Б.Н.Абрамович, А.Е.Козярук, Р.М.Проскуряков, В.В.Рудаков, О.Б.Шонин

УДК 621.313

ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ГОРНОЙ И НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Рассмотрены основные направления научных исследований 2000 г. в области создания электротехнических комплексов для горной и нефтегазовой промышленности: внедрение для горных машин и механизмов бесконтактных регулируемых электроприводов с алгоритмами управления, обеспечивающими повышение производительности и энергосбережения; разработка электротехнологий и специальных технических средств для выполнения горных работ; разработка автоматизированных электротехнических комплексов и систем на основе внедрения микропроцессорных аппаратных средств; разработка, создание и внедрение компьютерных технологий контроля и автоматизированного управления электропотреблением, а также адаптации новейших видов электрооборудования, обеспечивающих повышение надежности и экономичности электротехнических комплексов; разработка и внедрение в условиях нефтедобывающих комплексов концепции и алгоритмов управления электропотреблением; разработка систем автоматического управления многофункциональными резонансными преобразователями поворотно-угловых перемещений с различными частотами и амплитудами движения; применение прямых методов электротехнологии, основанных на электротермомеханическом преобразовании энергии электрического поля непосредственно в горной породе для получения технологического эффекта; разработка автоматических и автоматизированных систем электротехнических комплексов, которые могут проектироваться и развиваться как самостоятельные системы различного назначения.

In the article the main directions of the 2000 year scientific research in the field of creating electrotechnical complexes for mining oil gas industries are considered. They are: the application of non-contact regulated power drive with control algorithms for mining machines and mechanisms, providing productivity and energysaving increase development of electrotechnologies and special technical means for mining work development of automatized electrotechnical complexes and systems on the basis of microprocessor hardware introduction; design, development and introduction of computer technologies and automatized power consumption control and new electric types adaptation that provide electrotechnical complexes reliability and economy increase; development and introduction of usage control conception and algorithms in oil-extracting complexes; development of automatic control system for multifunctional resonance rotary angle converters with motion of different frequency and amplitude; application of direct electrotechnology methods based on electromechanic transportation of electric field energy in rock proper for obtaining technological effect development electrotechnical complexes automatic and automatized systems, that may be designed and evolved as autonomous systems for various purposes.

* * *

Эффективность ведения горных работ определяется уровнем технологии и техническими показателями горных машин и механизмов. Современный подход к проектированию технологических машин характеризуется широким использованием регулируемых электромеханических приводных систем с высоким уровнем автоматизации управления и электротехнологий. Проблема энергосбережения в первую очередь также решается за счет использования электротехнических устройств, обеспечивающих рациональное управление электропотреблением, и электромеханических устройств, обеспечивающих реализацию энергосберегающих технологий.

Научные исследования в течение 2000 г. в области создания эффективных электротехнических комплексов проводились по следующим основным направлениям:

- внедрение для горных машин и механизмов бесконтактных регулируемых элек-

троприводов с алгоритмами управления, обеспечивающими повышение производительности и энергосбережения при проведении горных работ;

• разработка электротехнологий и специальных технических средств для выполнения отдельных видов горных работ;

• разработка высокоавтоматизированных электротехнических комплексов и систем на основе внедрения микропроцессорных аппаратных средств.

По первому направлению продолжены исследования по замене электроприводов постоянного тока, используемых в основных горных механизмах (экскаваторах, буровых станках, забойных машинах, конвейерах, транспортных установках и пр.) на более надежные, имеющие улучшенные эксплуатационные показатели и динамические характеристики бесконтактные регулируемые электроприводы с асинхронными, вентильными и вентильно-реактивными двигателями.

Современный этап развития мировой и отечественной силовой электротехники характеризуется созданием и промышленным освоением полностью управляемых силовых полупроводниковых элементов (IGBT, запираемые тиристоры и др.) и силовых модулей на их базе, обеспечивающих создание силовых полупроводниковых преобразователей мощностью до 5 мВт [1].

Использование микропроцессорных аппаратных средств управления полупроводниковым преобразователем и электротехническим комплексом в целом позволяет реализовать сложные и эффективные алгоритмы управления, обеспечивающие наилучшие динамические и энергетические характеристики электроприводов, а значит и рабочих механизмов.

Основные результаты исследований по этому направлению относятся к сравнительному анализу эффективных алгоритмов управления бесконтактными электроприводами переменного тока и выработке рекомендаций по их использованию.

Системы автоматического регулирования электроприводом переменного тока с разрывным управлением («системы с прямым управлением момента» ДТС).

Во второй половине 80-х годов лимитирующим звеном в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе с точки зрения улучшения статических и динамических характеристик оказались алгоритмы функционирования системы управления и САР электропривода, а также аппаратные средства их реализации. В конце 1995 г. на рынке появились приводы нового типа, по всем показателям не уступающие электроприводам постоянного тока, а по некоторым показателям статических и динамических характеристик и превосходящие.

Примером могут служить электроприводы типа ACS-600 фирмы ABB [2]. Электропривод отрабатывает стопроцентный скачок задания момента за 1-2 мс, обеспечивает точное регулирование момента при низких частотах, включая и нулевую скорость; точность поддержания скорости равна 10 % скольжения АД без использования датчика скорости и 0,01 % с использованием датчика скорости.

Главной особенностью новых алгоритмов управления в электроприводах третьего поколения является использование методов разрывного управления. В отечественной практике высокодинамичные системы разрывного управления асинхронным электроприводом предложены Ивановским энергетическим институтом.

В мировой практике такие системы (рис.1) получили наименование «системы с прямым управлением момента» (ДТС). Такое управление наиболее пригодно для электроприводов тяговых механизмов (электровозов, транспортных систем, электроприводов горных машин и др.).

Основные свойства САУ, оптимизируемых с использованием методов управления в скользящем режиме:

• системы являются реализацией глубокой обратной связи по регулируемым координатам;

• порядок управления движения понижается;

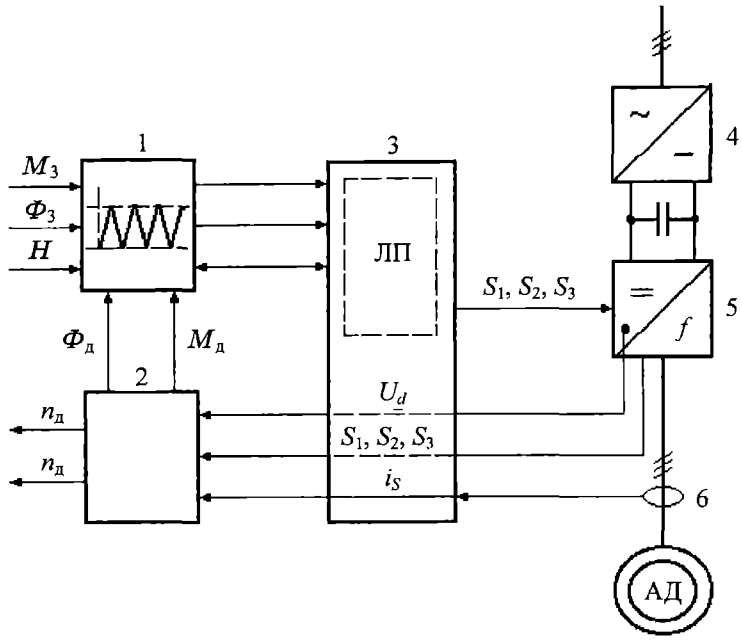


Рис.1. Блок-схема «прямого управления моментом»

1 – устройство прямого гистерезисного управления моментом и потоком; 2 – модель двигателя (расчет параметров и реальных величин переменных АД); 3 – аппаратные средства реализации оптимальной логики переключений; 4 – силовой выпрямитель; 5 – автономный инвертор напряжения; 6 – датчики тока статора двигателя; $M_з$, $Ф_з$ – задание момента и потока; $n_д$, $f_д$, $M_д$, $Ф_д$ – действительные величины скорости, частоты, момента и потока; U_d – входное напряжение автономного инвертора; S_1, S_2, S_3 – состояние ключей инвертора; i_s – токи статора АД, H – ограничение порогов гистерезиса

• грубость к неточности информации о постоянных времени и коэффициентах усиления, а также к возмущениям;

• при построении идентификаторов состояния высокая точность, быстродействие и инвариантность к изменениям параметров объекта и возмущениям;

• в системах с векторным управлением осуществляется синтез двухмерных скользящих режимов.

САУ, синтезированная с применением методов, учитывающих нелинейный характер объекта управления и разрывный характер процессов в силовом преобразователе, обеспечивает:

• упрощение алгоритма синтеза из-за отсутствия необходимости организации сигналов, компенсирующих внутренние перекрестные обратные связи объекта;

• инвариантность к внешним и параметрическим возмущениям, благодаря чему просто решаются проблемы идентификации постоянной времени ротора и точности углового положения опорного вектора Ψ_r;

• слияние задач организации САУ частотно-управляемым АД и ШИМ – управлением автономного инвертора.

Рассмотрим особенности реализации частотно-управляемых АД с использованием теории систем с разрывным управлением и принципов синтеза полеориентированных систем (в осях вектора потокосцепления ротора).

Основные элементы блок-схемы:

1. Блок быстродействующих микропроцессоров (DSP). В блоке осуществляется регулирование в скользящем режиме вектора Ψ_s потокосцепления статора и момента M двигателя по значениям вводимых в него заданных и действительных величин;

2. Модель АД, в которой через каждые 25 мкс осуществляется вычисление потока статора и момента по введенной информации: токам двух фаз статора АД, напряжению цепи постоянного тока и положению «ключей» АИН. В этом блоке производится вычисление скорости АД и частоты выходного тока АИН. Модель АД формирует сигналы обратных связей по регулируемым параметрам.

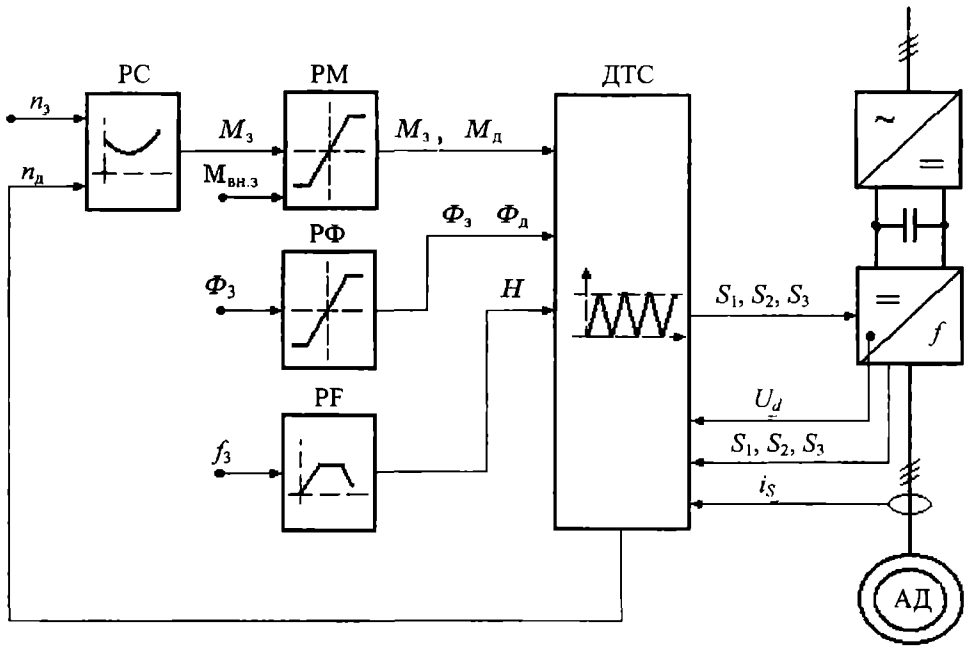


Рис.2. Функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе ДТС

РС – ПИД-регулятор скорости; РМ, РФ – регуляторы задания момента $M_з$ и потока $Ф_з$; PF – регулятор частоты переключений; $M_{вн.з}$ – внешнее задание момента; ДТС – система прямого управления моментом

3. Быстродействующий логический автомат, переключающий «ключи» автономного инвертора в функции «оптимизации» вектора выходного напряжения АИН по предельным отклонениям момента и потока статора, определяемым соответствующими настройками петли гистерезиса.

Таким образом, организация ШИМ-управления осуществляется в функции заданных переменных электромагнитного состояния АД. В такой структуре объединяется задача ШИМ-управления и САУ моментом.

На рис.2 представлена функциональная схема частотно-регулируемого асинхронного электропривода на базе ДТС.

Все устройства на рис.2 реализуются микропроцессорными средствами. С учетом динамических характеристик звена регулирования момента ДТС регулятор скорости синтезируется как ПИД-регулятор, чем достигается высокое быстродействие по контуру скорости и статическая точность регулирования.

Выход регулятора скорости включен каскадно с устройствами задания и ограничения момента. Функционально регулятор скорости включает устройство для задания темпа разгона и замедления.

САУ снабжена устройством независимого задания потока статора, что позволяет реализовать управление с ослаблением потока, или заданием потока, обеспечивающего минимизацию потерь.

Воспользовавшись техническими характеристиками ряда электроприводов третьего поколения ACS 600 [2], приведем сравнительные характеристики электроприводов с различными типами САУ

Можно сделать вывод, что принцип «прямого управления моментом» ДТС обеспечивает высокое качество управления даже без использования датчика скорости и может быть рекомендован для реализации САУ электроприводом переменного тока транспортных машин и установок для тяжелых условий эксплуатации.

Построение системы автоматического управления методами нечеткой логики.

Нечеткая логика или, как принято в литературе, FUZZY-логика находит все более широкое распространение при создании систем автоматического управления различными технологическими процессами, в том

числе и при построении систем автоматического управления электроприводами.

Область применения систем с FUZZY-регуляторами – это, прежде всего, управление объектами, строгое математическое описание которых методами классической математики затруднительно или практически невозможно. Как было показано выше, частотно-регулируемый асинхронный электропривод с системой векторного управления в значительной мере попадает под такое определение.

Структурно FUZZY-регулятор состоит из трех элементов, выполняющих последовательно следующие операции: фаззифицирование; фаззи-логическое преобразование; дефаззифицирование.

Под фаззифицированием понимается превращение наблюдаемых (т.е. измеренных) четких значений переменных в категории нечеткой логики. Другими словами, полученные с определенной точностью четкие значения переменных переводятся на язык нечетких множеств, и любая степень принадлежности μ_i определяется далее уже этим нечетким множеством. Таким образом определяется, в какой степени измеренное или вычисленное значение переменных состояния имеет определенное множеством качество или свойство. При построении системы FUZZY-регулирования асинхронного электропривода в качестве исходных данных следует использовать ошибку регулирования потокосцепления и электромагнитного момента.

Собственно задача FUZZY-логического регулирования решается путем FUZZY-логических преобразований. Полученные при фаззифицировании исходные данные в виде нечетких множеств, функций принадлежности и степеней принадлежности элементов множеств на основе логических операций ЕСЛИ <предусловие>, ТОГДА <результат> поступают в вычислитель. FUZZY-логические вычисления выполняются с применением операций И, ИЛИ, НЕ и т.д., в результате чего получается решение задачи в категориях нечеткой логики.

Для получения четких значений вычисленных величин выполняется обратная операция – дефаззифицирование. На вход блока дефаззифицирования подаются вычисленные функции принадлежности, а на выходе получаются численные значения переменных, т.е. управляющих воздействий. Существует несколько методов дефаззифицирования. При-

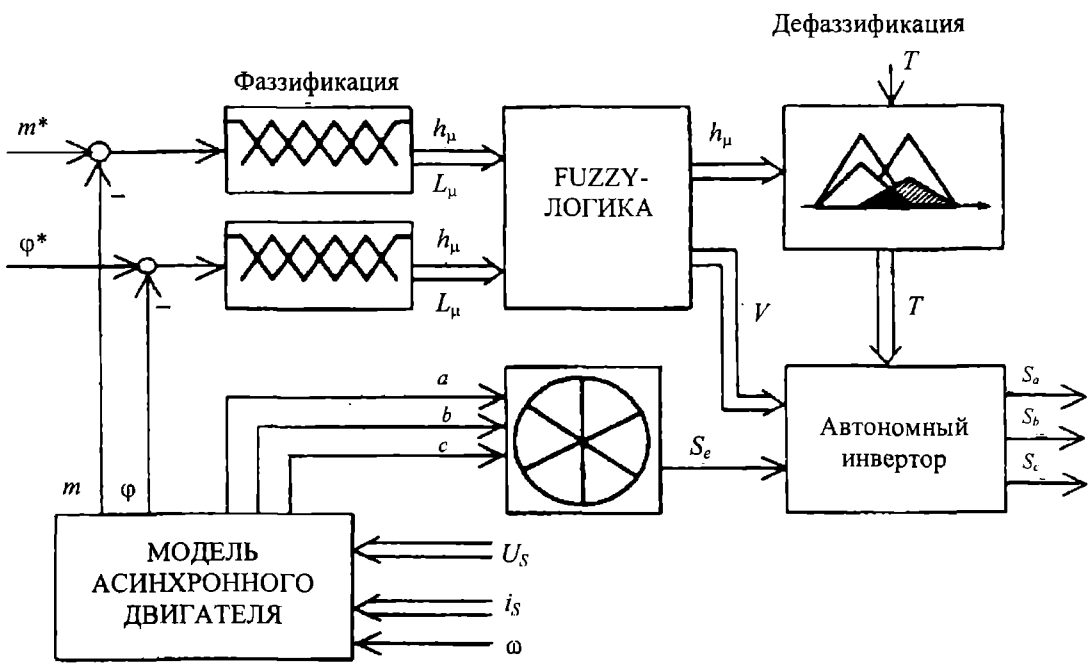


Рис.3. Блок-схема FUZZY-регулятора асинхронного привода

менительно к системе FUZZY-регулирования асинхронным электроприводом наиболее подходящим является метод центра тяжести. Он основан на том, что в качестве выходной величины используется центр тяжести плоской фигуры результирующего множества.

Основная трудность при реализации классической системы векторного регулирования состоит в том, что в системе присутствует постоянная ошибка из-за неточности измерения наблюдаемых параметров и, как следствие, ошибка вычислений ненаблюдаемых параметров. Причем эти ошибки имеют свойство накапливаться. В системе FUZZY-регулирования для того, чтобы исключить ошибку, возникающую из-за неточности наблюдающей модели, используется относительно простой способ. Он основан на применении упреждающего выхода по трем составляющим потокосцепления (рис.3). В результате фазовую плоскость в неподвижной системе координат (α, β) оказывается возможным разделить на шесть секторов. Реализация такого FUZZY-регулирования может быть выполнена на обычном 16-битовом микроконтроллере, например, контроллере типа SAB80C166 с фиксированной запятой. При этом параллельно с FUZZY-регулятором должна действовать математическая модель асинхронного двигателя, реализованная, например, на персональном компьютере класса PC. Основным требованием к нему является малое тактовое время (менее 10^{-6} с). Таким образом, при построении FUZZY-структуры можно отказаться от сложных вычислительных алгоритмов, которые неизбежно присутствуют в классических схемах, и решить задачу регулирования более простыми методами.

Научные исследования в 2000 г. в области электроснабжения горно-добывающих и перерабатывающих комплексов проводились в направлении разработки, создания и внедрения компьютерных технологий контроля и автоматизированного управления электропотреблением, а также адаптации новейших видов электрооборудования, обеспечивающих повышение надежности и экономичности электротехнических комплексов.

Разработана и внедрена в условиях нефтедобывающих комплексов концепция и алгоритмы управления электропотреблением, предусматривающие приближение режима потребления электроэнергии к энергетически оптимальному для принятой системы разработки месторождений. Реализация такой концепции управления достигается путем определения рациональных дифференцированных групповых норм расхода электрической энергии на добычу нефти для отдельных НГДП, непрерывного контроля в пределах планируемого периода фактического удельного расхода электроэнергии, сравнения фактического удельного расхода с рациональной групповой нормой и в случае их отличия выдачи рекомендаций по проведению энергосберегающих мероприятий, обеспечивающих приближение фактического потребления к рациональному. При автоматизированном управлении электропотреблением предполагается, что режимы напряжения и реактивной мощности оптимизированы или близки к оптимальным.

Реализация предложенной концепции предполагает минимизацию целевой функции:

$$F_1(\omega) = W_{\text{ф}} - W_{\text{опт}} \rightarrow \min,$$

или

$$F_2(\omega) = W_{\text{ф}} - W_{\text{опт}} \rightarrow \min$$

при ограничениях:

$$t_{\text{зп}} \le t_{\text{рп}},$$

$$G_1 \le G_{1\text{пл}};\ G_2 \ge G_{2\text{пл}};\ G_3 \ge G_{3\text{пл}};$$

$$G_4 \le G_{4\text{пл}};\ G_5 \ge G_{5\text{пл}};\ G_6 \ge G_{6\text{пл}},$$

где $W_{\text{ф}}$ и $W_{\text{опт}}$ массивы фактического и оптимального расхода электроэнергии по НГДК за заданный период;

$$W_{\text{ф}} = \sum_{j=1}^{N} W_j^{\text{ф}} \qquad W_{\text{опт}} = \sum_{j=1}^{N} W_j^{\text{опт}}$$

N – число НГДП в составе НГДК; $W_{\text{ф}}$ и $W_{\text{опт}}$ – массивы фактических и оптимальных удельных расходов электроэнергии по отдельным составляющим технологического

процесса добычи нефти за заданный период: $t_{зп}$ и $t_{рп}$ – заданный и расчетный период во времени; $G_ф$ и $G_{опт}$ – фактические и плановые показатели компонентов технологического процесса.

Обоснована декомпозиция технологического процесса на семи составляющих, фактические и плановые удельные затраты для которых:

$$\omega_ф = \begin{vmatrix} \omega^ф_{i1},...,\omega^ф_{i7}, \\ \omega^ф_{j1},...,\omega^ф_{j7}, \\ ..... \\ \omega^ф_{N1},...,\omega^ф_{N7}, \end{vmatrix}, \quad \omega_{опт} = \begin{vmatrix} \omega^{опт}_{i1},...,\omega^{опт}_{i7} \\ \omega^{опт}_{j1},...,\omega^{опт}_{j7} \\ ..... \\ \omega^{опт}_{N1},...,\omega^{опт}_{N7}, \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} W^ф_i \\ ..... \\ W^ф_j \\ ..... \\ W^ф_N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \omega^ф_{i1},...,\omega^ф_{i7} \\ \omega^ф_{j1},...,\omega^ф_{j1} \\ ..... \\ \omega^ф_{N1},...,\omega^ф_{N7} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} G^ф_{i1},...,G^ф_{i7} \\ G^ф_{j1},...,G^ф_{j7} \\ ..... \\ G^ф_{N1},...,G^ф_{N7} \end{vmatrix},$$

$$\begin{vmatrix} W^{опт}_i \\ ..... \\ W^{опт}_j \\ ..... \\ W^{опт}_N \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \omega^{опт}_{i1},...,\omega^{опт}_{i7} \\ \omega^{опт}_{j1} ...,\omega^{опт}_{j7} \\ ..... \\ \omega^{опт}_{N1},...,\omega^{опт}_{N7} \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} G^{опт}_{i1},...,G^{опт}_{i7} \\ G^{опт}_{j1},...,G^{опт}_{j7} \\ ..... \\ G^{опт}_{N1} ...,G^{опт}_{N7} \end{vmatrix},$$

где ω_1 – удельный расход электроэнергии на добычу 1 т нефти по извлечению продукции скважин на дневную поверхность насосным способом дожимных насосных станций, кВт·ч/т; ω_2 – удельный расход электроэнергии на добычу 1 т нефти, кВт·ч/т; ω_3 – удельный расход электроэнергии на подготовку 1 т нефти, кВт·ч/т; ω_4 – удельный расход электроэнергии по комплексам сооружений хранения и внешней перекачки 1 т товарной нефти, кВт·ч/т; ω_5 – удельный расход электроэнергии нефти по подготовке и утилизации пластовых вод и производственно-ливневых стоков, приходящихся на добычу 1 т нефти, кВт·ч/т; ω_6 удельный расход электроэнергии на поддержание пластового давления (ППД) при закачке 1 м^3 воды, кВт·ч/т; ω_7 – удельный расход электроэнергии на добычу 1 т нефти при электронагреве скважин, кВт·ч/т.

Групповая фактическая и оптимальная нормы расхода электроэнергии на 1 т добычи нефти:

$$\omega_ф = \frac{W_ф}{G}, \quad \omega_{опт} = \frac{W_{опт}}{G},$$

где G – добыча нефти за заданный период, т.

Разработан алгоритм управления режимами электропотребления НГДК, обеспечивающий энергетическую оптимальность (рациональность) процесса добычи нефти. Данный алгоритм практически не накладывает никаких ограничений на величину давления нагнетания, что позволяет планировать энергосбережение без ограничения добычи нефти. Разработана методика и установлены соотношения для определения удельных расходов электроэнергии на отдельные компоненты добычи.

Разработана теория рационального распределения ограничений отпуска электроэнергии и лимитов мощности между НГДП, входящими в состав НГДК. Показано, что для предприятий НГДК характерно значительное отличие удельных расходов электроэнергии на добычу нефти. Это различие положено в основу расчетов по распределению доли снижения электропотребления между НГДП при заданной суммарной величине ограничения. Разработана методика рационального распределения ограничений лимитов мощности путем минимизации целевой функции недобора нефти. При лимитировании по каждому из потребителей-регуляторов (ПР) НГДП рассчитываются нагрузки аварийной и технологической брони. В условиях НГДП в качестве ПР могут быть использованы кустовые (КНС), блочные (БНС) и дожимные (ДНС) насосные станции, термохимические и буровые установки. Для таких потребителей разработан способ распределения отключаемых нагрузок пропорционально их регулировочным возможностям. Если в отключении нагрузки участвуют все i групп потребителей, каждая с коэффициентом

$$K_i = \frac{P_{i\,огр.а}}{\sum P_{i\,огр.а}};$$

при условии, что $K_1 + K_2 + \ldots K_i = 1$, то

$$\Delta P_{i\,\text{огр}} = K_i \Delta P_{i\,\text{огр.з}} = \frac{P_{i\,\text{огр.з}} P_{i\,\text{огр.в}}}{\sum P_{i\,\text{огр.в}}},$$

где $\Delta P_{i.\text{огр}}$ – заданное для НГДК или НГДП ограничение.

При глубоких ограничениях по мощности может случиться, что отключаемые нагрузки затрагивают технологическую бронь, т.е. их отключение ведет к снижению добычи нефти.

В этом случае функция записывается в следующем виде:

$$F(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} \Delta S_i + \lambda \left(\sum_{i=1}^{n} W_i - \Delta W \right) \to \min,$$

где $\Delta S_i = f(\Delta W_i)$ неубывающие дифференцируемые функции первого, второго и более порядка, определяемые на основе экспериментальных данных по каждому из разнотипных или каждой группе однотипных регулировочных мероприятий.

Для оптимизации энергозатрат для современных многоуровневых СЭС горных предприятий с распределением источников выработки, трансформации электроэнергии, линии ее передачи распределительной сети и ПС разработаны структура и алгоритм функционирования АСКУЭ с интеллектуальными микропроцессорными терминальными устройствами с территориально рассредоточенными электроустановками электрических комплексов горных предприятий и применением резервирования с восстановлением элементов системы.

В состав автоматизированной системы контроля и учета электроэнергии входят датчики потока энергии (счетчики), каналы связи, устройства передачи, устройства сбора и обработки информации, контроллеры, персональные компьютеры и другое вспомогательное оборудование, определяемое поставленными задачами. Параметры применяемых счетчиков определяют не только надежность, точность, и другие технические характеристики, но и структуру ее построения, спектр решаемых задач, возможность синтеза АСКУЭ с требуемыми параметрами.

При построении АСКУЭ и организации коммерческого учета электрической энергии предложено применить резервирование как метод повышения надежности. Предложено резервировать два элемента структуры, обладающих наихудшими показателями надежности. В первую очередь – организовать хранение измеренных и вычисленных величин в устройствах хранения информации на низшем уровне АСКУЭ (в памяти микропроцессорных устройств первого уровня), постоянное, нагруженное резервирование.

Второе резервирование необходимо применить на участке передачи информации на следующий уровень (каналы связи), резервирование с восстановлением. Структура резервирования такой системы приведена на рис.4.

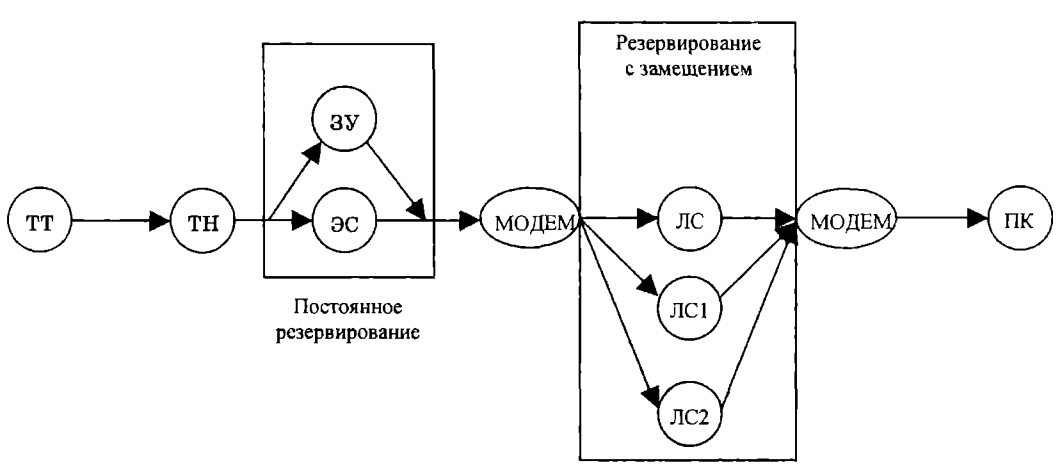


Рис.4. Структура АСКУЭ повышенной надежности

Выявлены закономерности изменения точности и достоверности учета электрической энергии от параметров, характеризующих погрешности первичных датчиков, дискретизации представления информации и параметров режима нагрузки. Показано, что при нагрузке 40 % от номинальной и ниже погрешности трансформаторов тока и индукционных счетчиков выходят за пределы нормирования для номинальных условий.

Установлены пределы изменения частоты следования импульсов от счетчиков датчиков при 30 каналах учета активной энергии. Показано, что для обеспечения требуемой точности учета на интервалах до минуты требуется существенное уменьшения цены импульса. Установлено, что для обеспечения точности учета электроэнергии в пределах 0,5-1,0 % на интервалах от 10 с до минуты, в системах с 10 и более каналами учета требуется, чтобы частота следования импульсов превышала 300-900 имп./мин.

Опыт эксплуатации АСКУЭ с интеллектуальными микропроцессорными терминальными устройствами в условиях распределительных сетей АО «ТАТНЕФТЬ» показал, что:

- каналы транкинговой связи удовлетворяют требованиям, предъявляемым к каналам передачи коммерческой информации АСКУЭ;
- возможность хранения информации в точке учета позволила снизить требования к надежности каналов связи в составе АСКУЭ, так как в случае отказа имеется возможность повторного запроса о передаче информации с использованием резервного канала связи или считывания информации после восстановления работоспособности основного канала.

Разработаны структура, алгоритмическое, математическое и программное обеспечения ВИС контроля КЭ с открытой архитектурой как функционального эквивалента измерительной системы, представленного при помощи комплекса программно-технических средств, без потери функциональных возможностей или искажения функциональных результатов для обеспечения непрерывного анализа ПКЭ (искажения формы кривой напряжения) в соответствии с ГОСТ 13109-97.

Согласно методике определения показателей качества электроэнергии, отражающих несинусоидальность напряжения, необходимо произвести не менее 9 измерений за время $T_{vs} = 3$ с, при этом, чтобы удовлетворить условиям ГОСТ 13109-97, цикл $i + 1$ измерения должен производиться через период $t_ц = T_{vs}/N$ после i–го цикла. В этом случае достигается равномерность распределения i–х циклов измерений за период T_{vs}. Распределение циклов i-х измерений представлено на рис.5. Определим число измерений, производимых по принятой методике для одного коэффициента по одному каналу измерения в течение одних суток:

$$n_1 = 24 \cdot 60 \frac{60}{T_{vs}} N$$

где T_{vs} – интервал времени усреднения; N – число измерений за интервал времени усреднения.

Выполнив необходимые подстановки увидим, что число промежуточных измерений только за одни сутки составит 260 10^3

Показано, что из всего многообразия известных алгоритмов нахождения коэффициентов полинома представляется наиболее целесообразным принять для использования в ВИС алгоритм, известный как «алгоритм Фурье 157а».

За счет того, что на определение одной пары коэффициентов $a_n b_n$ затрачивается значительно меньше операций, метод позволяет произвести быстрый расчет коэффициентов ряда с необходимой точностью. Кроме того, для метода является несущественной четность или нечетность конечного числа выборок исследуемой функции.

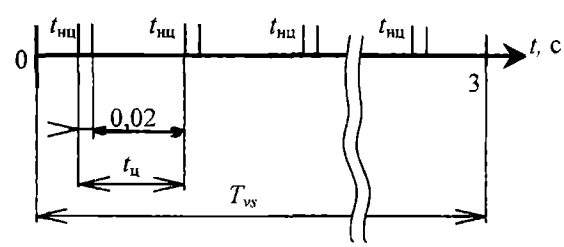


Рис.5. Диаграмма работы системы контроля КЭ

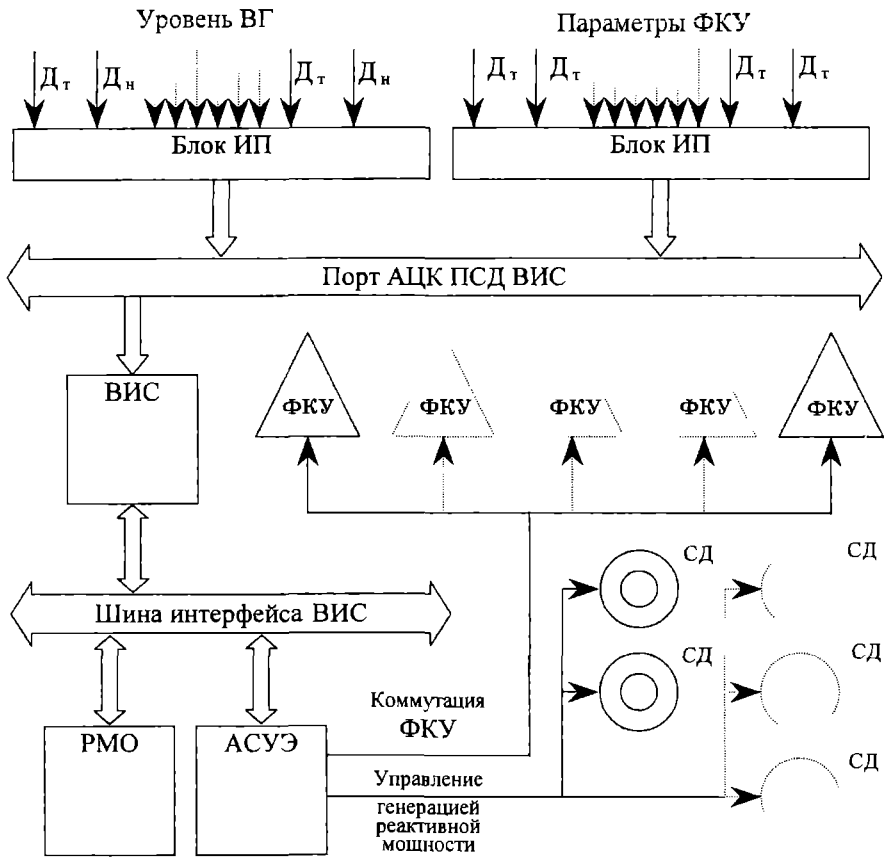


Рис.6. Система управления коэффициентом искажения синусоидальности и формы кривой

ВГ – высшие гармоники; ФКУ – филькомпенсирующяя установка; ИП – измерительные преобразователи; $Д_т$ и $Д_н$ – датчики тока и напряжения; СШ – секция шин; КБ ФКУ – конденсаторные батареи ФКУ; РКУ – реактор ФКУ; ВИС – виртуальная измерительная система; АЦК ПСД ВИС –аналогово-цифровой канал платы сбора данных виртуальной измерительной системы; РМО – рабочее место оператора; АСУЭ – автоматическая система управления энергопотреблением; СД – синхронные двигатели

В принятом алгоритме коэффициенты тригонометрического ряда определяются с использованием метода, описанного Г.Гюрцелем.

Разработан комплекс технических средств АСУЭ для автоматического непрерывного контроля КЭ, позволяющий минимизировать искажения формы кривой напряжения в электротехнических комплексах предприятий горной промышленности и цветной металлургии.

Для наибольшей эффективности применения фильтров и осуществления управления режимами компенсации высших гармонических предполагается использовать ВИС. Идея совместной работы ВИС контроля КЭ – АСУЭ заключается в корректировке мощности ФКУ в зависимости от изменения уровня K_U и корректировке суммарной эффективности компенсации высших гармоник ФКУ При этом производится оптимизация по уровню компенсации реактивной мощности и максимально допустимому числу коммутаций. Система ВИС контроля КЭ – АСУЭ (рис.6) осуществляет оперативный контроль уровня ПКЭ (K_U) и производит анализ режимов электроснабжения для реализации корректировки ПКЭ и приближения их уровня к нормируемому таким образом, чтобы удовлетворить ГОСТ 13109-97, т.е. уровень ПКЭ за контролируемый период превышает допустимый не более чем на 5 %.

Коммутация дополнительных ФКУ должна осуществляться по команде ВИС с помощью сопрягающего устройства. При вводе секции работающий и вновь вводи-

мый фильтры могут образовать резонансный контур, что может привести к появлению циркулирующих между фильтрами токов, превышающих допустимые значения. Резонансные контуры могут возникать также при отклонении параметров входящих в состав секций ФКУ элементов. Поэтому система должна непрерывно контролировать уровни токов в секциях ФКУ и при превышении ими допустимых значений отключать или корректировать параметры секции.

Научные исследования 2000 г. в области разработки электротехнологий и специальных технических средств для выполнения отдельных видов горных работ проводились в направлении разработки, проектирования и создания систем автоматического управления многофункциональными резонансными преобразователями поворотно-угловых перемещений с различными частотами и амплитудами движения. Поскольку на работу преобразователей поворотно-угловых перемещений большое влияние оказывают упругие деформации различных механических элементов оборудования, содержащих длинные упругокинематические звенья, проектирование должно выполняться с учетом механических характеристик рабочих органов.

Наличие таких элементов в манипуляторах и роботах, испытательных стендах, буровых установках и другом оборудовании вызывает значительное отличие вида переходных процессов от вида управляющего воздействия и, в наиболее неблагоприятных случаях, потерю устойчивости и возникновение незатухающих колебаний. Таким образом, системы автоматического управления рассматриваемого класса представляют собой электромеханические системы, в которых главные переменные связаны соотношениями или преобразованиями, зависящими как от временных, так и от локальных пространственных перемещений отдельных механических элементов.

Задачам исследования таких систем посвящено большое количество работ, получены достаточно хорошие результаты [3], однако в большинстве случаев рассматривались относительно простые системы. Достигнутые на сегодняшний день успехи в деле создания цифровой микропроцессорной элементной базы средств автоматизации открывают новые перспективы в построении быстродействующих электромеханических систем, позволяют учесть характер динамических процессов, получить новые возможности в реализации целей управления многофункциональными резонансными преобразователями поворотно-угловых перемещений и повысить в целом качество проектирования.

Указанные преобразователи описываются в общем случае интегро-дифференциальными уравнениями гиперболического типа. Поэтому были проведены исследования по уточнению методов математического описания таких объектов, исследованы сходимость и точность математических моделей и разработаны принципы построения систем с рациональными динамическими параметрами. Решение указанных задач позволило создать высококачественные резонансные преобразователи угловых перемещений, в частности, систему автоматического управления «управляемый источник питания – буровой снаряд» (рис.7).

Для бурения скважин необходимо обеспечить угловые колебания вокруг оси бурового снаряда режущему инструменту (коронке) и осевое давление на забой силой веса снаряда. Известно, что скорость бурения пропорциональна линейной скорости движения резцов и давления коронки на забой. Оснащая коронку резцами двухстороннего резания (алмазными коронками) и обеспечивая угловые колебательные движения ее в диапазоне 35–80° при частотах 10–40 Гц, можно получать более высокие средние скорости движения режущего инструмента по сравнению со скоростями, реализуемыми при традиционных способах бурения.

С наибольшим эффектом указанное устройство может быть использовано при взятии проб донных отложений и бурении морского дна. Это объясняется тем, что при реализации движения породоразрушающего инструмента вокруг вертикальной оси воз-

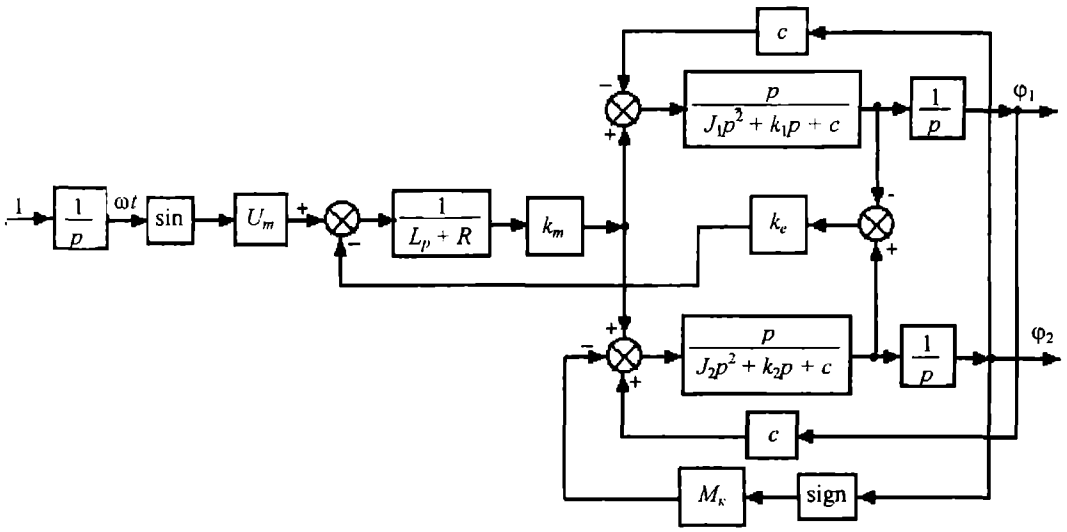


Рис.7 Структурная схема системы «управляемый источник питания – буровой снаряд» с резонансным преобразователем угловых перемещений

можно создание динамически уравновешенных буровых снарядов. Такие снаряды не требуют специальных удерживающих устройств для создания реактивного момента при работе коронки на забое, что существенно упрощает и повышает эффективность процесса бурения.

Достоинством предлагаемых устройств является также возможность создания автономных буровых снарядов на грузонесущем кабеле, что позволяет отказаться от буровой колонны, значительно снизить металлоемкость бурового комплекса и повысить эффективность буровых работ.

Рассматриваемый класс резонансных электромеханических преобразователей может найти применение и для других технологий горной промышленности.

Для повышения эффективности ведения горных работ в ряде случаев целесообразно применение прямых методов электротехнологии, основанных на электротермомеханическом преобразовании энергии электрического поля непосредственно в горной породе с целью получения требуемого технологического эффекта. Одним из таких эффектов является избирательное выделение энергии высокочастотного (ВЧ) поля в поглощающих включениях крупноскелетных мерзлых пород и нарушения адгезионных связей на границе этих включений с вмещающей средой.

Подобный характер снижения прочности дает основание использовать ВЧ-электротехнологию не только для подготовки пород к выемке, но также для эффективного изменения физико-механического состояния пород в процессе их переработки. Примером такого использования ВЧ-электротехнологии является подготовка мерзлых золотосодержащих песков к обогащению в связи с разработкой технологии круглогодичной добычи золота как на поверхности, так и непосредственно под землей.

По оценкам ОАО «Гоулд», занимающегося инновационной деятельностью в золотодобывающем секторе промышленности Северо-Востока, необходимость в такой технологии связана со снижением рентабельности добычи золота при увеличении глубины залегания разрабатываемых россыпей.

Дополнительным преимуществом применения ВЧ-установок в данной технологии является возможность включения их вторичных энергоресурсов в рабочий цикл промывочного прибора.

Для оценки энергетических и технологических параметров ВЧ-установок была разработана модель взаимодействия электромагнитного поля с горной массой, транспортируемой со скоростью V через технологическую камеру. Камера выполнена в виде прямоугольного желоба длинной L, в котором размещена пластина центрального пи-

тания шириной a, образующая вместе с экраном двойной конденсатор.

Питание камеры осуществляется от ВЧ-генератора с помощью жесткой коаксиальной линии с возможностью перемещения пластины с целью изменения напряженности электрического поля в рабочей части конденсатора.

Модель построена в квазистатическом приближении, которое проверялось оценкой постоянной распространения по данным расчета погонных параметров линии.

Задача расчета состояла в определении скорости перемещения породной массы в пространстве взаимодействий в зависимости от параметров генератора, электро-теплофизических свойств компонентов породы и ее состава, исходя из условия обеспечения требуемого термодинамического состояния породы на выходе камеры и выделения максимальной мощности генератора в нагрузке. Внешняя составляющая задачи заключалась в определении динамики изменения электрического поля, тепловых источников и распределения эффективной температуры, внутренняя задача состояла в определении параметров схемы замещения и динамики их изменения в процессе взаимодействия поля с породой.

В результате решения самосогласованной электротеплофизической задачи было получено неявное уравнение для определения распределения эффективной температуры вдоль камеры $T(x)$. При известных температурных зависимостях диэлектрической проницаемости $\varepsilon'(T)$, фактора потерь $\varepsilon''(T)$ и эффективной теплоемкости $C(T)$ это уравнение имеет вид:

$$X(T)=\frac{V}{A_0}\int_{T_н}^{T(x)}\frac{C(\theta)\left[\bar{d}+(1-\bar{d})\varepsilon^{i}(\theta)\right]^2}{\varepsilon^{ii}(\theta)}d\theta;$$

$$0\le x\le L,$$

где $A_0=0{,}5\varepsilon_0\omega\left|E_m{}^2\right|$; $E_m=U_m/d_0$; U_m – напряжение на рабочем конденсаторе; d_0 – расстояние между электродами; $\bar{d}=d/d_0$; d – толщина насыпного слоя; ω круговая частота; ε_0 – постоянная.

Установлено, что параметры схемы замещения технологической камеры $Y=G+iB$ зависят от продольного распределения эффективной диэлектрической проницаемости $\bar{\varepsilon}(x)=\bar{\varepsilon}^{i}(x)-j\bar{\varepsilon}^{ii}(x)$ частично заполненного конденсатора:

$$B=\frac{\omega\varepsilon_0 a}{d_0}\int_0^L\bar{\varepsilon}^{i}(x)dx;\quad G=\frac{\omega\varepsilon_0 a}{d_0}\int_0^L\bar{\varepsilon}^{ii}(x)dx$$

Диапазон расстройки контура в связи с изменением состава породы определяется с использованием формул теории чувствительности.

Результаты расчета, выполненные применительно к генератору ВЧГЗ 60/13 (мощность 60 кВт, частота 13 МГц, напряжение 10 кВ, емкость внешней нагрузки 200-2000 пФ) показали, что условие выделения максимальной мощности в нагрузке выполняется практически для всех типов сланцесодержащих крупноскелетных пород, если выбрать следующие параметры камеры: $L=4$ м, $d=0{,}1$ м, $d_0=0{,}2$ м, $a=0{,}6$ м. В этом случае производительность установки составляет $П=10$ м^3/ч при скорости движения ленты транспортера $V=170$ м/ч.

Научные исследования в области совершенствования автоматических и автоматизированных систем для горно-добывающих и перерабатывающих комплексов основывались на следующей концепции. Автоматические и автоматизированные системы электротехнических комплексов содержат как основную составляющую их структуры системы автоматического контроля параметров природной среды, веществ, материалов и изделий. Системы автоматического контроля могут проектироваться и развиваться как самостоятельные системы различного назначения.

Так, в конце 70-х – начале 80-х годов было замечено, что в количествах нефти, принятой к транспортировке и сданной потребителю, есть расхождение и за год оно достигало двух миллионов тонн. Было дока-

зано, что в нефти присутствует значительное количество свободного газа.

При этом под содержанием свободного газа в сечении потока φ понимается отношение площади части сечения потока, занятой газом $S_г$, к общей площади сечения S_0,

$$\varphi = S_г / S_0.$$

Наиболее важные из полученных результатов можно сформулировать следующим образом:

1. В потоках нефти в измерительных линиях коммерческих узлов расчета присутствует свободный газ, свободная вода и механические примеси.

2. Свободный газ движется в виде скоплений пузырьков, а механические примеси – в виде скоплений твердых частиц.

3. В поперечном сечении потока скопления пузырьков располагаются в ядре потока и несколько смещены вверх. Скопления твердых частиц движутся в нижней части трубы. Вдоль продольной оси нефтепровода скопления включений в потоке нефти, будь то скопления твердых частиц или скопления пузырьков газа, передвигаются обособленно друг от друга. В момент прохождения скопления пузырей свободного газа содержание свободного газа в нефти может достигать 2 % по объему. В среднем содержание свободного газа в потоке находилось в пределах 0,2-0,5 %. Скорость движения свободного газа выше скорости движения нефти, а скорость движения твердых частиц – ниже.

4. Свободная вода в движущемся со скоростью более 4 м/с потоке частично распределяется по стенке трубопровода в виде кольца (цилиндра), замыкающего поток, а частично диспергируется в нефть в виде капель, образуя нефтяную эмульсию. Можно предположить, что если нефть представляет собой смесь нефтей, имеющих различные плотности и вязкости, то более плотные и вязкие нефти будут двигаться ближе к стенке трубопровода, где скорость потока ниже.

5. Наличие свободного газа в потоке нефти приводит к появлению положительной погрешности измерения объемного расхода нефти турбинными расходомерами. Эта погрешность обусловлена следующими причинами:

- учетом свободного газа наряду с нефтью;
- пульсирующим характером потока;
- отличием эпюры распределения скорости потока по сечению трубы для газожидкостной смеси от эпюры для чистой жидкости;
- отличием физических свойств нефтегазовой смеси от свойств «чистой» нефти.

6. Неравномерное распределение свободной воды, свободного газа нефтей с различными плотностями по сечению потока приводит к дополнительной погрешности в измерении плотности нефти парциальным методом с отводом части потока на вибрационный плотномер.

Можно сделать вывод, что дальнейшее совершенствование коммерческого учета нефти должно базироваться на измерениях реального фазового и компонентного состава потока и его гидродинамической структуры и на использовании результатов измерений при определении массы нефти нетто.

Предложения, основанные на этом выводе, сводятся к следующему.

Объемный расходомер-счетчик (турбинный, ультразвуковой, ролико-лопастной и т.д.) следует дополнить прибором, который должен:

- непрерывно устанавливать наличие или отсутствие в потоке нефти свободного газа и твердых включений;
- измерять относительное количество свободного газа в партии нефти;
- измерять среднюю скорость движения газа;
- измерять среднюю для партии нефти плотность жидкости без газа и без твердых включений, непосредственно на потоке в измерительной линии.

Все измерения должны производиться бесконтактным способом без создания дополнительных гидравлических сопротивлений потоку и без изменения скорости и направления его течения. Погрешность измерений плотности жидкости (относительная) не должна превышать 0,05 %. Погрешность измерения содержания газа (абсолютная) не

должна превышать 0,001 об. доли в диапазоне измерений 0-0,02.

При измерении массового расхода жидкости системой, состоящей из объемного расходомера-счетчика и такого прибора, масса жидкости брутто $m_ж$ может быть определена следующим образом (в предположении, что поток несжимаем).

В те интервалы времени, когда прибор установил, что поток не содержит пузырей свободного газа и твердых частиц, измеряются объемный расход нефтегазовой смеси $Q_{см\,j}$ и плотность жидкости без газа и механических включений $\rho_{ж\,j}$. Далее находятся средние значения $Q_{см.ср}$ и $\rho_{ж.ср}$ для партии нефти.

Измеряется среднее для партии нефти объемное содержание свободного газа $\varphi_{ср}$ и средняя скорость движения газа $V_{г.ср}$.

Определяется средний объемный расход газа

$$Q_{г.ср} = S_0 \varphi_{ср} V_{г.ср}$$

Определяется среднее расходное газосодержание

$$\beta_{ср} = Q_{г.ср} / Q_{см.ср}.$$

Определяется масса жидкости брутто в партии нефти

$$m_ж = Q_{см.ср} \rho_{ж.ср} (1 - \beta_{ср}) T$$

где T – время протекания партии нефти через узел учета.

Проблема свободного газа в товарной нефти помимо точности коммерческого учета нефти, возможно, имеет и другие аспекты:

- влияние многофазности и многокомпонентности потока на скорость процесса коррозии трубопровода;
- изменения состава нефти в процессе ее движения по трубопроводам;
- загрязнение атмосферного воздуха свободным газом, выделяющимся из нефти.

Беспроводная передача речевых сигналов через массив горных пород представляет большой интерес для горной промышленности. Она необходима для связи с персоналом, продвигающемся по выработкам, а также при авариях, когда нарушается телефонная связь.

Эта проблема до сих пор полностью не разрешена, особенно при передаче на большие расстояния (более нескольких сот метров). Затруднения связаны с большим затуханием электромагнитного поля, в частности на верхних частотных составляющих спектра речевых сигналов.

Одним из возможных способов увеличения дальности передачи речевой информации является использование ретрансляторов, которые усиливают ослабленные горным массивом сигналы и передают их на более низкие горизонты. Использование ретрансляторов известно давно в различных системах связи. Однако все эти ретрансляторы имеют частотное разделение сигналов между приемной и передающей сторонами. Для нашего случая передачи низкочастотных сигналов такие ретрансляторы не подходят, а необходимы ретрансляторы с временным разделение сигналов между приемной и передающей сторонами. В таком ретрансляторе, чтобы передающая сторона не заглушала сигналы на приеме, необходимо размещать передаваемые импульсы между принимаемыми. Это возможно только в том случае, если передаваемые аналоговые речевые сигналы будут подвергнуты амплитудно-импульсной модуляции.

Аппаратура для беспроводной передачи речевых сигналов состоит из наземного передатчика, приемников и ретрансляторов в подземных выработках.

Наземный передатчик имеет следующую структуру: источник речевых сигналов, устройство амплитудно-импульсной модуляции, устройство выделения нижней боковой полосы частот, усилитель однополосных сигналов, выходной каскад усилителя мощности. К выходу передатчика подключена антенна в виде симметричного вибратора, подвешенная на опорах невысоко над землей и на концах заземленная на обсадные трубы геологических скважин. Электрические токи в антенне возбуждают импульсы электромагнитного поля в массиве горных пород, которые распространяются до подземных выработок.

На подземном горизонте, где напряженность поля достаточной величины, распола-

гаются приемник и ретранслятор. Приемник имеет следующую структуру: антенну вибраторного типа или в виде магнитного диполя, предварительный усилитель, устройство восстановления первоначального импульсного сигнала из принятого однополосного сигнала, фильтр нижних частот и усилитель мощности с воспроизводящим устройством (громкоговорителем или наушниками).

Ретранслятор должен иметь следующую структуру. Сигналы с приемной антенны ретранслятора поступают на каскад предварительного усиления, а затем в устройство временного сдвига, где импульсы приема размещаются между импульсами передачи, чтобы прием и передача не мешали друг другу. С выхода устройства временного сдвига сигналы усиливаются передающим устройством и возбуждают ток в передающей антенне.

Перечисленные перспективные направления при современном подходе к проектированию технологических машин характеризуется высоким уровнем автоматизации управления и электротехнологий. В этом плане проводимые в 2000 г. исследования дали положительные результаты и переданы ряду промышленных предприятий для дальнейшего использования при создании новых технологических машин.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Девас С.* Стандартные модули XXI века // Электротехника. 2000. № 4.

2. *Доцковский Л.Х.* Современное состояние и тенденции в асинхронном частотно-регулируемом электроприводе (краткий аналитический обзор) / Л.Х.Доцковский, В.И.Роговой и др. // Электротехника. 1996. № 10.

3. Электропривод и автоматика горных машин и технологических комплексов / Э.А.Загривный, А.Е.Козярук, Р.М.Проскуряков и др. // Горный журнал. 1998. № 10.

4. *Zadeh L.A., Desoer C.A.* Linear System Theory; The State Spact Approach, McGraw-Hill. New-York, 1963.