

На правах рукописи

ИСАЧЕНКО ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ

**АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО –
ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ
СОСТОЯНИЯ ШТАНГОВЫХ И
ЭЛЕКТРОЦЕНТРОБЕЖНЫХ НАСОСНЫХ УСТАНОВОК
ПО ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ НА ИХ ВХОДЕ**

Специальность 05.11.13

Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2004

Работа выполнена на кафедре Электрические станции Электротехнического института Томского политехнического университета

Научный руководитель	- Гольдштейн Ефрем Иосифович, к.т.н. доцент ТПУ, г. Томск
Официальные оппоненты:	- Муравьев Сергей Васильевич, д.т.н., профессор ТПУ, г. Томск. - Целебровский Игорь Викторович, к.т.н., зам. дир-ра по НР НИИ АЭМ при ТУСУР, г. Томск.
Ведущая организация	- ОАО «ТомскНИПИнефть», г. Томск

Защита диссертации состоится « 16 » ноября 2004 г. в 15 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.269.09 при Томском политехническом университете по адресу: Россия, 634034, г. Томск, ул. Савиных, 3, библиотека НИИ Интроскопии.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан « 11 » октября 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета

Б.Б.Винокуров

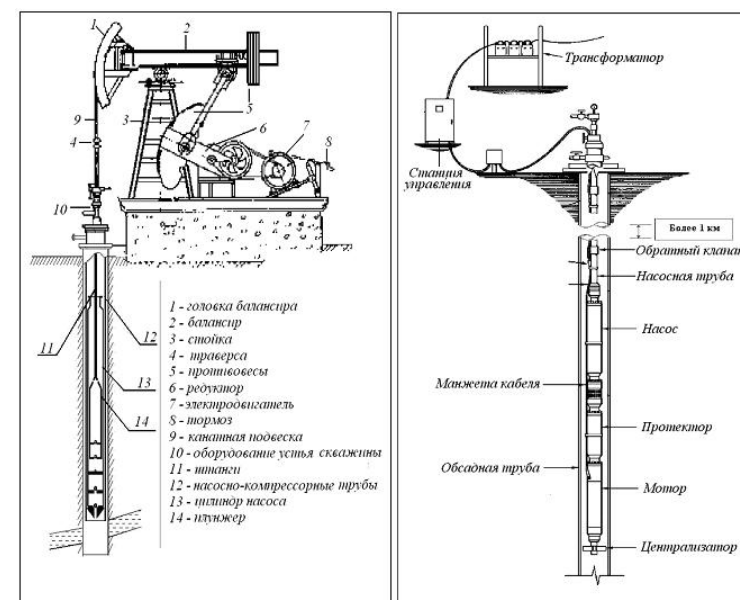
значений токов и напряжений. / Аврамчук В.С., Гольдштейн Е.И., Бацева Н.Л., Исаченко И.Н., Ли Д.В., Сулейманов А.О., Цапко И.В // под ред. Гольдштейна Е.И. – Томск, Печатная мануфактура, 2003.– 240 с.

13. Исаченко И.Н. Программный комплекс спектрального анализа как основа для создания системы контроля и диагностики. // Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт. Труды 2-ой международной НТК. В 2т. Т.2. – Тобольск: ООО ИПП «Art-Avenue», 2004. – С. 131 – 134.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время все большее распространение получает организация эксплуатации и ремонта оборудования по его состоянию; такая система, в свою очередь, невозможна без надежных устройств и систем контроля и диагностики (СКиД). Развитие электронной вычислительной техники обусловило соответствующее направление развития СКид в нефтедобывающей промышленности; широко внедряются СКид на базе микроконтроллеров, позволяющие значительно расширить функции СКид при заметном уменьшении размеров измерительного оборудования.

В нефтедобывающей промышленности устройства на базе асинхронных электродвигателей – штанговые глубинные насосные установки (ШГНУ) и электроцентробежные насосные установки (ЭЦНУ) широко используются для механизированной добычи нефти (рис.1). Несмотря на существенные различия этих установок, и отличающиеся друг от друга технологии контроля их работы и технического состояния, просматриваются общие задачи по совершенствованию СКид - повышение надежности и увеличение межремонтного периода работы контролируемого оборудования; оптимизация технических решений и снижение энергопотребления установок.



ШГНУ

ЭЦНУ

Рис.1 Нефтедобывающие насосные установки

При эксплуатации ШГНУ, одной из важных задач является уравнивание станков-качалок (СК), что сказывается как на надежности работы оборудования, так и на его энергопотреблении. В последнее время, при постоянном росте цен на электроэнергию, решение таких задач становится все актуальнее. Ставший уже

классическим методом динамометрирования (анализ изменения нагрузки на полированный шток от времени $P(t)$ или от хода штока $P(\delta)$ рис.2.а, б) не дает достаточной информации для «эффективного» уравнивания станка-качалки.

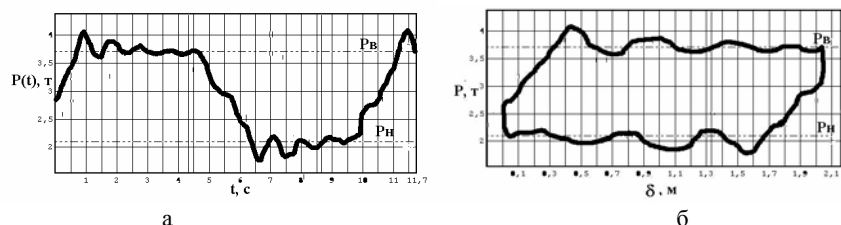


Рис.2 Динамограммы при нормальной работе подземного оборудования
а – от времени; б – от хода штока

На практике получило распространение измерение двух значений электрического тока на входе ШГНУ и определение коэффициента неуровненности (K_H) по формуле

$$K_H = \frac{(I_{в.макс} - I_{н.макс})}{(I_{в.макс} + I_{н.макс})} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $I_{в.макс}$, $I_{н.макс}$ - максимальные значения действующего значения тока в фазе электродвигателя при ходе штанг вверх и вниз соответственно.

Проведенные при участии автора промышленные исследования по оценке уравнишенности фонда ШГНУ одного из месторождений на территории Западной Сибири (рис.3), показали недостаточное внимание, уделяемое вопросу уравнивания СК.

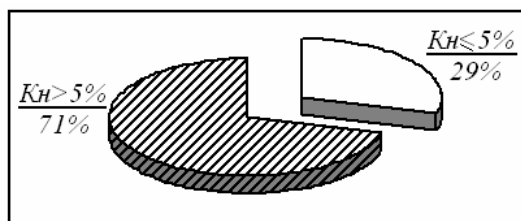


Рис.3 Результаты оценки уравнишенности фонда месторождения

Более информативной является зависимость активной мощности от времени (ваттметрограмма) на входе ШГНУ, причем измеряются средние значения мощности на периоде частоты питания (см. рис.4, где один отсчет равен 0,02 с.), а постоянная составляющая ВМГ (P_0) характеризует среднее за период качания (Ткач) потребление электрической энергии насосной установкой. Влияние уравнишенности на потери электрической энергии показано на рис.5.

периодичностей протекающего процесса в ЭЦНУ и учитывающих априорную информацию об анализируемых сигналах;

11. Разработан и создан программный комплекс анализа электрических сигналов на входе ЭЦНУ, реализующий как классические методы спектрального анализа, так и предложенные процедуры определения амплитуд и фаз частотных составляющих, фильтрации спектров, независимого определения частот.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Патент РФ №2210004. Способ диагностики уравнишенности станков-качалок штанговых насосных установок. / Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н. МПК. F04 B51/00 от 10.08.2003.
2. Патент РФ №2227848. Способ диагностики уравнишенности станков – качалок штанговых насосных установок. / Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н., Полякова С.В. МПК F04 B51/00 от 27.04.2004.
3. Патент РФ №2230229. Способ диагностики уравнишенности станков – качалок штанговых насосных установок. / Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н., Полякова С.В. МПК F04 B51/00 от 10.06.2004.
4. Патент РФ №38856. Устройство для выделения информативных периодичностей процесса в электронасосной установке. / Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н. МПК F04 B51/00 от 10.07.2004.
5. Способ выделения информативных периодичностей процесса в электронасосной установке. / Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н. // Заявка на получение патента на изобретение №2004103242 от 04.02.2004 МПК F04 B51/00.
6. Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н., Налимов Г.П. Методы контроля сбалансированности станка – качалки на основе измерения электрических параметров. // Нефтяное хозяйство, 2002, - №1 – С.60 – 61.
7. Исаченко И.Н. Датчики программно-аппаратного комплекса для диагностики асинхронных двигателей и устройств на их основе. // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Тезисы докладов шестой всероссийской НТК. В 2т. Т.2. – Томск: Типография ТПУ, 2000. – С. 125 – 126.
8. Гольдштейн Е.И., Исаченко И.Н., Карлова Г.Ф., Сидоров В.Ю. Датчики тока, напряжения и мощности для устройств контроля качества питающих напряжений и диагностики насосных установок. // Электронные и электромеханические системы и устройства. Тезисы докладов 16-ой НТК. – Томск: НПЦ «Полус», 2000. – С. 116-117.
9. Исаченко И.Н. Анализ уравнишенности сложных электромеханических систем с поступательным движением рабочего органа и противовесами. // Энергетика: экология, надежность, безопасность. Тезисы докладов седьмой всероссийской НТК. В 2т. Т.2. – Томск: Типография ТПУ, 2001. – С. 97-99.
10. Исаченко И.Н. Методы балансировки ШГНУ. // Современные техника и технологии. Труды восьмой международной НПК. В 2т. Т.1. – Томск: Издательство ТПУ, 2002.
11. Исаченко И.Н. Обзор методов контроля и диагностики электроцентробежных насосных установок. // Современные техника и технологии. Труды девятой международной НПК. В 2т. Т.1. – Томск: Издательство ТПУ, 2003. – С. 295-296.
12. Функциональный контроль и диагностика электротехнических и электромеханических систем и устройств по цифровым отсчетам мгновенных

Тот факт, что частота первой из гармоник группы II не кратна частоте f_1 позволяет предположить, что «механизм» появления гармоник группы II принципиально отличается от «механизма» появления гармоник группы I. Характер проявления частот группы II индивидуален для каждой скважины, что может служить как отличительным признаком объекта контроля, так и неким диагностическим параметром при решении задач контроля и функциональной диагностики ЭЦНУ.

В четвертой главе рассматриваются технические вопросы аппаратного и программного обеспечения комплексов. Приведены фотографии и схемы измерительных датчиков, блок-схемы и интерфейсы пользователя программных продуктов, указаны их технические характеристики и области применения. Программные продукты были созданы в среде программирования «C++Builder».

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Проведен аналитический обзор, выбор, испытания, доработка измерительных датчиков и их согласование с вычислительным блоком, создана система сбора данных на базе мобильного программно-аппаратного комплекса диагностики скважин «СиамМастер - 2»;
2. Проведены экспериментальные исследования на нефтепромыслах Западной Сибири с физическим моделированием заданной степени неуравновешенности станка-качалки ШГНУ; исследован вопрос энергопотребления ШГНУ от степени неуравновешенности СК и построен обобщенный график потерь электроэнергии от степени неуравновешенности станка –качалки;
3. Предложены новые способы диагностирования уравниваемости станка-качалки, заключающиеся в анализе отношений амплитуд первой и второй гармонических составляющих при разложении в ряд Фурье кривых реактивной и полной мощностей на периоде качания установки;
4. Разработан и предложен новый способ диагностирования уравниваемости станка-качалки, заключающийся в анализе среднеквадратичного отклонения электрических параметров на входе ШГНУ за период качания установки;
5. Разработан программно-аппаратный комплекс для эффективного уравнивания станков-качалок ШГНУ на аппаратной базе существующего мобильного комплекса «СиамМастер - 2» с анализом динамограммы и мгновенных значений электрического тока; при этом учтены степень загрузки станка-качалки и наличие постоянных осложняющих факторов работы установки;
6. Разработан программно-аппаратный комплекс для диагностирования уравниваемости станков-качалок ШГНУ на основе анализа ряда электрических параметров, и предложенных алгоритмов обработки и решающих правил;
7. Проведены экспериментальные исследования по сбору спектральных портретов электрических сигналов на входе электроцентробежной насосной установки;
8. Развита метод мгновенной спектральной плотности и предложены новые процедуры определения амплитуд и фаз частотных составляющих;
9. Исследованы спектральные портреты электрических сигналов на входе ЭЦНУ на предмет выявления диагностических признаков состояния оборудования; выявлена группа частот как возможный диагностический признак;
10. Разработаны новые алгоритмы построения спектральных портретов электрических сигналов ориентированные на поиск информативных

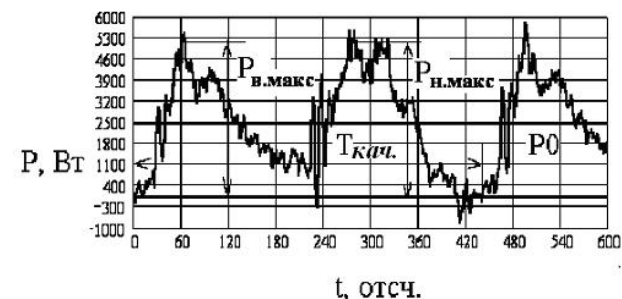


Рис.4 График изменения активной мощности на входе ШГНУ (ваттметрограмма)

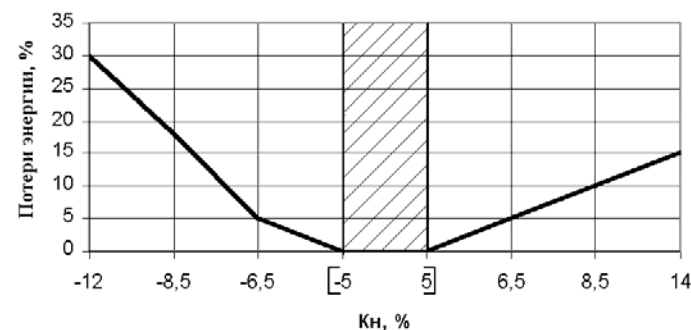


Рис.5 Обобщенный график потерь электроэнергии от степени уравниваемости ШГНУ

Отсюда следует необходимость развития простых и надежных способов контроля диагностирования уравниваемости по электрическим параметрам. При этом ожидается заметное снижение энергопотребления штанговых насосных установок при их «хорошем» уравнивании.

Условия эксплуатации ЭЦНУ значительно осложняют применение классических методов контроля и диагностирования электромеханических систем подобного класса. На настоящий момент нет надежных и эффективных систем диагностирования оборудования погружных центробежных насосов в процессе работы. Стоит отметить тот факт, что производительность центробежных насосов значительно выше штанговых и простой скважины влечет большие финансовые потери, поэтому здесь наиболее актуальны системы контроля без вывода насоса из эксплуатации (и дорогостоящей процедуры его подъема на поверхность!).

На настоящий момент процент насосных установок, оснащенных системами телеметрии на месторождениях России очень невелик, а оснащение ими требует больших финансовых вложений. Так что, на сегодняшний день, основные функции контроля работы погружных насосов выполняют системы релейной защиты и автоматики; и технология эксплуатации насосов сводится к работе «до отказа».

Перспективным направлением развития СКид является использование датчиков установленных на поверхности (устье) скважины. В данном направлении развиваются подходы вибродиагностики, акустической диагностики и анализ спектров электрического тока. Оснащение установок наземными системами контроля значительно экономичнее как в финансовом, так и временном аспекте, а использование информации, содержащейся в электрических сигналах, позволят использовать стационарные датчики, уже установленные в станциях управления. Однако на сегодня нет достаточного объема статистических данных для построения диагностических моделей по спектральным портретам электрических сигналов на входе ЭЦНУ.

Таким образом, наблюдается ряд задач в области контроля и диагностирования насосных установок, решение которых возможно путем реализации СКид, анализирующих информативные параметры электрических сигналов. При этом повышается значимость вопросов технического, алгоритмического и программного обеспечения таких систем.

Целью диссертационной работы является исследование электрических сигналов на входе насосных установок на предмет выявления информационных признаков для задач контроля и диагностики, разработка алгоритмического и программного обеспечения СКид, решение технических вопросов и реализация СКид в виде программных и программно-аппаратных комплексов.

Для достижения указанной цели требуется решить следующие задачи:

1. Провести анализ существующих измерительных преобразователей, и произвести выбор достаточно близких к оптимальным решений для комплексов контроля состояния насосных установок;
2. Провести анализ существующих способов контроля уравновешенности станков – качалок, в частности исследовать и сопоставить между собой различные критерии уравновешенности – по изменению среднеквадратичных отклонений (СКО) электрических параметров; по отношению гармонических составляющих электрических параметров и т.п.;
3. Разработать алгоритмическое и программно – техническое обеспечение для программно-аппаратного комплекса контроля уравновешенности станков – качалок;
4. Рассмотреть возможности спектрального анализа электрических сигналов на входе ЭЦНУ в СКид, для чего исследовать спектральные образы электрических сигналов на предмет наличия характерных диагностических признаков неисправностей оборудования;
5. Разработать алгоритмическое и программное обеспечение для спектрального анализа электрических сигналов на входе ЭЦНУ.

Методы исследований. Для решения поставленных в работе задач используются: теория машин и механизмов, обработки информации с помощью ЭВМ, численного анализа экспериментальных данных, гармонического и спектрального анализа, математического моделирования объекта и современные программные средства. В работе экспериментальные исследования на реальных объектах сочетались с вычислительными экспериментами.

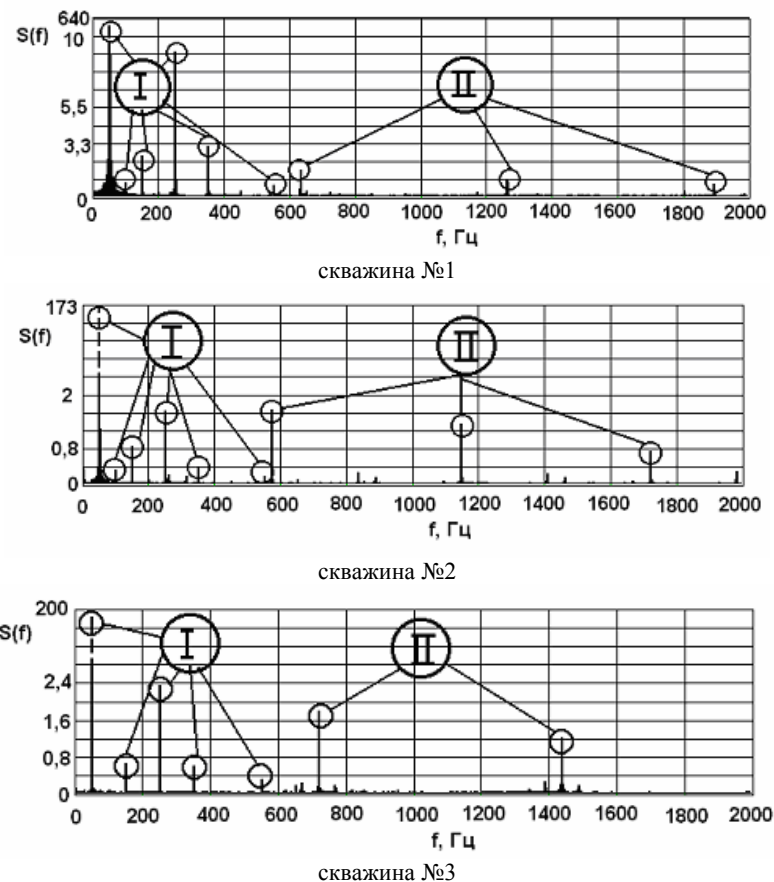


Рис. 11. Спектральная плотность электрического тока на входе ЭЦНУ

Здесь скважины условно обозначены номерами 1,2,3; частоты на рисунке разделены на две группы – частоты кратные основной частоте питания сети (группа I) и частоты ей не кратные (группа II). Легко видеть, что уровень первой гармоники ($f=50$ Гц) во много раз выше уровня гармоник второй группы частот, однако уровни всех остальных гармоник группы I вполне соизмеримы с уровнями гармоник группы II. Причем в группе II можно выделить свою основную частоту, и частоты кратные ей (для скважины №1 – $f_{II} = 631$ Гц; для скважины №2 – $f_{II} = 573$ Гц; для скважины №3 – $f_{II} = 721$ Гц).

Механизм появления гармоник I группы общеизвестен – проявляется влияние нелинейности потребителей электрической энергии, в результате чего даже при синусоидальном напряжении источника питания ток содержит нечетные гармоники с частотами $f=kf_1$, где $k=3,5,7,\dots$

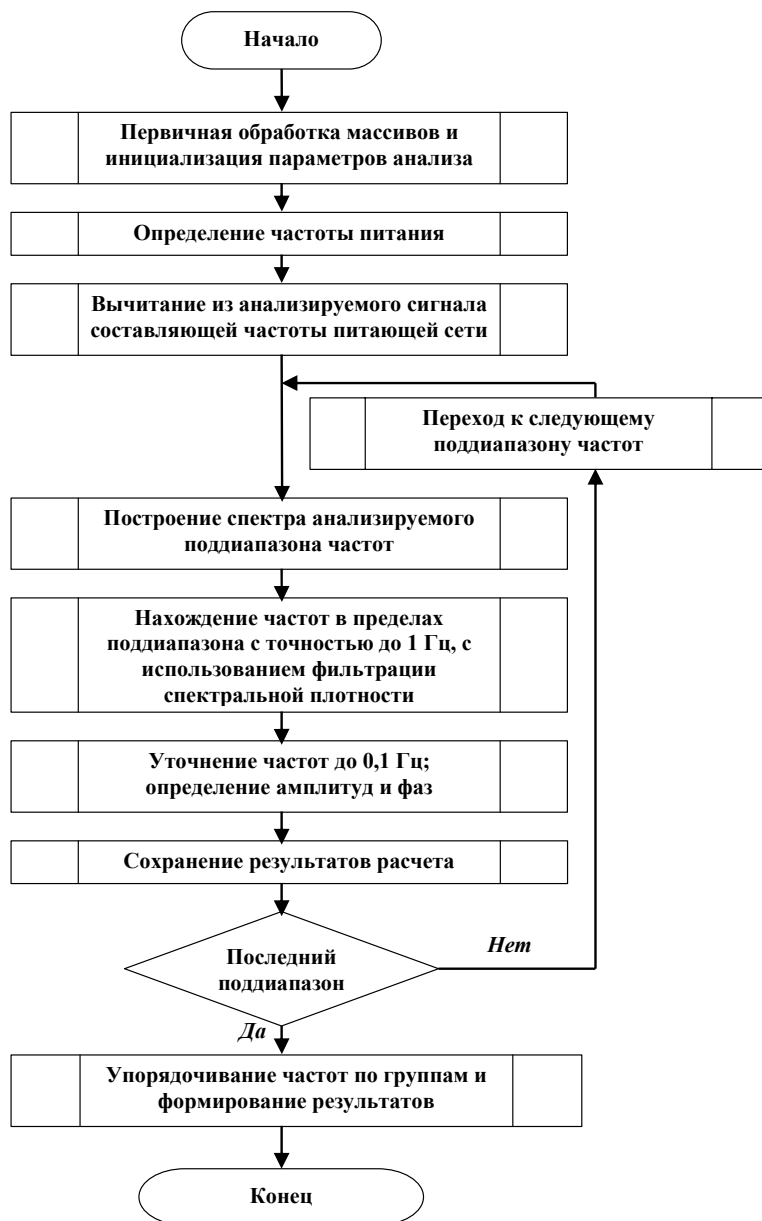


Рис. 10 Блок – схема алгоритма обработки сигналов на входе ЭЦНУ

Научная новизна полученных в работе результатов состоит в следующем:

- разработаны новые, ранее неизвестные способы контроля уравниваемости СК по значениям среднеквадратичных отклонений электрических параметров [1] и по отношениям гармонических составляющих электрических параметров [2,3];
- развит метод мгновенной спектральной плотности и разработаны новые процедуры определения амплитуд и фаз частотных составляющих на входе ЭЦНУ [4,5];
- выявлена группа частот в электрических сигналах на входе ЭЦНУ; которая потенциально может быть использована как диагностический признак состояния ЭЦНУ;

Практическая ценность работы состоит в том что:

- разработано алгоритмическое и программно – техническое обеспечение для программно-аппаратного комплекса контроля уравниваемости станков – качалок по характеристикам СКО и отношениям гармонических составляющих. Часть результатов работ по исследованию контроля уравниваемости станков качалок внедрена в виде программно-аппаратного комплекса (ООО ТНПВО «СИАМ», г.Томск);
- разработано алгоритмическое и программное обеспечение для спектрального анализа электрических сигналов на входе ЭЦНУ с выявлением отдельных групп частот. Выявленные особенности спектральных портретов электрических сигналов могут быть использованы при построении СКД ЭЦНУ.

Апробация работы. Основные научные и положения результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: Научно-технической конференции "Электронные и электромеханические системы и устройства" (Томск, 2000); VI и VII Всероссийских научно-технических конференциях "Энергетика: экология, надежность, безопасность" (Томск, 2000, 2001); VII и IX Международных научно-практических конференциях "Современные техника и технологии" (Томск, 2002, 2003); Международной научно-технической конференции «Энергетика, экология, энергосбережение, транспорт.» (Тобольск, 2004). Работа прошла апробацию и частично внедрена в ТНПВО «СИАМ» в виде программно-аппаратного комплекса контроля уравниваемости станков – качалок ШГНУ. Промысловые испытания на Советском нефтяном месторождении (Томская обл. г. Стрежевой) показали высокую достоверность результатов.

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 8 печатных работ, получено 4 патента.

Структура работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 114 страницах машинописного текста, содержит 67 рисунков, 12 таблиц, 2 приложения. Список литературы включает 152 наименования. Приложения занимают 4 страницы и содержат: таблицы, графики, подтверждающие изложенные в диссертации положения; акт о внедрении результатов диссертационной работы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой в диссертационной работе проблемы, определены цель и задачи исследования, выделены основные положения, отражающие новизну и практическую значимость работы.

В первой главе рассмотрены объекты контроля, их конструктивные особенности, особенности эксплуатации и физических процессов. Проведен аналитический обзор существующих методов и систем контроля и диагностики штанговых и центробежных насосных установок. Выявлена потребность в создании систем контроля и диагностики насосных установок без перерыва их эксплуатации; показана перспективность анализа информации, содержащейся в электрических сигналах на входе электропривода установок. Рассмотрены особенности обработки цифровых отсчетов в программно-аппаратных комплексах для контроля насосных установок по электрическим параметрам. На основе обзора и анализа развернуты и детализированы задачи, решаемые в диссертации.

Во второй главе рассмотрен вопрос контроля уравниваемости станка-качалки ШГНУ. Проведен анализ кинематической схемы станка-качалки, выдвинуты гипотезы относительно особенностей кривой момента на валу электродвигателя; распространены эти гипотезы на кривые электрических параметров. Описаны экспериментальные исследования, проведенные на нефтепромыслах. Рассмотрены основные этапы получения входных параметров и характеристик ШГНУ на основе измерения электрических параметров (рис.6).

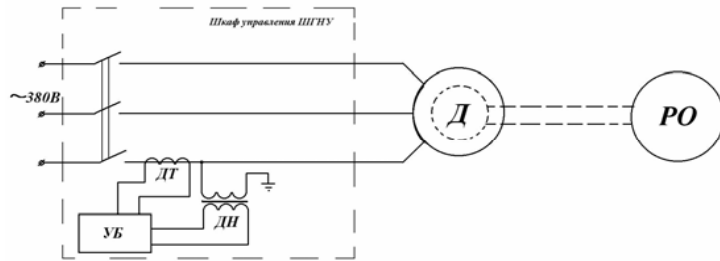


Рис. 6 Схемы измерения входных электрических параметров

Здесь: Д – асинхронный электродвигатель; РО – рабочий орган (совокупность конструктивных элементов, связанных с валом электродвигателя); датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН); управляющий блок (УБ).

С помощью Дт и ДН измеряются мгновенные значения тока ($i(t)$) и напряжения ($u(t)$); затем они оцифровываются в блоке управления аналого-цифровым преобразователем с дискретностью 0,01с. В блоке управления рассчитываются: мгновенные значения активной мощности

$$p(t) = i(t) \cdot u(t); \quad (2)$$

массивы действующих значений тока I_k (А), напряжения U_k (В) и активной мощности P_k (Вт) соответственно.

1	2	3
4	Из исходного сигнала вычитается определенная частотная составляющая 52Гц.	$x'(t) = x(t) - 19,12 \cdot \sin(2\pi \cdot 52,0t + 74,06^\circ);$
5	Заново определяются параметры частотной составляющей 50.5Гц.	$A=100,14 \text{ ед. } \omega=2\pi \cdot 50,5 \text{ с}^{-1}. \varphi=115,07^\circ.$
6	Из исходного сигнала вычитается определенная частотная составляющая 50,5Гц.	$x'(t) = x(t) - 100,14 \cdot \sin(2\pi \cdot 50,5t + 115,07^\circ);$
7	Определяются параметры частотной составляющей 52Гц.	$A=19,96 \text{ ед. } \omega=2\pi \cdot 52,0 \text{ с}^{-1}. \varphi=74,02^\circ.$

Максимальная ошибка определения амплитуды составила 0,2%, фазы – 0,3%; что значительно меньше, чем спектральная оценка на первом шаге.

Для оценки точности расчетов использовались известные показатели: максимальная абсолютная погрешность (δy_i); показатель сигнал/шум ($P_{сш}$): среднеквадратичное отклонение ($СКО$); разность действующих значений (δA_d).

$$\delta y_i = y_{i"И"} - y_{i"Р"}; \quad P_{сш} = \frac{[A'_d]_p}{СКО}; \quad \delta A_d = A_{ди} - A_{др}; \quad (17)$$

где y_i – мгновенные значения массивов: исходного «И» (анализируемого) и расчетного «Р»; $[A'_d]_p$ – действующее значение расчетного сигнала; $A_{ди}$, $A_{др}$ – действующие значения исходного и расчетного сигналов соответственно.

При диагностировании ЭЦНУ предлагается подход, отличающийся сбором спектральных образов исправных и неисправных электромеханических систем и сопоставлением образа диагностируемого ЭЦНУ с образцовым; при таком подходе можно выделить следующие основные этапы:

1. Определение образцового значения диагностического параметра (на начальной стадии эксплуатации объекта контроля) в виде определенного спектрального портрета;
2. Проведение мониторинга (постоянный или периодический контроль диагностического параметра);
3. Получение диагноза функционального состояния объекта контроля, на основе сравнительного анализа полученного диагностического параметра с образцовым.

Алгоритм обработки (см. рис.10) обеспечивает автоматизированную обработку спектральных портретов с выделением информативных периодичностей на всех этапах диагностики. Результаты использования предложенного алгоритма приведены на рис.11.

где ω_k - частота, определенная методом МСП (10,11); $S_1(\varphi)$, $S_2(\varphi)$ - синусная и косинусная составляющие преобразования соответственно; $a(t)$ - анализируемая зависимость; N_r - длина массива при преобразовании (окно наблюдения); φ - начальная фаза, град.

Амплитуда спектральной составляющей определяется через максимальное значение любой из синусоид преобразования (12) при предварительно найденной частоте

$$Am_{\omega_k} = \frac{2 \cdot \max(S_1(\varphi_j))}{N_r} = \frac{2 \cdot \max(S_2(\varphi_j))}{N_r}, \quad (13)$$

где Am_{ω_k} - амплитуда спектральной составляющей с частотой ω_k .

Затем по (14) из 4-х полей функций φ' методом наименьших квадратов определяется начальная фаза φ_k спектральной составляющей с частотой ω_k .

$$\Delta_{\varphi'} = \sqrt{\sum_{i=0}^{N_r-1} \frac{(a(t_i) - Am_{\omega_k} \cdot \sin(\omega_k \cdot t_i + \varphi'))^2}{N_r}}; \quad \varphi_k = \varphi', \min(\Delta_{\varphi'}); \quad (14)$$

Вычисления (12÷14) следует проводить при уточненной, с точностью до 0,1Гц, частоте для каждой из анализируемых спектральных составляющих.

Для примера рассмотрим случай (15).

$$x(t) = 100 \cdot \sin(2\pi \cdot 50t + 25^\circ) + 20 \cdot \sin(2\pi \cdot 150t + 47^\circ); \quad (15)$$

В результате преобразования получим.

$$A_{50} = 100,004347 \rightarrow 100,0 \text{ ед. и } A_{150} = 20,008035 \rightarrow 20,0 \text{ ед.}$$

$$\varphi_{150} = 25,005833 \rightarrow 25,0^\circ; \quad \varphi_{250} \rightarrow 115,0^\circ; \quad \varphi_{350} \rightarrow 205,0^\circ; \quad \varphi_{450} \rightarrow 295,0^\circ;$$

$$\varphi_{150} = 47,021981 \rightarrow 47,0^\circ; \quad \varphi_{2150} \rightarrow 137,0^\circ; \quad \varphi_{3150} \rightarrow 227,0^\circ; \quad \varphi_{4150} \rightarrow 317,0^\circ;$$

Для автоматизированного анализа спектральных портретов разработаны алгоритмы прямого (независимого) определения параметров частотных составляющих сложного сигнала (16) с вычитанием рассчитанных частотных составляющих того же сигнала. Результаты работы алгоритма с вычитанием рассчитанных частотных составляющих представлены в таблице 1.

$$x(t) = 100\sin(2\pi \cdot 50,5t + 115^\circ) + 20\sin(2\pi \cdot 52t + 74^\circ) \quad (16)$$

Таблица 1 Результаты расчетов для тестового сигнала

№	Действие	Результат
1	2	3
1	Определяются параметры частотной составляющей 50,5Гц.	$A=102,84 \text{ ед. } \omega=2\pi \cdot 50,5 \text{ с}^{-1}. \varphi=116,75^\circ.$
2	Вычитается определенная частотная составляющая 50,5Гц.	$x'(t) = x(t) - 102,84 \cdot \sin(2\pi \cdot 50,5t + 116,75^\circ);$
3	Определяются параметры частотной составляющей 52Гц.	$A=19,12 \text{ ед. } \omega=2\pi \cdot 52,0 \text{ с}^{-1}. \varphi=74,06^\circ.$

$$I_k = \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} \frac{i_l^2(t)}{L}}; \quad U_k = \sqrt{\sum_{l=0}^{L-1} \frac{u_l^2(t)}{L}}; \quad P_k = \frac{1}{L} \cdot \sum_{l=0}^{L-1} p_l(t) \quad (3)$$

где L – число отсчетов на периоде промышленной частоты 50Гц;

Далее определяют действующие значения полной (S_k) и реактивной (Q_k) мощности; полное (Z_k), активное (R_k) и реактивное (X_k) сопротивления; значения угла (фазы) (φ_k).

$$\left. \begin{aligned} S_k &= U_k \cdot I_k; \quad Q_k = \sqrt{S_k^2 - P_k^2}; \quad \varphi_k = \arccos\left(\frac{P_k}{S_k}\right); \\ Z_k &= \frac{U_k}{I_k}; \quad R_k = Z_k \cdot \cos \varphi_k; \quad X_k = Z_k \cdot \sin \varphi_k; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

По результатам расчета получают зависимости (см. рис.7): $S(t)$ – вольтамперметрограмма – зависимость полной мощности от времени; $Q(t)$ – варметрограмма – зависимость реактивной мощности от времени; $\varphi(t)$ – фазограмма – зависимость фазы (угла между током и напряжением) от времени; $Z(t)$ – омметрограмма – зависимость входного сопротивления от времени, представленные на рис.7.

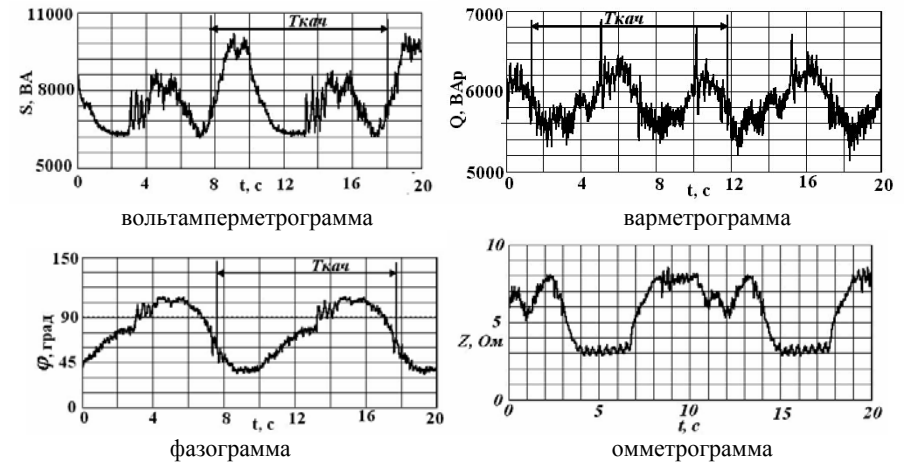


Рис. 7 Входные характеристики ШГНУ

Рассмотрены вопросы использования среднеквадратичных отклонений и отношений гармонических составляющих электрических параметров на входе ШГНУ при контроле уравновешенности станка – качалки по формулам для СКО (5,6,9) и решающим правилам (7,8).

$$Y_{CP} = \sum_{j=1}^{N_T} \frac{y_j(t)}{N_T}; \quad \sigma'_Y = \sqrt{\sum_{j=1}^{N_T} \frac{(y_j(t) - Y_{CP})^2}{N_T}}; \quad \sigma_Y = \frac{\sigma'_Y}{Y_{CP}} \cdot 100\%; \quad (5)$$

Здесь Y_{CP} – среднее значение параметра; σ'_Y – средноквадратичное отклонение параметра; σ_Y – средноквадратичное отклонение параметра (о.е.).

$$\bar{\sigma}_Y = \frac{1}{(\sigma_Y)_{\mathcal{E}T}} \cdot \left(\frac{\sigma_Y - (\sigma_Y)_{\mathcal{E}T}}{R_Y - (R_Y)_{\mathcal{E}T}} \right) \cdot 100\%; \quad (6)$$

$\bar{\sigma}_Y$ – приведенное СКО; $(\sigma_Y)_{\mathcal{E}T}$, $(R_Y)_{\mathcal{E}T}$ – эталонные СКО и положение противовесов соответственно; σ_Y , R_Y – СКО и положение противовесов соответственно (см. рис.1).

Критерии уравновешенности по средноквадратичному отклонению:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_X}{(\sigma_X)_{\mathcal{E}T}} < 1; \quad \sigma_X \leq (\sigma_X)_{\mathcal{E}T}; \quad (7)$$

где X – любой электрический параметр; σ_X и $(\sigma_X)_{\mathcal{E}T}$ – измеренное и эталонное значения СКО, соответственно; K_σ – критерий уравновешенности СК по СКО;

Эталонное значение $(\sigma_X)_{\mathcal{E}T}$ определяется для каждой скважины индивидуально.

Критерий уравновешенности по отношению гармонических составляющих:

$$K_{GC} = \frac{X_2}{X_1} > 1; \quad (8)$$

где X – любой электрический параметр; X_2 и X_1 – вторая и первая гармоники, соответственно; K_{GC} – критерий уравновешенности СК по гармоническим составляющим. Здесь первая и вторая гармоники – это соответствующие члены результирующего полинома дискретного преобразования Фурье (9) анализируемой зависимости.

$$\left. \begin{aligned} a_v &= \frac{2}{N_T} \cdot \sum_{j=0}^{N_T-1} y_j(t) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{N_T} \cdot \Delta t \cdot j\right); \quad b_v = \frac{2}{N_T} \cdot \sum_{j=0}^{N_T-1} y_j(t) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot v}{N_T} \cdot \Delta t \cdot j\right); \\ a_0 &= \frac{1}{N_T} \cdot \sum_{j=1}^{N_T} y_j(t); \quad Am_v = \sqrt{a_v^2 + b_v^2}; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

где v – номер гармонической составляющей (гармоники); a_v , b_v – косинусная и синусная составляющие v -ой гармоники соответственно; Am_v – амплитуда v -ой гармоники; a_0 – постоянная составляющая сигнала; $y_j(t)$ – анализируемая зависимость (цифровой массив); N_T – число отсчетов на периоде качания; Δt – интервал дискретизации времени (0,02с.).

В результате исследования было выявлено, что уравновешенному состоянию СК соответствуют: максимальное значение отношения второй гармоники к первой любого электрического параметра; минимальное значение СКО, при этом средние значения тока и мощности стремятся к своему наименьшему значения, а сопротивления – к

наибольшему. Наиболее чувствительными к степени уравновешенности являются полное сопротивление и полная мощность.

Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие достоверность предлагаемых способов контроля уравновешенности приведены на рис. 8 и 9.

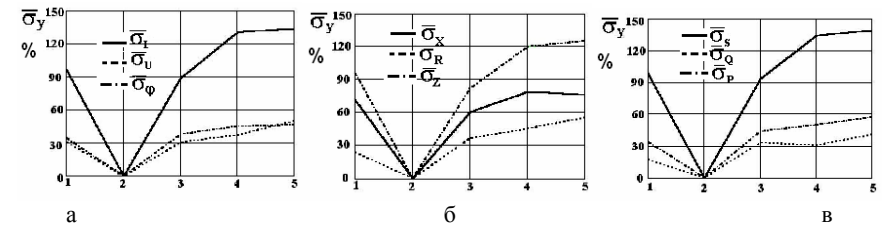


Рис.8 Приведенные СКО электрических параметров для скважины №850

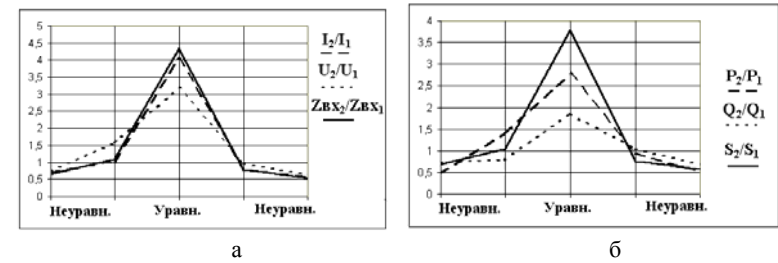


Рис.9 Отношение гармонических составляющих для скважины №1600

В третьей главе развивается известный метод мгновенной спектральной плотности (ММСП).

$$\left. \begin{aligned} S_1(\omega_j) &= \sum_{i=0}^{N_u-1} a(t_i) \cdot \sin(\omega_j \cdot t_i); \quad S_2(\omega_j) = \sum_{i=0}^{N_u-1} a(t_i) \cdot \cos(\omega_j \cdot t_i); \\ S(\omega_j) &= \sqrt{S_1^2(\omega_j) + S_2^2(\omega_j)}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

где: ω – угловая частота, рад/с; $S_1(\omega)$, $S_2(\omega)$ – синусная и косинусная составляющие преобразования соответственно; $S(\omega)$ – мгновенная спектральная плотность; N_u – длина массива при преобразовании (окно наблюдения). Значение искоемых частот спектрального портрета ЭЦНУ определяется через локальный максимум спектральной плотности:

$$\omega_k = \max(S(\omega_j)); \quad (11)$$

Рассматривается новый подход для определения амплитуд и фаз частотных составляющих спектральной плотности.

$$S_1(\varphi_j) = \sum_{i=0}^{N_u-1} a(t_i) \cdot \sin(\omega_k \cdot t_i + \varphi_j); \quad S_2(\varphi_j) = \sum_{i=0}^{N_u-1} a(t_i) \cdot \cos(\omega_k \cdot t_i + \varphi_j); \quad (12)$$