. 5. Ваттметрограмма с действующей нефтяной штанговой скважинной насосной установки. Fig. 5. Wattmetrogram from an operating oil rod well pumping unit.

Предлагаемым методом диагностики по параметрам ваттметрограмм можно определить состояние механической части ШСНУ. Поэтому для проверки адекватности разработанных математических и имитационных моделей необходимо сравнить экспериментальные данные ваттметрограмм с эталонной ваттметрограммой.

Для построения ваттметрограммы нужен накопленный массив активной мощности и период качания станка-качалки. При этом эталонным считается массив, полученный на протяжении определенного времени без существенного изменения параметров станка-качалки. Эти данные были получены с действующей нефтяной насосной установки, с применением модуля ваттметрирования «CILK-UI», который предназначен для измерения токов, напряжений, потребляемой мощности и электроэнергии по трем фазам электродвигателей станков-качалок, а также для периодического формирования ваттметрограмм.

Модуль выполняет следующие функции:

- периодическое измерение мгновенных (за период измеряемого переменного тока) значений напряжений и токов по трем фазам измеряемой сети,
- вычисление периода (частоты) измеряемого переменного тока по фазе А,
- вычисление действующих за период значений напряжения и тока по трем фазам,
- вычисление полной мощности, активной мощности и коэффициента мощности по трем фазам,
- вычисление сдвига фаз между напряжениями фаз А и В, А и С,
- вычисление и периодическое накопление электрической энергии по трем фазам,
- периодическое (с заданным периодом) обновление массивов действующих значений токов, напряжений и активной мощности по трем фазам.

Частота дискретизации у модуля равна 6,5Гц, что не дает нам возможности диагностики электрических дефектов, т.к. электрические дефекты можно диагностировать, при равной или превышающей промышленной частоте тока.

Модуль выполнен в виде законченного блока в поликарбонатном корпусе со съемной верхней крышкой. Конструктивно модуль оснащен защелкой для монтажа на стандартную 35 мм DIN-рейку.

Данный модуль имеет погрешности каналов измерений, такие как:

- максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения тока – 2%,
- максимальная приведенная погрешность измерения действующего значения напряжения – 2%,
- максимальная приведенная погрешность измерения коэффициента мощности – 3 %,
- максимальная приведенная погрешность вычисленных значений полной и активной мощности – 3 %.

Данные, полученные модулем ваттметрирования, сохраняются в формате XLS программе Microsoft Excel, после чего обрабатываются и загружаются в программу Matlab. С 13 октября по 15 декабря 2021 года проведены опытно-промышленные испытания электропривода ЭПСН-15 производства АО «ЧЭАЗ» на скважинах НГДУ «Джалильнефть» (СП «Татнефть-Добыча») ПАО «Татнефть». В качестве объектов испытаний были подобраны скважины с осложненными условиями работы. На рисунке 6 представлена ваттметрограмма одной из скважин при нормальной работе ШСНУ. По сути своей данная ваттметрограмма является эталоном для данной скважины, т.к. построена по методу определения минимального отклонения по десяти качаниям, которые являются эталонными, т.е. были замерены при нормальной работе. При измерении данных ваттметрограмм не было обнаружено механических дефектов, а потребление

электроэнергии двигателем находилось в пределах номинального значения по паспортным данным.

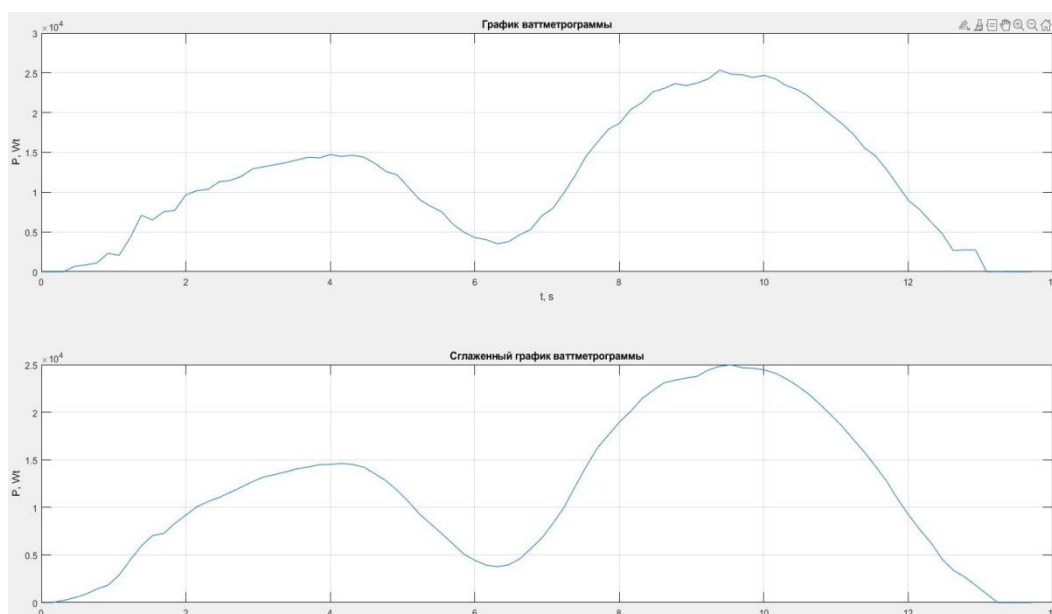


Рис. 6. Исходная и усредненная ваттметрограммы при нормальной работе ШСНУ.

Fig. 6. Initial and smoothed wattmetrograms during normal operation of the rod borehole pumping unit.

Пенообразование в цилиндре насоса происходит из-за слишком быстрой добычи нефтепродукта, при которой нефть просто не успевает поступать в нефтяной пласт с мест залежей и в следствии не успевает поступать в скважину.

На рисунке 7 приведена ваттметрограмма, полученная при работе станка-качалки с вспениванием жидкости в цилиндре насоса ШСНУ, часто данный процесс называют образованием эмульсии.

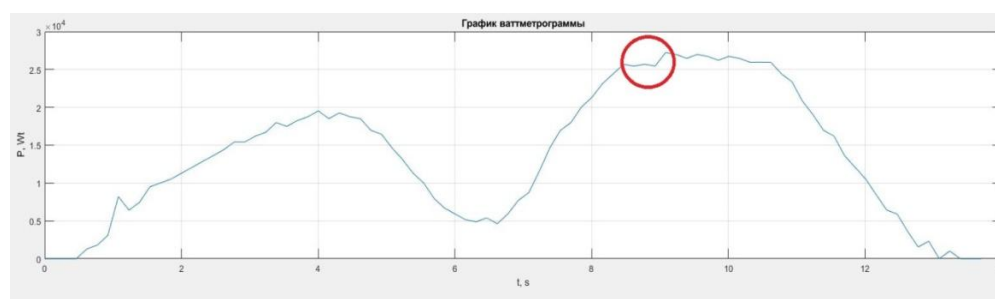


Рис. 7. Ваттметрограмма при вспенивании нефтяной жидкости в цилиндре насоса ШСНУ

Fig. 7. Wattmetrogram during foaming of the oil liquid in the cylinder of the pump rod borehole pumping unit

По ваттметрограмме можно заметить скачок в пиковой точке, который мы можем наблюдать в красной отметке на рисунке 7, что соответствует самой низкой точке устьевого штока и верхней точке балансира, в начале подъема нефти в штанговом насосе. Эти скачки и повышенная нагрузка в данных точках говорят о вспенивании нефтяной жидкости в поступающем в цилиндр насоса.

Вспенивание может образовываться из-за ускоренного темпа откачки, когда образуются конусы обводнения, препятствующие прохождению нефти в скважину. В случае этого уменьшить приток воды в скважину и пенообразование можно путём поддержания противодавления на нефтяной пласт или уменьшением скорости вращения двигателя, что автоматически скажется на уменьшении темпа откачки нефти и уменьшении пенообразования.

Вспенивание нефти чаще образуется в скважинах в верхней части столба, реже имеет место у забоя, и в основном пена собирается на поверхности нефти.

В некоторых месторождениях, где падение пласта идёт полого, нефть как бы плавает на поверхности воды в нижней части нефтяного пласта. В таких случаях количество воды попадающей в скважину, в большой степени зависит от скорости откачки нефти. Обычно в скважину попадает немного воды, если дебит невелик, уровень жидкости в скважине поддерживается умеренно высоким и насос находится над кровлей нефтяного пласта (правая часть рисунка 8). Содержание в нефти воды называется нефтяной эмульсией – это есть механическая смесь нефти и пластовой воды, нерастворимых друг в друге и находящихся в мелкодисперсном состоянии (в виде мелких капель) (Рис. 9).

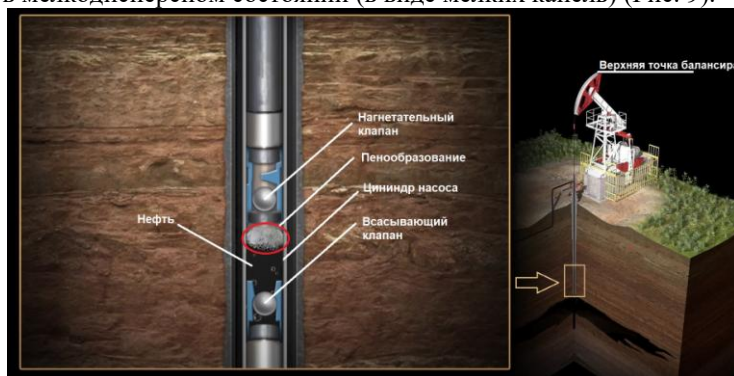


Рис.8. Пенообразование в цилиндре насоса с демонстрацией положения балансира.

Fig.8. Foaming in the pump cylinder with a demonstration of the position of the balancer.

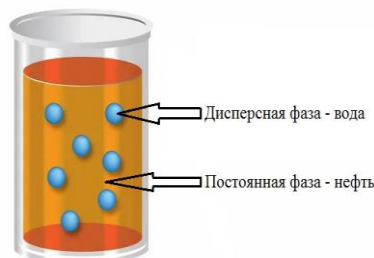


Рис. 9. Нефтяная эмульсия Fig. 9. Oil emulsion

Для диагностирования вспенивания построим эталонный спектр и спектры по 4 ваттметрограммам, полученные в период роста пенообразования и посмотрим спектральные зависимости, полученные при отклонении от нормальной работы станка качалки. На спектрах отбросим низкочастотную составляющую. Для удобства сравнения совместим спектры путем наложения в одном частотном диапазоне (Рис. 10).

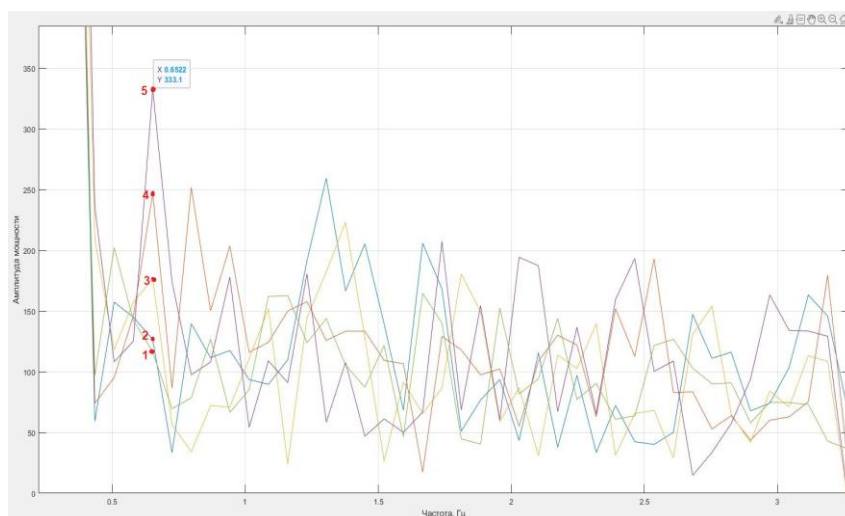


Рис. 10. Сравнение эталонного спектра и спектров с нарастанием пенообразования

Fig. 10. Comparison of the reference spectrum and spectra with an increase in foaming

На спектре можно заметить рост в амплитуде на частоте 0,6522 Гц, которая является кратной частоте качания станка-качалки с учетом передаточного отношения редуктора и шкивов ременной передачи на вал электродвигателя, через который и были полученные

исходные данные для построения спектра. Будем считать данную частоту характерной для пенообразования на основе анализа ваттметрограмм, полученных на двух осложненных нефтяных скважинах, где наблюдался рост амплитуды именно на данной частоте и нескольких скважин без пенообразования, где на данной частоте рост амплитуды отсутствовал. При этом исследуемые ваттметрограммы получены на заведомо исправном оборудовании, прошедшем стадию «подземного ремонта оборудования». Стоит отметить, что спектр должен выглядеть в дискретном виде как на рисунке 3, программа *Matlab* достраивает линии между точками амплитуд, и поэтому для удобства анализа переведем все значения спектров в формат *XLS* программе *Microsoft Excel* и построим гистограмму (Рис. 11). На рисунке видна характерная для данного дефекта (пенообразования) частота 0,6522 Гц, на которой происходит рост амплитуды от эталонного спектра до спектра максимального пенообразования. Также можем увидеть прямую зависимость роста амплитуды спектра и в более низкочастотной области, что говорит о росте пенообразования.

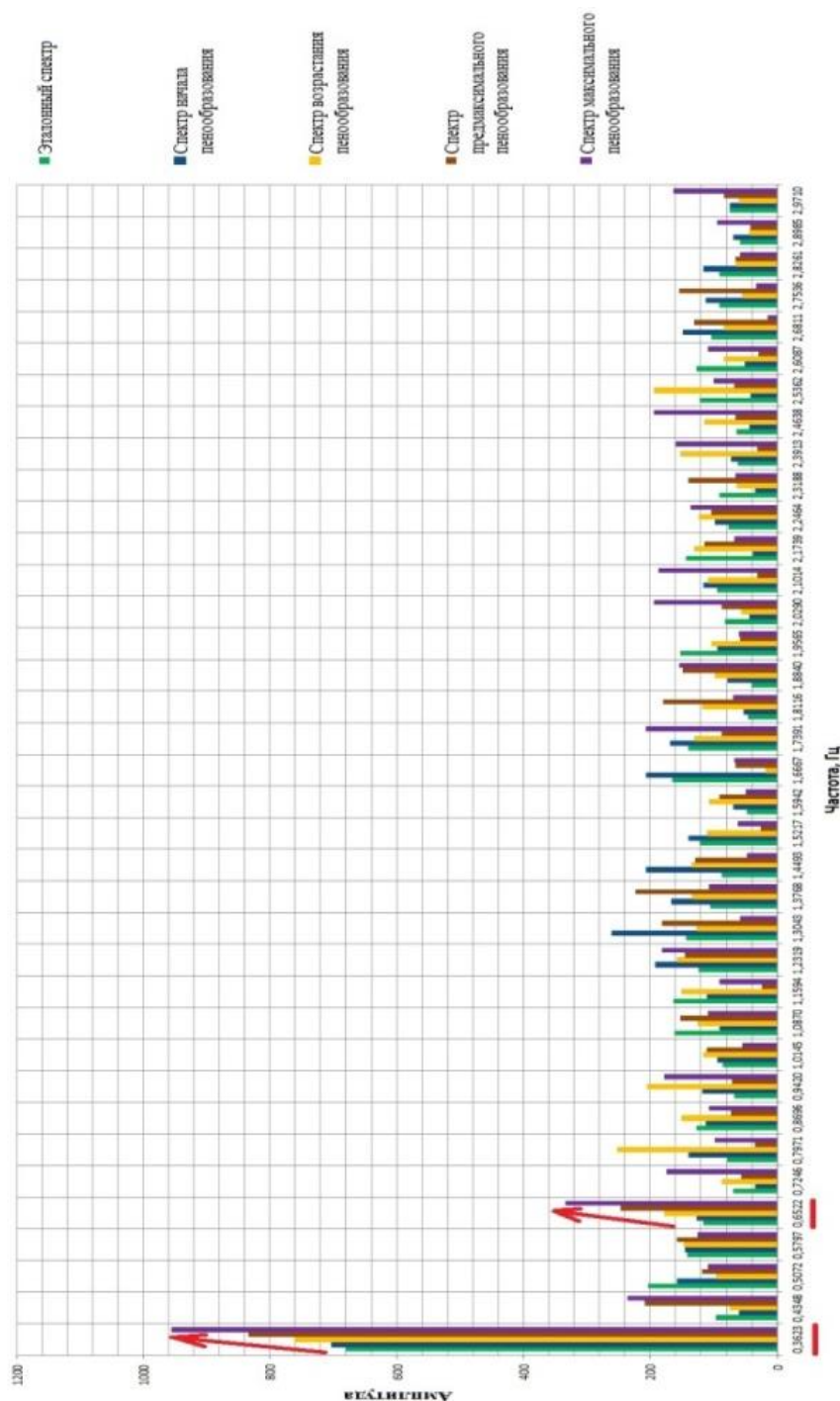


Рис. 11. Представление полученных спектров в виде гистограммы

Fig. 11. Representation of the obtained spectra in the form of a histogram

Заключение (Conclusions)

В полном объеме рассмотрен входной сигнал в виде ваттметрограммы ШСНУ и произведен спектральный анализ данного сигнала. Для непрерывного контроля состояния установок необходимо осуществлять анализ ваттметрограмм и их спектров. Снятие и оценка экспериментальных данных с действующей ШСНУ проводилась в процессе ее эксплуатации. Построена ваттметрограмма и по её массиву сигнала построен спектр. Осуществлена диагностика по параметрам ваттметрограммы и спектрального анализа ШСНУ, у которой было обнаружено пенообразование. Выявлен кратковременный скачок активной мощности в верхней точке нахождения балансира.

Удалось выявить и диагностировать такое негативное явление как вспенивание нефтяной жидкости. Решением данной проблемы является уход на пониженную частоту вращения электрического двигателя, что непременно сократит число ходов плунжера в минуту, это создаст возможность нефтяной жидкости успевать поступать в нефтяной пласт с мест залежей, тем самым скважинный насос будет наполнен. Если игнорировать данный негативный фактор, и продолжать осуществлять откачку добываемой жидкости в том же темпе, это вызовет понижение уровня жидкости в скважине, что в свою очередь уменьшает коэффициент полезного действия насоса и вызывает взбалтывание нефти и воды, т.е. будет способствовать эмульгированию при каждом ходе плунжера, что в свою очередь приведет к повышению нагрузки на шток, перегрузке приводного электродвигателя и аварийной остановке станка-качалки.

Существуют и другие методы уменьшения вспенивания нефти, и не допуская уменьшения динамического уровня нефтяной жидкости в скважине, такие как работа насоса с перерывом, установки насоса меньших размеров и если это возможно увеличение погружения насоса. Однако погружение насоса должно быть рассчитано так, чтобы не происходило полного «откачивания» досуха, т.е. чтобы жидкость не выкачивалась из скважины быстрее, чем поступала в нее – во избежание засасывания насосом воздуха или газа.

Исходя, из полученных экспериментальных данных и проделанной работе можно сделать следующие выводы:

- все сигналы имеют синусоидальную форму, что характерно для природы токовых колебаний;
- для диагностики электрических дефектов двигателя частота дискретизации, используемая в нашем опыте крайне мала, для успешной диагностики нужна частота дискретизации как минимум равной частоте тока, а желательно кратно превышающей его;
- частота дискретизации, используемая, в нашем опыте при построении ваттметрограмм отлично подходит для диагностики механической части оборудования ШСНУ;
- спектральный анализ дает более точную картину о развивающихся механических и химических дефектах, например такого как вспенивание нефтяной жидкости.

Предложенный метод спектрального анализа сигнала ваттметрограммы с программным обеспечением MatLab позволяет обнаруживать механико-химические дефекты ШСНУ по амплитудно-частотным характеристикам параметров ваттметрограммы.

Литература

1. Солодкий Е.М. Энергоэффективная система управления добычи нефти штанговой насосной установки / Е.М. Солодкий, В.П. Казанцев, Д.А. Даденков, С.В. Сальников // Научно-технический вестник Поволжья. 2018. № 12. С. 292-295.
2. Бойко Б.П., Тюрин В.А. Спектр сигнала: учебно-методическое пособие / Б.П. Бойко, В.А. Тюрин. - Казань: Казанский федеральный университет, 2014. - 38 с.
3. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 3-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2011. 768 с. ISBN 978-5-9775-0606-9. ЭБС «Знаниум».
4. Подлесный С. А. Устройства приема и обработки сигналов [Электронный ресурс] : / С. А. Подлесный, Ф. В. Зандер. Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. 352 с. ISBN 978-5-7638-2263-2. ЭБС «Знаниум».
5. Анучин, А. С. Системы управления электроприводов. М.: МЭИ, 2015. 378 с.
6. Ившин И.В., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р., Петров Т.И., Цветков А.Н., Низамиев М.Ф., Корнилов В.Ю. Анализ развития электроприводов для станков-качалок нефти по результатам патентного поиска. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019;21(5):3-13.
7. Манахов В.А., Цветков А.Н. Определение состояния и функционирования оборудования штанговых скважинных насосных установок в процессе эксплуатации по

параметрам ваттметрограммы. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021;23(3):127-139. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-127-139>.

8. Хакимьянов М.И. Проблемы повышения энергетических характеристик электроприводов скважинных штанговых насосов / М.И. Хакимьянов, Ф.Ф. Хусаинов, И.Н. Шафиков // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2. С. 35-40.

9. Сергиенко А.Б. MATLAB и преобразование Фурье / Exponentargo Математика в приложениях. 2003. № 3. С. 84–86.

10. Петров Т.И., Сафин А.Р., Ившин И.В., Цветков А.Н., Корнилов В.Ю. Модель системы управления станком-качалкой на основе синхронных двигателей с бездатчиковым методом. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018;20(7-8):107-116.

11. Цветков А.Н., Корнилов В.Ю., Сафин А.Р., Логачева А.Г., Петров Т.И., Кувшинов Н.Е. Управляющая измерительно-информационная система экспериментального стенда. Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020;22(4):88-98.

12. Цветков А.Н., Сафин А.Р., Гибадуллин Р.Р., Ившин И.В. Испытательный стенд с программно-аппаратным комплексом для исследования электрической машины возвратно- поступательного действия. Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. №3-4. С.105-111.

13. Cheng, Q. Vector Control of an Induction Motor based on a DSP. Master of Science Thesis./ Q. Cheng, L.Yuan. Sweden, Gothenburg: Chalmers Bibliotek, 2011. 76 p.

14. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model / D.S. Torgaeva, M.P. Sukhorukov, Y.A. Shinyakov, N.A. Shalyapina // International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT). 2019. October. Vol. 9, Issue 1. P. 4403–4409.

15. Sensorless Control with Kalman Filter on TMS320 Fixed-Point DSP. Application Report [электронный ресурс]. URL: <http://www.ti.com/lit/an/bpra057/bpra057.pdf> (дата обращения 01.02.2022).

16. Frendo E., Bonamy D. English for the Oil Industry 1 Course Book. Pearson Education ESL 2017- P 80.

17. Roberto L. Soza. Review of Downhole Dynamometer Testing [электронный ресурс]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-35217-MS> (дата обращения 08.03.2022).

18. J.F. Lea, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis [электронный ресурс]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf (дата обращения 04.04.2022).

Авторы публикации

Манахов Валерий Александрович – ассистент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

Цветков Алексей Николаевич – доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Казанский государственный энергетический университет.

References

1. Solodky EM, Kazantsev P, Dadenkov D.A. Energy-efficient oil production management system of a rod pumping unit. *Scientific and Technical Bulletin of the Volga region*. 2018;12:292-295.

2. Boyko BP, Tyurin VA. *Signal spectrum: an educational and methodical manual*. Kazan: Kazan Federal University, 2014. 38 p.

3. Sergienko AB. *Digital signal processing: textbook. stipend*. 3rd ed. St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2011. 768 p. (Educational literature for universities). ISBN 978-5-9775-0606-9. EBS «Znanium».

4. Podlesny SA, Zander FV. *Devices for receiving and processing signals* [Electronic resource] / Krasnoyarsk: Sib. feder. un-t, 2011. 352 p. ISBN 978-5-7638-2263-2. EBS «Znanium».

5. Anuchin AS. Control systems of electric drives. M.: MEI, 2015. 378 p.

6. Ivshin IB, Safin AR, Gibadullin R, et al. Analysis of the development of electric drives for oil pumping machines based on the results of a patent search. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2019;21(5):3-13.

7. Manakhov VA, Tsvetkov AN. Determination of the condition and functioning of the equipment of rod borehole pumping units during operation according to the parameters of the wattmetrogram. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2021;23(3):127-139. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-127-139>.
8. Khakimyanov MI, Khusainov FF, Shafikov IN. Problems of increasing the energy characteristics of electric drives of borehole rod pumps. *Electrotechnical systems and complexes*. 2017;2:35-40.
9. Sergienko A.B. MATLAB and Fourier transform. Exponentapro Mathematics in applications. 2003;3:84-86.
10. Petrov TI, Safin AR, Ivshin IV, Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu. Model of a rocking machine control system based on synchronous motors with a sensorless method. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2018;20(7-8):107-116.
11. Tsvetkov A.N., Kornilov V.Yu., Safin A.R., Logacheva A.G., Petrov T.I., Kuvshinov N.E. Control measuring and information system of the experimental stand. *News of higher educational institutions. ENERGY PROBLEMS*. 2020;22(4):88-98.
12. Tsvetkov AN, Safin AR, Gibadullin RR, et al. A test bench with a software and hardware complex for the study of an electric reciprocating machine. *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2016;3-4:105-111.
13. Cheng Q, Yuan L. *Vector Control of an Induction Motor based on a DSP*. Master of Science Thesis. Sweden, Gothenburg: Chalmers Bibliotek, 2011. 76 p.
14. Torgaeva DS, Sukhorukov MP, Shinyakov YA, et al. Development of a Sucker Rod Pumping Unit Simulation Model. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*. 2019. October. Vol. 9, Issue 1. P. 4403–4409.
15. Sensorless Control with Kalman Filter on TMS320 Fixed-Point DSP. Application Report [electronic resource]. URL: <http://www.ti.com/lit/an/bpra057/bpra057.pdf> (accessed 01.02.2022).
16. Frendo E., Bonamy D. *English for the Oil Industry 1 Course Book*. Pearson Education ESL 2017. P 80.
17. Roberto L. Soza. *Review of Downhole Dynamometer Testing* [electronic resource]. URL: <https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-35217-MS> (accessed 08.03.2022).
18. J. F. Lea, Cleon Dunham, Lynn Rowlan. *Well Modelling: Optimized Production and Troubleshooting Using Nodal Analysis* [electronic resource]. URL: https://rogtecmagazine.com/wp-content/uploads/2014/10/09_WellModeling.pdf (accessed 04.04.2022).

Authors of the publication

Valeriy A. Manakhov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Alexey N. Tsvetkov - Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено 22.06.2022 г.

Отредактировано 29.06.2022 г.

Принято 06.07.2022 г.