

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

Кади-Оглы Евгений Федорович

**Сравнительный анализ и оценка эффективности  
способов регулирования погруженных асинхронных  
двигателей**

**Специальность 05.09.01-«Электромеханика и электрические аппараты»**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2002

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность работы

Действующие в России отечественные насосные системы с погружными асинхронными двигателями работают, в основном, при постоянной частоте вращения. При этом регулирование расхода откачиваемой жидкости осуществляется с помощью механических заслонок, что существенно снижает энергетические и эксплуатационные свойства объекта. Такой режим связан с неоправданно большими потерями электроэнергии и повышенным давлением в гидравлической сети. Введение регулирования расхода жидкости путем изменения частоты вращения приводного двигателя насоса позволяет существенно сэкономить энергоресурсы. В частности, в работах Браславского И.Я., Зюзева А.М., Ишиматова З.Ш. показано, что при поддержании в системе откачки минимально необходимого постоянного давления жидкости достигается экономия электроэнергии до 50 %. Регулирование давления приводит также к существенному уменьшению расхода жидкости, так как в гидравлических сетях велика доля непродуцируемых утечек. Например, для случая транспортировки из скважины воды экономия расхода жидкости составляет до 25 %. Дополнительным эффектом, в этом случае, является снижение аварийности трубопроводов.

Имеющиеся в наличии небольшое количество регулируемого привода погружных насосов, в основном иностранного производства, хорошо показали себя при эксплуатации. Однако их стоимость весьма высока. Переход на отечественную элементную базу позволил бы существенно снизить затраты на внедрение подобных систем. При разработке и промышленной эксплуатации данных систем весьма актуальными становятся вопросы их надежности, качества регулирования, простоты обслуживания и возможности резервирования преобразователя, особенно ввиду отсутствия достаточно квалифицированных кадров на местах их эксплуатации. Поэтому исследование эффективных и достаточно простых для рассматриваемого класса электрических машин схем преобразовательных установок и способов регулирования носит особо актуальный характер.

Существует ряд способов регулирования асинхронных двигателей. Основными и наиболее применимыми на сегодняшний день являются частотный и параметрический способы. Преобразователи для каждого из них имеют различные как ценовые, так и технологические показатели. Способ регулирования только амплитудой питающего напряжения предусматривает более простую схему соединения элементов преобразователя и оказывается наиболее дешевым, но имеет низкие энергетические показатели. Вместе с тем частотный способ позволяет получить высокие энергетические показатели регулируемого электропривода, но является более дорогим. Поэтому представляется необходимым оценить эффективность регулирования погружных асинхронных двигателей при различных способах управления, учитывая условия эксплуатации данного класса насосных систем. В этом аспекте становится актуальным требование по совместному рассмотрению комплекса вопросов взаимной увязки параметров и характеристик, как двигателя, так и рассматриваемой регулируемой насосной системы.

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является исследование и сравнительный анализ способов регулирования погружных асинхронных двигателей различной конструктивной модификации для привода центробежных насосов, обеспечивающих лучшие эксплуатационные характеристики и снижение энергопотребления с учетом стоимости оборудования.

### **Задачи исследования**

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- 1) изучить особенности, требования и опыт эксплуатации двигателей рассматриваемого типа;
- 2) разработать методику анализа их характеристик в установившихся и переходных режимах работы, наиболее полно учитывающих влияние внешних факторов, схем питания и специфических характеристик нагрузки;
- 3) провести опытное исследование параметров существующих погружных двигателей с дальнейшей их систематизацией и выбором аппроксимирующих выражений для использования в математической модели объекта;
- 4) оценить влияние параметров на эксплуатационные показатели установки; проанализировать возможности улучшения параметров погружных асинхронных двигателей за счет конструктивных и технологических новаций;
- 5) оценить различные способы регулирования режимов работы и выработать рекомендации по их практическому использованию;

### **Методы исследования**

При решении поставленных задач были использованы теоретические и экспериментальные методы исследований.

Теоретические методы базировались на основных положениях теории электрических машин и были реализованы при помощи современных информационных технологий.

Экспериментальные исследования проводились на специально разработанных стендах с использованием методов прямых и косвенных измерений.

### **Научная новизна.**

На основе теоретических и экспериментальных исследований:

- проведена систематизация параметров и характеристик существующих погружных асинхронных двигателей;
- разработаны методы расчета установившихся и переходных режимов с учетом специфических характеристик нагрузки, насыщения по пути основного потока и потоков рассеяния обмоток и многоконтурной структуры ротора;
- произведена сравнительная оценка методик определения параметров асинхронных машин с комбинированной конструкцией ротора;
- выполнен анализ различных способов регулирования двигателей рассматриваемых типов и сформулированы рекомендации по их применению.

### **Практическая ценность результатов.**

Разработаны и исследованы экспериментальные образцы асинхронных двигателей с комбинированной конструкцией ротора. Произведено сравнение опытных и расчетных характеристик рассматриваемого типа.

Получены решения задач расчета и моделирования устройств электропривода погружной насос – асинхронный двигатель, которые позволяют существенно сократить объем экспериментальных исследований при создании нового оборудования.

Результаты выполненных расчетов и экспериментальных исследований представляют практический интерес при проектировании новых и модернизации известных устройств и механизмов электропривода рассматриваемого типа.

**Достоверность результатов** проведенных исследований подтверждается удовлетворительным совпадением результатов математического моделирования с данными натуральных экспериментов.

### **Апробация работы.**

Основные научные и практические результаты работы докладывались на:

- международных научно-технических конференциях «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика» (Ялта 1998 и 2000 гг.)
- международной научной конференции «Unconventional electromechanical and electrical systems» (Санкт – Петербург 1999 г.)
- международной научной конференции «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці» (Львов 1999 г.)
- научно-технической конференции молодых ученых «XXVIII НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГТУ» (Санкт-Петербург 1999г)
- заседаниях и научных семинарах кафедры «Электрические машины» СПбГТУ (Санкт-Петербург 2000 – 2001 гг.)

### **Публикации**

Основные результаты диссертационной работы представлены в виде пяти публикаций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 123 наименований и 3 приложений. Работа содержит 134 страницы, включая 52 рисунка и 8 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении**, на основании изученной литературы, обоснованы актуальность, цель и задачи исследований. Рассматриваются особенности конструкции и эксплуатации погружных асинхронных двигателей насосных систем. Обсуждаются проблемы регулирования данной системы.

В **первой главе** диссертации представлен разработанный способ анализа характеристик погружных асинхронных двигателей в установившихся и пере-

ходных режимах работы. Представлена и обоснована математическая модель системы преобразователь – асинхронный двигатель – погружной насос.

В качестве исходной принята модель асинхронной машины в синхронно вращающихся  $ds, qs$  координатах, при общепринятой системе относительных единиц.

Дифференциальные уравнения

$$\begin{aligned} \frac{d\Psi_{ds}}{d\tau} &= u_{ds} + \alpha_f \Psi_{qs} - i_{ds} r_s; & \frac{d\Psi_{qs}}{d\tau} &= u_{qs} - \alpha_f \Psi_{ds} - i_{qs} r_s; & \frac{d\Psi_{dr}}{d\tau} &= (\alpha_f - \omega) \Psi_{qr} - i_{dr} r_r; \\ \frac{d\Psi_{qr}}{d\tau} &= -(\alpha_f - \omega) \Psi_{dr} - i_{qr} r_r; & H_j \frac{d\omega}{d\tau} &= (m_e - m_t), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где  $\alpha_f = \frac{f}{f_0}$  - относительная частота питания асинхронного двигателя;

Уравнения, связывающие потокосцепления и токи при ненасыщенном магнитопроводе:

$$i_{ds} = \frac{\Psi_{ds} - \Psi_{ads}}{x_{\sigma s}}; \quad i_{qs} = \frac{\Psi_{qs} - \Psi_{aqs}}{x_{\sigma s}}; \quad i_{dr} = \frac{\Psi_{dr} - \Psi_{ads}}{x_{\sigma r}}; \quad i_{qr} = \frac{\Psi_{qr} - \Psi_{aqs}}{x_{\sigma r}}.$$

Электромагнитный момент:  $m_e = \Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}$ .

Момент сопротивления, действующий на валопровод:

$m_t = k \cdot \omega^2 + \exp(-\frac{\tau}{T_{mix}}) + m_0(\omega)$ , где  $k \cdot \omega^2$  - основная вентиляторная нагрузка;  $m_0$  -

отображает механические потери в приводе и обычно составляет малую часть  $m_t$ ;  $m_{mix} \cdot \exp(-\frac{\tau}{T_{mix}})$  - добавочный момент сухого трения, кратковременно действующий в начале пуска.

Для более детального рассмотрения процессов, происходящих в асинхронном двигателе, как элементе регулируемого электропривода, необходимо учитывать насыщение. С этой целью принято допущение, что основной поток в машине и потоки рассеяния не зависят друг от друга. Для учета насыщения по пути основного потока используется методика, согласно которой основной поток в машине является результатом действия результирующей намагничивающей силы  $F_\Sigma$  (в относительных единицах  $i_\Sigma$ ), которая определяется суммарным действием всех токов по соответствующим осям:

$$i_{d\Sigma} = i_{ds} + i_{dr}; \quad i_{q\Sigma} = i_{qs} + i_{qr}; \quad i_\Sigma = i_{d\Sigma} \sin(\frac{\pi}{2} x_k) - i_{q\Sigma} \cos(\frac{\pi}{2} x_k).$$

В систему дифференциальных уравнений (1.1) добавляются следующие уравнения:

$$\frac{d\Psi_{ads}}{d\tau} = l_d \frac{di_{d\Sigma}}{d\tau} + m_{dq} \frac{di_{q\Sigma}}{d\tau}; \quad \frac{d\Psi_{aqs}}{d\tau} = m_{qd} \frac{di_{d\Sigma}}{d\tau} + l_q \frac{di_{q\Sigma}}{d\tau}, \quad (1.2)$$

где дифференциальные само и взаимоиנדуктивности находятся из выражений:

$$l_d = \sum_{k=1}^v C_k \cos^2(\frac{\pi}{2} x_k) \frac{\partial B(i_{\Sigma k})}{\partial i_{\Sigma k}}; \quad l_q = \sum_{k=1}^v C_k \sin^2(\frac{\pi}{2} x_k) \frac{\partial B(i_{\Sigma k})}{\partial i_{\Sigma k}};$$

$$m_{dq} = m_{qd} = \sum_{k=1}^v C_k \cos(\frac{\pi}{2} x_k) \sin(\frac{\pi}{2} x_k) \frac{\partial B(i_{\Sigma k})}{\partial i_{\Sigma k}}, \text{ где}$$

$x_k, C_k, v$  – узлы, коэффициенты и порядок квадратурной формулы  $v(i_\Sigma)$  - кривая намагничивания машины.

Для учета насыщения по путям потока рассеяния, например ротора, воспользуемся следующей методикой. При известной зависимости  $x_{\sigma r} = f(\Psi_{\sigma r})$ , которая может быть получена из опыта короткого замыкания или расчетным путем, токи роторных контуров рассчитываются по уравнениям вида:

$$i_{dr} = \Psi_{\sigma dr} y_{\sigma r}; \quad i_{qr} = \Psi_{\sigma qr} y_{\sigma r},$$

где  $y_{\sigma r} = \frac{1}{x_{\sigma r}} = \varphi(\Psi_{\sigma r})$ ,  $\Psi_{\sigma dr} = \Psi_{dr} - \Psi_{ads}$ ;  $\Psi_{\sigma qr} = \Psi_{qr} - \Psi_{aqs}$ ;  $\Psi_{\sigma r} = \sqrt{\Psi_{\sigma dr}^2 + \Psi_{\sigma qr}^2}$ .

Производные токов, входящие в уравнения (1.2), равны:

$$\frac{di_{d\Sigma}}{d\tau} = \frac{\left( \frac{d\Psi_{ds}}{d\tau} \frac{1}{x_{\sigma s}} + \frac{d\Psi_{dr}}{d\tau} y_{\sigma dr} \right) - \frac{m_{dq} x_{oq}}{x_{od} (x_{oq} + l_q)} \left( \frac{d\Psi_{qs}}{d\tau} \frac{1}{x_{\sigma s}} + \frac{d\Psi_{qr}}{d\tau} y_{\sigma qr} \right)}{1 + \frac{l_d}{x_{od}} - \frac{m_{dq}^2}{x_{od} (x_{oq} + l_q)}};$$

$$\frac{di_{q\Sigma}}{d\tau} = \frac{\left( \frac{d\Psi_{qs}}{d\tau} \frac{1}{x_{\sigma s}} + \frac{d\Psi_{qr}}{d\tau} y_{\sigma qr} \right) - \frac{m_{dq} x_{od}}{x_{oq} (x_{od} + l_d)} \left( \frac{d\Psi_{ds}}{d\tau} \frac{1}{x_{\sigma s}} + \frac{d\Psi_{dr}}{d\tau} y_{\sigma dr} \right)}{1 + \frac{l_q}{x_{oq}} - \frac{m_{dq}^2}{x_{oq} (x_{od} + l_d)}}, \text{ где}$$

$$x_{0d} = \left( y_{\sigma dr} + \frac{1}{x_{\sigma s}} \right)^{-1}; \quad x_{0q} = \left( y_{\sigma qr} + \frac{1}{x_{\sigma s}} \right)^{-1}; \quad y_{\sigma dr} = y_{\sigma r} + \frac{dy_{\sigma r}}{d\Psi_{\sigma r}} \frac{\Psi_{\sigma dr}^2}{\Psi_{\sigma r}}; \quad y_{\sigma qr} = y_{\sigma r} + \frac{dy_{\sigma r}}{d\Psi_{\sigma r}} \frac{\Psi_{\sigma qr}^2}{\Psi_{\sigma r}}.$$

Преобразователь в цепи питания асинхронного двигателя описывается

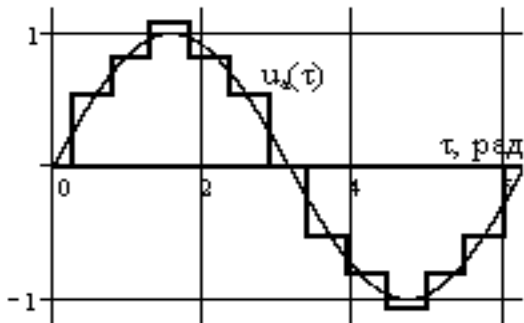


Рис.1 Форма преобразованного фазного напряжения на выходе инвертора напряжения, собранного по мостовой схеме

своими выходными характеристиками в виде некоторой временной функции. В качестве примера на рис.1 показана форма преобразованного фазного напряжения на выходе инвертора напряжения, собранного по мостовой схеме при  $150^\circ$  угле проводимости полупроводниковых элементов. Расчет процесса регулируемого пуска асинхронного двигателя производится по алгоритму, приведенному на рис.2. Здесь:  $\alpha_U = U_a / U_b$  - относительное напряжение;  $d\omega/d\tau_{set}$  - заданное

ускорение ротора;  $\omega_{end}$  – скорость, до установления которой осуществляется регулирование. Расчет режима проводится до установления процесса по времени  $\tau$ , равному некоторой величине  $\tau_{end}$ . Согласно данному алгоритму разработан пакет программ для персонального компьютера.

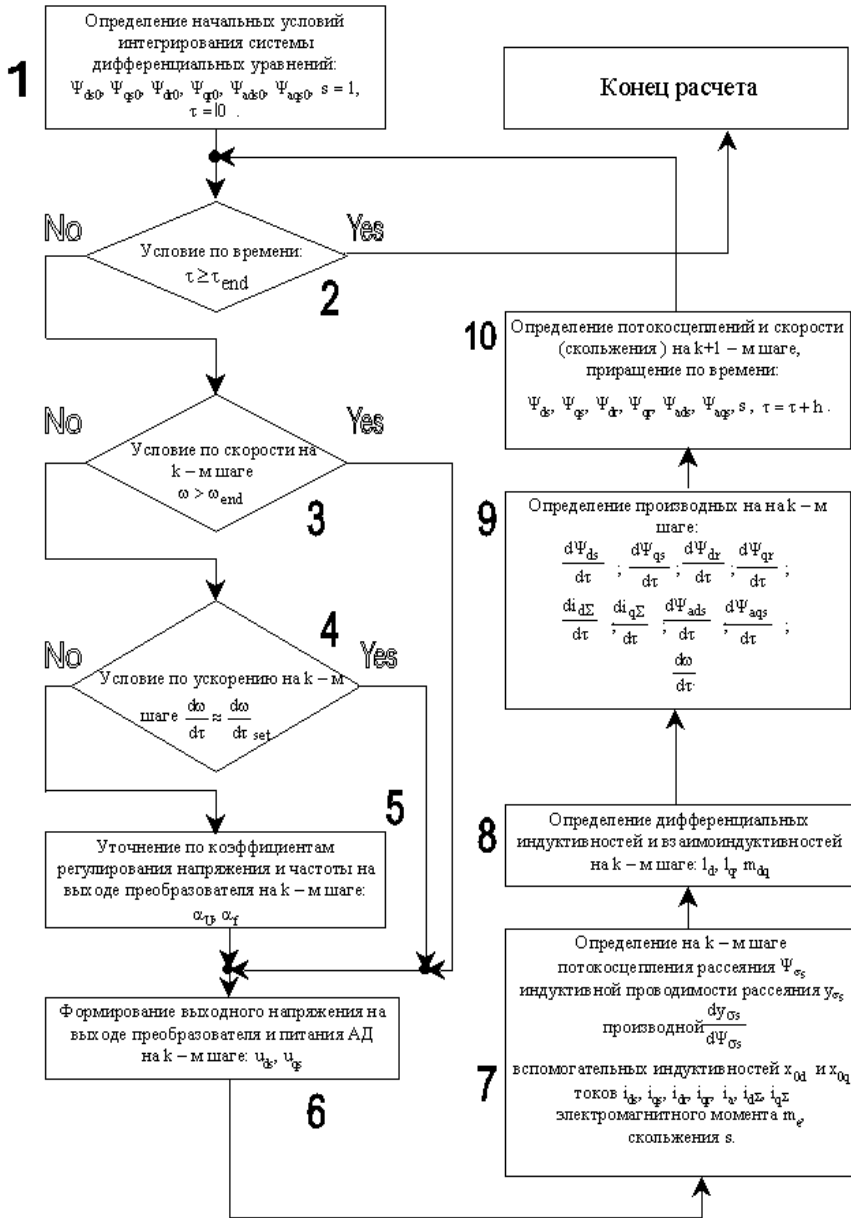


Рис. 2 Блок схема решения режимной задачи регулируемого пуска асинхронного двигателя с учетом насыщения .

Вторая глава посвящена анализу параметров и характеристик существующих погружных асинхронных двигателей различных фирм производителей, которые были испытаны в России на заводе «Электросила» и в Польше на заводе «Karelma» при участии автора. На рис.3 и 4 представлены экспериментально полученные зависимости индуктивных сопротивлений статорной обмотки, обусловленных основным потоком  $x_m=f(U_0)$  и индуктивных сопротивлений в опытах короткого замыкания  $x_K=f(I_K)$  ряда испытанных машин. При этом остаются открытыми вопросы, связанные с разделением параметров короткого замыкания  $x_K$  на составляющие  $x_{\sigma s}$  и  $x_{\sigma r}$  ввиду резкой зависимости

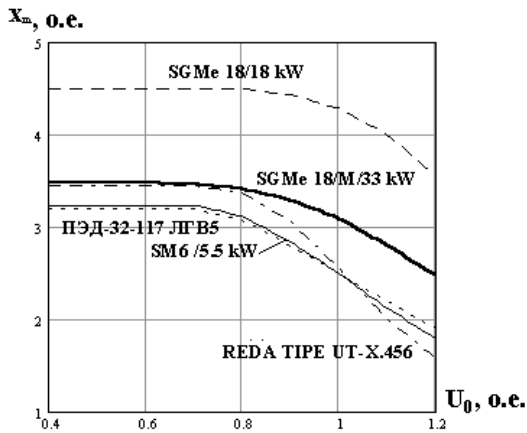


Рис.3 Зависимость  $x_m=f(U_0)$

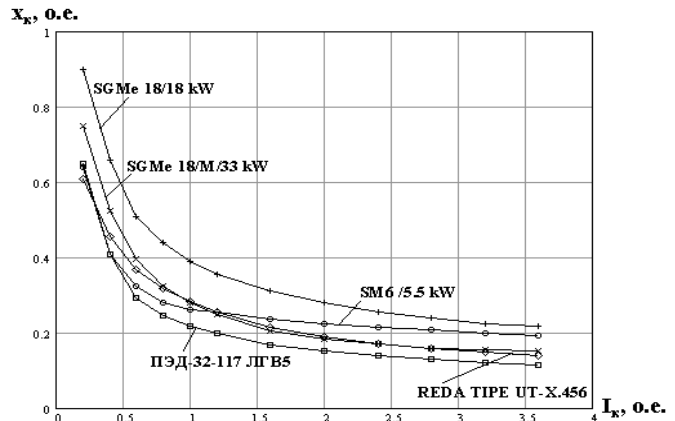


Рис.4 Зависимость  $x_K=f(I_K)$

$x_K = f(I_K)$  и обоснованием уровня математической модели в плане учета насыщения по путям потоков рассеяния машины.

Значительное изменение параметров на рис. 3 – 4 не всегда приводит к существенным погрешностям при расчете характеристик данного класса машин. Например, рассмотрены несколько возможных вариантов выбора параметров  $x_{\sigma S}$  и  $x_{\sigma T}$  для расчета рабочих и механических характеристик погружных асинхронных двигателей: 1)  $x_{\sigma S} = x_{\sigma T} = \frac{x_K}{2}$ , причем величина  $x_K$  выбрана в насыщенной области характеристики  $x_K = f(I_K)$ ; 2)  $x_{\sigma S} = x_{\sigma T} = \frac{x_K}{2}$ , причем величина  $x_K$  выбрана в области номинального тока ( $I_K=1$  о.е.) характеристики  $x_K = f(I_K)$ ; 3)  $x_{\sigma S} = \frac{x_K}{2}$  выбрано в насыщенной области характеристики  $x_K = f(I_K)$ , а  $x_{\sigma T}(I_K) = x_K(I_K) - x_{\sigma S}$ ; 4)  $x_{\sigma T} = \frac{x_K}{2}$  выбрано в насыщенной области характеристики  $x_K = f(I_K)$ , а  $x_{\sigma S}(I_K) = x_K(I_K) - x_{\sigma T}$ . В качестве иллюстрации на Рис. 5 представлены рабочие характеристики  $I_1, \cos\phi, \eta, s = f(\frac{P_2}{P_{2H}})$ , полученные из описанных ранее условий, погружного асинхронного двигателя SGMе 18/18 kW.

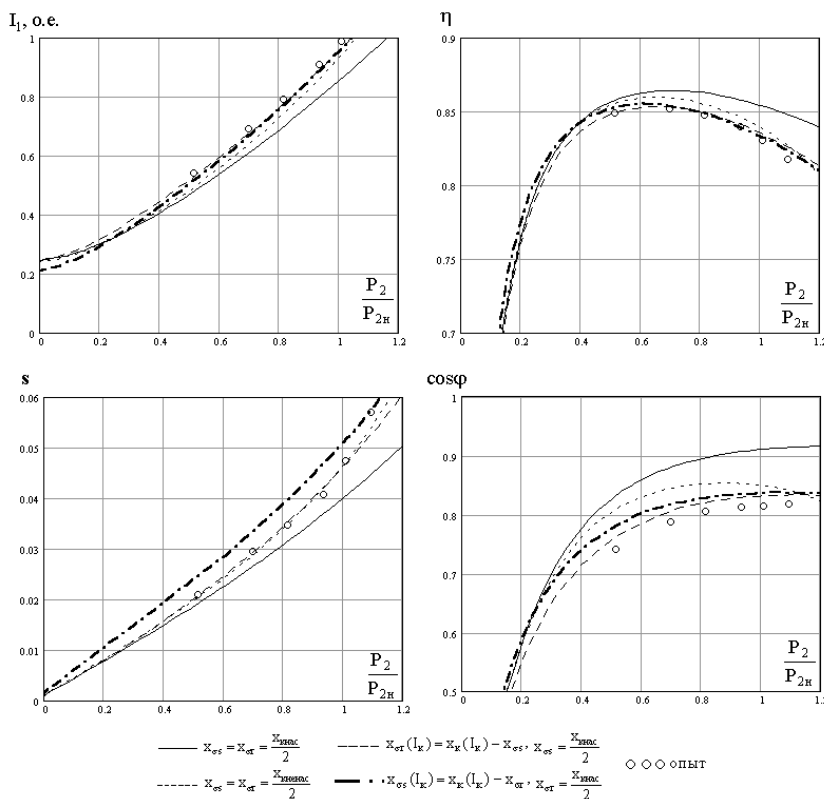


Рис.5 Рабочие характеристики ПАД SGMе 18/18 kW

и 4 дают близкие результаты.

Следует отметить, что при расчете рабочих характеристик регулируемых погружных асинхронных двигателей рассматриваемого типа неучет насыщения может привести к гораздо более значительным погрешностям в анализируемых электромагнитных величинах, что, безусловно, негативно скажется на результатах анализа, в частности, регулировочных свойств объекта исследования.

Анализируя полученные кривые можно сделать вывод, что рабочие характеристики при постоянных напряжении и частоте питания для разных способов задания параметров отличаются незначительно. При холостом ходе машины ( $P_2 \approx 0$ ) они, в вариантах расчета (1, 2 и 3) практически совпадают. В области номинального режима ( $P_2 \approx P_{2H}$ ) выбор индуктивных параметров согласно варианту 1 приводит к погрешности в расчетах порядка 12 – 15 %. Варианты 2, 3



При учете насыщения простой корректировкой параметров в зависимости от рассматриваемого режима остается открытым вопрос выбора их значений. Универсальным способом учета насыщения остается способ, использованный в представленной выше математической модели.

Для получения более полной информации об особенностях режимов работы погружных асинхронных двигателей данной разновидности рассмотрены вопросы динамики пуска этих машин. При этом режим пуска является наиболее тяжелым для машины и связан с широким диапазоном изменения основных параметров.

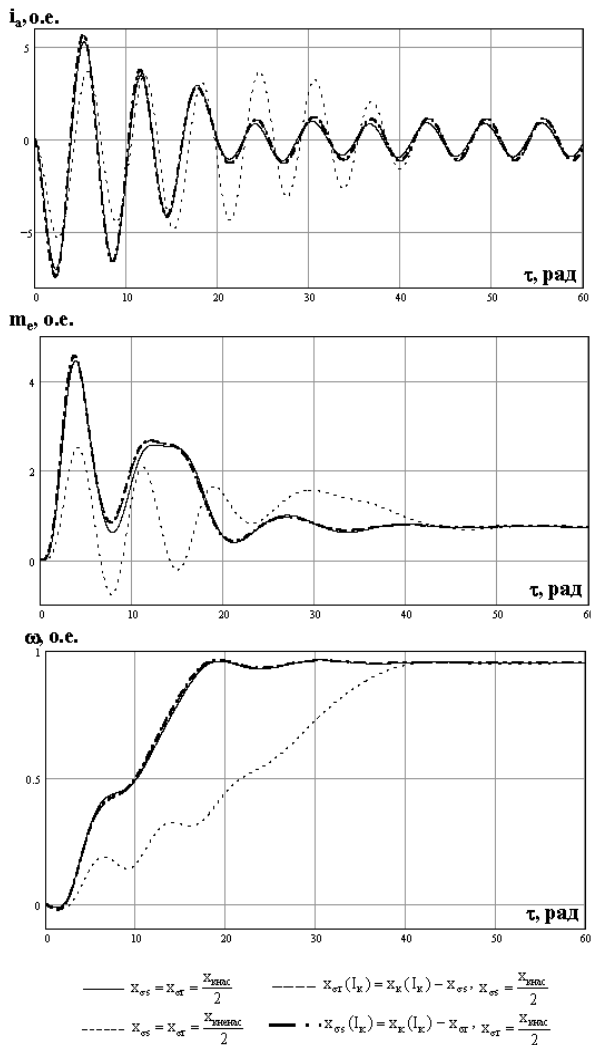


Рис.6 Прямой пуск ПЭД – 32 – 117

анализа динамических процессов погружных асинхронных двигателей, а вариант 1 (сплошная линия, рис.6) будет давать погрешность при анализе установившегося режима работы и воспроизведении динамических процессов при пониженных значениях тока двигателя. Показано, что учет насыщения можно произвести корректировкой параметров двигателя или учитывая насыщение по вышеприведенной методике.

На основании опытных данных для рассмотренного ряда погружных асинхронных двигателей произведена систематизация их параметров и характеристик. Вводится понятие обобщенного параметра. Удобство применения данного подхода заключается в возможности проведения анализа характеристик погруж-

На рис. 6 показан один из наиболее тяжелых динамических режимов прямого пуска погружных двигателей от сети бесконечной мощности при питании от источника с синусоидальным номинальным напряжением. Здесь момент сопротивления, действующий на валопровод машины, изменяется по закону:

$$m_t = k \cdot \omega^2 + m_{\text{mix}} \cdot \exp\left(-\frac{\tau}{T_{\text{mix}}}\right), \text{ где ко-}$$

эффициент  $k = 0.8$ ,  $m_{\text{mix}} = 0.5$ ,  $T_{\text{mix}} = 5$  рад. Представлены расчетные зависимости фазного тока статора  $i_a$ , электромагнитного момента  $m_e$  и частоты вращения  $\omega$  в функции синхронного времени  $\tau$  для погружного двигателя ПЭД – 32 – 117 ЛГВ5.

Анализируя зависимости для всех типов рассматриваемых машин, можно сделать вывод о существенном влиянии насыщения на их динамические характеристики. При этом вариант расчета 2 (пунктирная кривая, рис.6) является неприемлемым для

ных асинхронных с учетом насыщения, пользуясь обычными каталожными данными машины. С этой целью получены коэффициенты приведения индуктивного сопротивления короткого замыкания к аналогичному параметру обобщенной машины. Они представляют собой отношение индуктивностей короткого замыкания выбранного и обобщенного двигателей, определенных при номиналь-

ном токе машины:  $K_{пр\sigma} = \frac{x_k|_{I_n}}{x_k^{обобщ}|_{I_n}}$ . Тогда приведение к реальной характеристике

$x_k = f(I_k)$  любого из погружных двигателей можно осуществить по следующему правилу:  $x_k(I_k) = K_{пр\sigma} x_k^{обобщ}(I_k)$ .

Произведено сравнение рабочих характеристик погружных двигателей, полученных в результате расчета с учетом насыщения по реальным параметрам и по обобщенной характеристике. Указанные характеристики отличаются не более, чем на 1%, что иллюстрирует правомерность использования предложенной методики при анализе установившихся режимов работы погружных асинхронных двигателей.

**Третья глава** содержит теоретическое обоснование возможного использования погружных асинхронных двигателей с комбинированными конструкциями роторов.

Известно, что наиболее простым способом регулирования частоты вращения является параметрический способ при изменении только амплитуды питающего напряжения. Для асинхронной машины в классическом исполнении величина критического скольжения мала, что ограничивает применимость данного способа. Задача расширения области регулирования параметрическим способом может быть решена косвенно, внося конструктивные изменения в элементы и узлы машины, в частности, путем применения ротора другой конструкции на основе опыта проектирования двигателей с более мягкой механической характеристикой. К таким двигателям, например, относится машина с массивным ферромагнитным ротором. Асинхронный двигатель с массивным ферромагнитным ротором при использовании в качестве приводного двигателя, наряду с недостатками (низкий коэффициент мощности и коэффициент полезного действия), обладает по сравнению с двигателем в классическом исполнении рядом преимуществ, связанных, прежде всего, с улучшенными пусковыми, регулировочными, вибро-акустическими и прочностными характеристиками. В настоящей работе рассмотрены варианты массивного ферромагнитного ротора, к которым применены ряд конструкторских комбинаций, улучшающих параметры и характеристики двигателя с массивным ферромагнитным ротором. Рассмотрены следующие варианты комбинированных роторов:

1) массивный ротор с торцевыми кольцами и медным покрытием; 2) массивный ротор с торцевыми кольцами и продольными пазами на поверхности, ширина и глубина которых равны ( $b_p = 3$  мм,  $h_p = 3$  мм) при числе пазов  $z_p = 30$ ; 3) массивный ротор с дополнительной короткозамкнутой обмоткой, у которого форма, размеры и число пазов соответствуют ротору машины ПЭД – 32 – 117.

Исследованию характеристик АД с массивными ферромагнитными роторами посвящены работы многих отечественных и иностранных авторов. Используемая в настоящей работе методика представляет собой обобщение методик расчета параметров и характеристик таких машин, полученное на основании анализа литературы. Исследование статических характеристик асинхронных двигателей с комбинированными роторами проводится при помощи схем замещения, где влия-

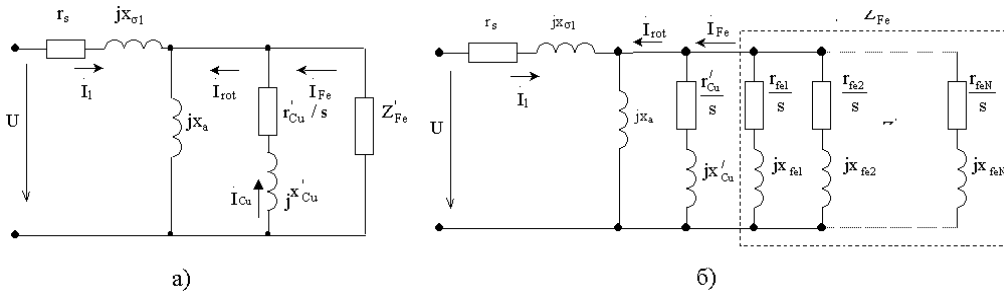


Рис.7 Схемы замещения АД с комбинированным ротором

ние массивного ферромагнитного сердечника ротора моделируется одним эквивалентным контуром с комплексным сопротивлением  $Z'_{Fe}$  (рис.7а), активная и индуктивная составляющая которого зависят от глубины проникновения электромагнитной волны в массивный ферромагнитный сердечник ротора.

Анализ более широкого спектра режимов, в частности, при моделировании динамических процессов или статических процессов в регулируемой системе, с использованием подобной схемы замещения представляет значительную трудность вследствие нелинейных свойств сопротивления  $Z'_{Fe}$ . Поэтому в настоящей работе при анализе таких режимов использована методика основанная на применении многоконтурных схем замещения с постоянными  $r_{fei}$  и  $x_{fei}$  ( $i = 1, N$ ) параметрами (рис.7б).

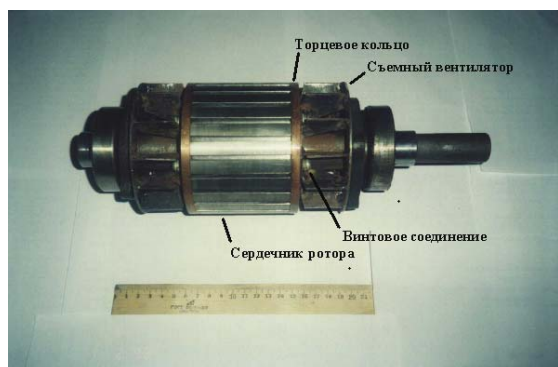
В соответствии с этим положением проведено уточнение математической модели, описанной в гл. 1, путем добавления алгебраических и дифференциальных уравнений, учитывающих многоконтурную структуру ротора. Таким образом, приходим к весьма простому и надежному алгоритму, преимуществом которого является, прежде всего, постоянство параметров, описывающих влияние массивного ферромагнитного сердечника ротора.

Экспериментальное исследование асинхронных двигателей с комбинированными роторами и массивными ферромагнитными сердечниками позволили провести оценку используемых методик определения параметров схем замещения для установления адекватности опытных и расчетных частотных характеристик. Решение данной задачи было связано, прежде всего, с проектированием и разработкой экспериментальных образцов, построением испытательных стендов и систем управления входными параметрами двигателей. Особым пунктом стояли вопросы технологии производства, возможности изготовления, экономические и финансовые решения.

В качестве базового двигателя выбран асинхронный двигатель А – 41 – 4 с короткозамкнутым ротором. В соответствии с конструктивными особенностями базового двигателя разработаны и изготовлены экспериментальные образцы комбинированных роторов. На рис.8 представлены их фотографические изображения. Данные экспериментальные образцы были разработаны автором и изго-

щения, где влияние массивного ферромагнитного сердечника ротора моделируется одним эквивалентным контуром с комплексным со-

товлены на АО «Электросила». На испытательном стенде проведены опыты холостого хода и короткого замыкания при разных частотах питающего напряжения асинхронного двигателя А – 41 – 4 с различной конструкцией роторов.



а) массивный ферромагнитный ротор с продольными проточками



б) массивный ротор с медным покрытием

в) массивный ротор с беличьей клеткой

Рис.8 Экспериментальные образцы комбинированных роторов

ских показателей погружного асинхронного двигателя ПЭД – 32 – 117 ЛГВ5 при переходе от классической конструкции ротора к различному исполнению комбинированного ротора.

Табл. 2 иллюстрирует энергетические показатели различных конструкций роторов. Номинальная мощность двигателя выбиралась из условия равенства номинальных токов двигателей при любом исполнении роторов. Базисные напряжение, мощность и момент соответствуют двигателю ПЭД – 32 – 117 ЛГВ5 ( $U_6=577.35$  В;  $I_6=25.5$  А;  $P_6=3U_6I_6$ ;  $M_6=P_6/2\pi f_6$ ).

Таблица 2. Энергетические показатели различных конструкций роторов ПАД

Тип ротора	$P_2$ , кВт	$s_H$	$\cos\varphi$	$\eta$	$M_H$ , о.е.	$M_H$ , о.е.	$I_H$ , о.е.	$S_{кр}$	$M_{max}$ , о.е.
Обычного исполнения	32	0,055	0.860	0.831	0.794	2,01	6,43	0,395	2,609
Массивный с медным покрытием	16	0,052	0.540	0.662	0.455	3,19	6,15	-	-
Массивный с продольными проточками	20.8	0,063	0.616	0.756	0.530	2,46	4,88	-	-
Массивный с беличьей клеткой	29.4	0,050	0.784	0.825	0.780	2,43	6,92	0,461	2,785

Сравнительный анализ расчетных и опытных характеристик показал, что применяемые методики расчета асинхронных машин с комбинированными роторами дают хорошую точность в области номинальных значений частот питания двигателя. В области же малых частот проявляется погрешность расчета, связанная, прежде всего, с учетом свойств применяемой стали при малых частотах перемагничивания и приближенным подходом к решению данной задачи. Но для анализа рассматриваемого в настоящей работе класса задач обладают достаточной для инженерных расчетов точностью.

В первой части **четвертой главы** производится анализ рабочих характеристик и энергетических

Вторая часть **четвертой** главы посвящена определению параметров многоконтурных схем замещения массивных ферромагнитных сердечников комбинированных роторов исследуемой конструкции. Показано, что для адекватного описания процессов, протекающих в массивном ферромагнитном сердечнике комбинированной конструкции ротора, достаточно ограничиться тремя контура-

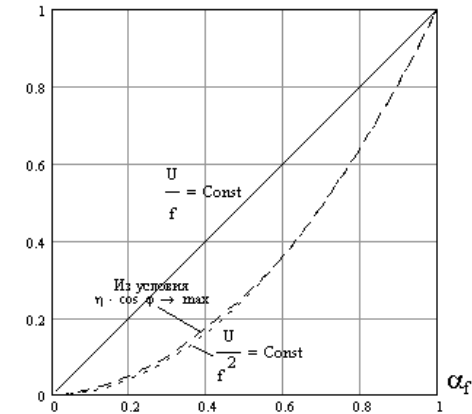


Рис.9 Зависимость  $\alpha_U = f(\alpha_f)$  при различных способах регулирования двигателя ПЭД – 32  $\eta \cdot \cos \varphi$

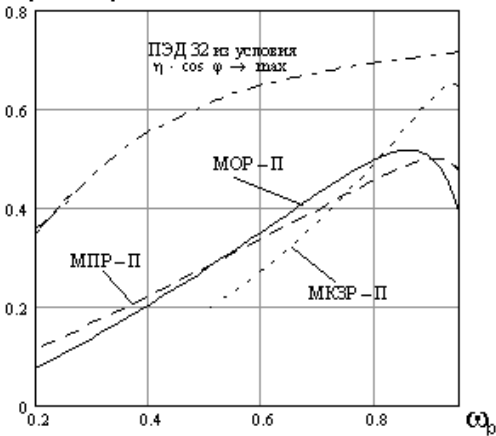


Рис. 10 Сравнительные зависимости  $\eta \cdot \cos \varphi = f(\omega_p)$ .

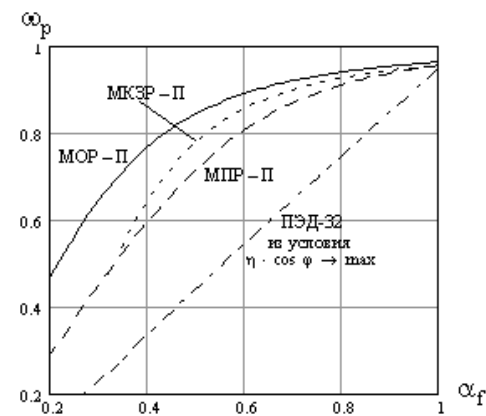


Рис. 11 Зависимости частоты вращения ротора  $\omega_p = f(\alpha)$

ми многоконтурной схемы замещения.

Третья часть **четвертой** главы посвящена вопросам регулирования погружного двигателя и является ключевой в настоящей работе.

На первом этапе рассмотрены различные законы частотного регулирования скорости вала погружного асинхронного двигателя обычного исполнения при насосной нагрузке на валу машины, где  $m_t = k \cdot \omega^2$ . В результате

сравнения энергетических показателей показано, что наиболее рациональным способом частотного управления является закон регулирования близкий к условию  $\frac{U}{f^2} = \text{const}$ . В этом

случае имеют место максимальные величины энергетических показателей  $\eta \cdot \cos \varphi$  для фиксированных частот вращения ротора  $\omega_p$ . На рис.9 представлены зависимости относительных напряжения  $\alpha_U$  и частоты  $\alpha_f$  при различных способах регулирования двигателя ПЭД – 32 – 117 ЛГВ5.

На втором этапе произведен сравнительный анализ энергетических показателей при регулировании частоты вращения двигателя с ротором обычного исполнения при рациональном законе регулирования и двигателей с комбинированной конструкцией роторов при регулировании только амплитуды приложенного напряжения (параметрический способ). На рис.10 представлены сравнительные зависимости  $\eta \cdot \cos \varphi = f(\omega_p)$ . Здесь, МОР-П – массивный омедненный ротор, МПР-П – массивный ротор с проточками, МКЗР-П – массивный ротор с беличьей клеткой при параметрическом регулировании. На рис. 11 показаны зависимости частоты вращения ротора  $\omega_p = f(\alpha)$ .

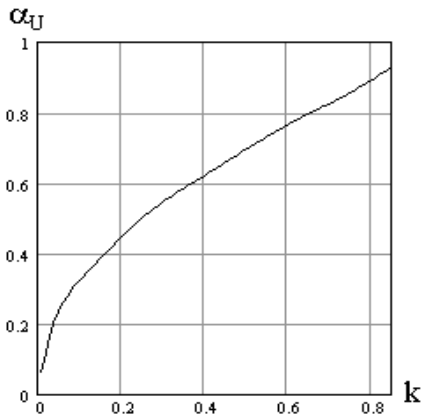
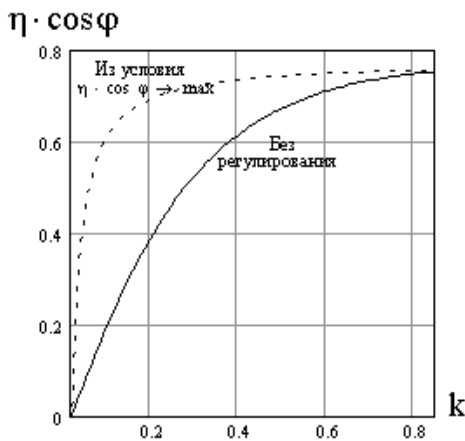
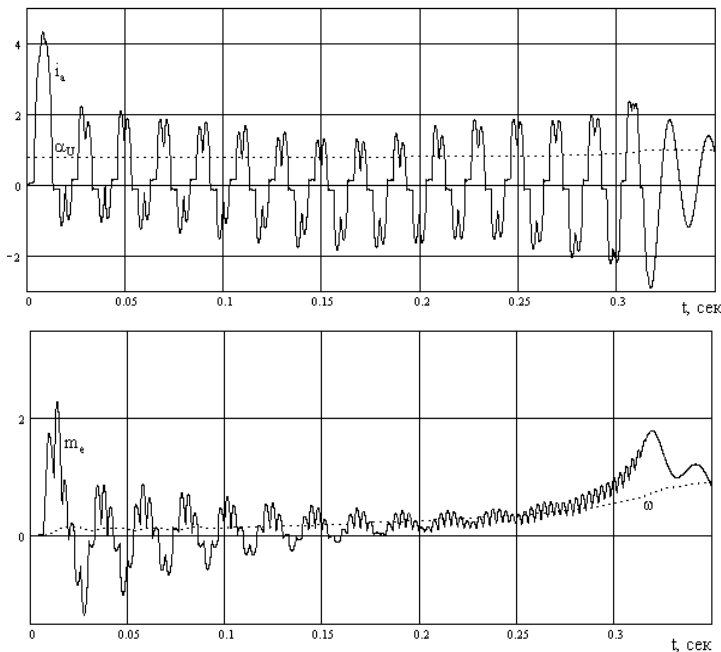
Рис.12 Зависимость  $\alpha_U = f(k)$ Рис.13 Зависимость  $\eta \cdot \cos \varphi = f(k)$ 

Рис. 14 Регулируемого пуска параметрическим способом двигателя с массивным ротором и продольными проточками при питании от преобразователя

На третьем этапе рассмотрена возможность регулирования расхода откачиваемой жидкости с помощью заслонки трубопровода при одновременном изменении напряжения питания приводного двигателя обычного исполнения для повышения энергетических показателей насоса. Данный способ регулирования можно отнести к параметрическому способу. Поиск закона регулирования напряжения  $U$  при изменении коэффициента  $k$  ( $m_t = k\omega^2$ ) проводился из условия получения максимального произведения  $\eta \cdot \cos \varphi$ . На рис.12 представлена кривая относительного напряжения  $\alpha_U = f(k)$  полученного закона регулирования. На рис.13 представлены кривые  $\eta \cdot \cos \varphi = f(k)$  для регулируемой и нерегулируемых напряжением систем.

На четвертом этапе исследованы процессы регулируемого пуска погружных асинхронных двигателей при различных законах управления и различных вариантах применяемых конструкций роторов. Рассматриваются случаи питания двигателей от источника,

как с синусоидальной, так и ступенчатой формой выходного сигнала. Момент сопротивления  $m_t$ , действующий на валопровод двигателя, учитывает момент основной вентиляторной (насосной) нагрузки пропорциональный  $k\omega^2$  и момент сухого трения

$$m_{\text{mix}} e^{-\frac{\tau}{T_{\text{mix}}}}$$
 При расчете принято, что  $k = 0.8$ ;  $m_{\text{mix}} = 0.8$ ;  $T_{\text{mix}} = 5$  рад. (0.0159 сек.). Инерционная постоянная ротора  $H_j$  принята равной 34 рад., что соответствует двигателю ПЭД – 32.

При пуске двигателя желательно ограничить ударные токи и моменты. Уменьшение пусковых токов, с одной стороны, снижает

электродинамические силы, действующие на элементы конструкции, с другой необходимо оценить температурный режим машины, для оценки которого ис-

пользован критерий  $Q = \int_0^{\tau_n} i_a^2(\tau) d\tau$ .

Рассмотрены процессы пуска с постоянным ускорением ротора двигателей с ротором обычного исполнения при частотном способе регулирования и двигателей с комбинированной конструкцией роторов при регулировании только амплитуды приложенного напряжения. Величина ускорения ротора варьировалась в диапазоне  $a = 0.03 \div 0.05$  и определялась по статической характеристике

$a = \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{H_j} (m_{est} - m_t)$ , где  $m_{est}$  – статический электромагнитный момент двигателя,

полученный при текущей частоте вращения ротора  $\omega$ , относительной частоте  $\alpha_f$  и относительном напряжении  $\alpha_U$ .

В качестве иллюстрации на рис.14 представлены результаты расчета регулируемого пуска параметрическим способом двигателя с массивным ротором и продольными проточками при питании от преобразователя, собранного по схеме с прямым и обратным вентилем в цепи каждой из фаз двигателя. На рис. 15 представлены результаты вариационных расчетов режима регулируемого пуска с различной конструкцией роторов погружных двигателей.

На пятом этапе проведено качественное сравнение экономических показателей при применении частотного и параметрического способов регулирования с погружным асинхронным двигателем обычного исполнения и двигателями с комбинированными роторами.

Выполненные исследования позволяют сделать вывод о том, что с точки зрения энергосбережения наиболее рациональным для погружных двигателей с ротором в классическом исполнении является частотный способ управления.

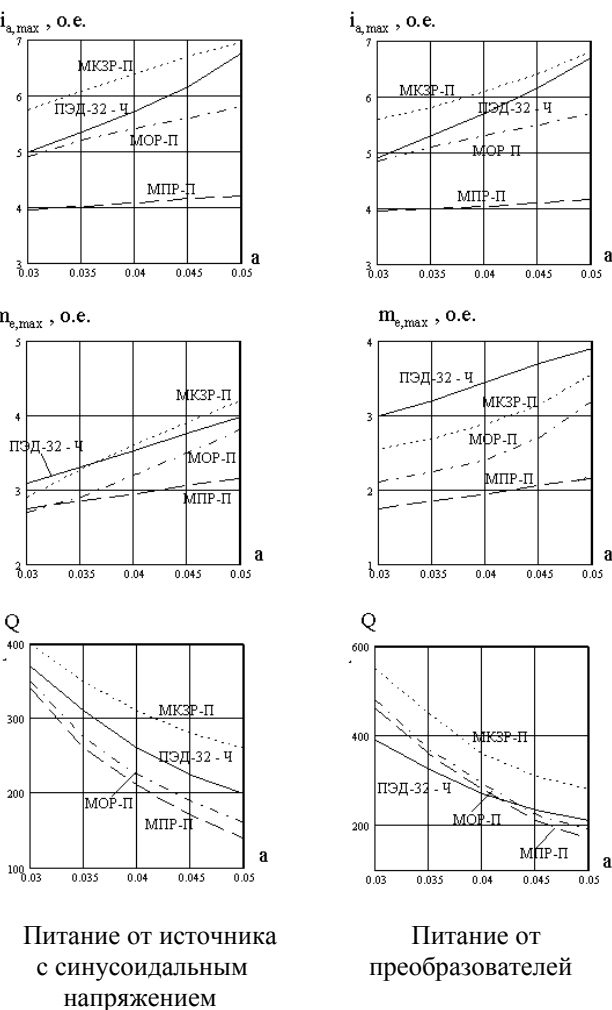


Рис.15 Зависимости  $i_{a,max}$ ,  $m_{e,max}$ ,  $Q = f(a)$

Параметрическое управление по сравнению с частотным, в случае двигателей с массивным ротором и продольными проточками и массивным ротором с беличьей клеткой, позволяет сэкономить затраты на приобретение или изготовление машины в тандеме с преобразователем. Двигатель с массивным ротором и продольными проточками в данном сравнении обладает более широкой областью регулирования. При этом увеличивается энергопотребление, ухудшаются

энергетические показатели. Но, рассматривая экономические аспекты, связанные с оплатой труда обслуживающего персонала, параметрическое регулирование, как наиболее простое, имеет значительное преимущество. С другой стороны, применение параметрического регулирования при регулировании расхода откачиваемой жидкости погружного насоса при одновременном регулировании заслонки трубопровода и напряжении питания двигателя, позволяет существенно улучшить энергетические показатели системы по сравнению с нерегулируемой насосной системой, снизить ударные моменты и токи при пуске.

### **Заключение**

1. Рассмотрены конструктивные особенности, условия и опыт эксплуатации погружных асинхронных двигателей. Обоснована целесообразность введения регулирования данного класса двигателей при эксплуатации в системе электропривода погружной насос – асинхронный двигатель.
2. Разработан метод анализа характеристик погружных асинхронных двигателей в установившихся и переходных режимах работы, позволяющий учитывать наличие преобразователя на входе электрической системы, специфические характеристики нагрузки, насыщение по путям основного потока и потоков рассеяния обмоток асинхронного двигателя и многослойную структуру ротора.
3. Выполнено опытное исследование параметров нескольких погружных асинхронных двигателей различных фирм производителей в диапазоне мощностей от 5 до 33 кВт. Установлен диапазон изменения и влияние индуктивных параметров на энергетические характеристики рассмотренных погружных асинхронных двигателей в установившихся и переходных режимах. Показано, что на характеристики рассматриваемых машин оказывает существенное влияние насыщения по путям потоков рассеяния обмоток и основного потока в машине. Произведено обобщение параметров и характеристик данного класса машин, что позволяет проводить анализ их режимов с учетом насыщения по обобщенным параметрам, пользуясь каталожными данными.
4. Выполнено исследование влияния характеристик асинхронного двигателя на эксплуатационные показатели погружной насосной установки при введении регулирования и проведен анализ путей их совершенствования за счет конструктивных и технологических новаций.
5. Рассмотрены параметрический и частотный способы регулирования погружных асинхронных двигателей. Показано, что при выборе параметрического способа регулирования, как наиболее простого, целесообразно применить комбинированную конструкцию ротора, имеющую в данном случае, по сравнению с ротором обычного исполнения, большую область регулирования частоты вращения. При анализе режимов работы асинхронных двигателей с комбинированной конструкцией ротора предложено применение многоконтурных схем замещения. Произведено сравнение опытных и расчетных данных для асинхронных машин с комбинированным ротором.
6. Проведено сравнение способов регулирования погружных асинхронных двигателей при различных вариантах исполнения ротора. Для машин с ротором обычного исполнения сформулирован закон изменения амплитуды и частоты питающего напряжения из условий получения максимальных значений  $\eta \cdot \cos\varphi$ .



7. Показано, что привод с двигателем обычного исполнения при частотном регулировании обладает лучшими энергетическими показателями. При переходе к двигателю с комбинированной конструкцией ротора при параметрическом регулировании увеличивается энергопотребление, ухудшаются энергетические показатели привода, что является негативным фактором. Вместе с тем снижаются капитальные затраты и стоимость обслуживания оборудования, что является преимуществом параметрического способа регулирования.

8. Произведенные в настоящей работе исследования позволяют сделать вывод, что: а) для улучшения энергетических показателей насосных систем с погружными асинхронными двигателями, регулируемых при помощи механических заслонок, целесообразно введение регулирования приводного двигателя; б) в случае эксплуатации насосных систем при длительном регулировании расхода целесообразно применение частотного способа регулирования для двигателя с ротором обычного исполнения и параметрического способа регулирования – для двигателя с комбинированным ротором (с потерей энергетических показателей при более дешевом внедрении двигателя в тандеме с преобразователем, простоте обслуживания и надежности агрегата, по сравнению с нерегулируемой по частоте вращения системой); в) в случае кратковременного регулирования или для нерегулируемых по частоте вращения установок, с целью повышения их энергетических свойств, а также для снижения ударных токов и моментов в процессе пуска целесообразно применение параметрического способа регулирования.

#### Публикации:

1. Кади - Оглы Е.Ф. Систематизация параметров и характеристик некоторых погружных асинхронных двигателей с учетом насыщения. // Вестник ХГПУ «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», Харьков, Украина: - 1998, - с. 305 – 306.
2. Сидельников Б.В., Кади – Оглы Е.Ф. Определение параметров и характеристик погружных асинхронных двигателей с комбинированным ротором. // Proceedings of 4 – th International Scientific Conference on UEES, St-Petersburg, Russia, June 21 – 24, 1999. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin: 1999, - pp. 473 – 478.
3. Сидельников Б.В., Кади – Оглы Е.Ф. Динамика пуска погружных асинхронных двигателей с комбинированным ротором. // 3 – я Міжнародна науково – технічна конференція «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенергетиці» 25 – 30 жовтня 1999 року: Тези доповідей., Львів, Україна, - 1999, - с. 243 – 244.
4. Никифоров А.Н., Кади – Оглы Е.Ф. Методы учета насыщения при расчете режимной задачи для погружных асинхронных двигателей с комбинированным ротором. // Материалы межвузовской научной конференции. / XXVIII НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбГТУ 6-11 декабря 1999 г, Часть I, - с. 77 – 78.
5. Сидельников Б.В., Кади – Оглы Е.Ф. Способы регулирования погружных асинхронных двигателей с массивными и комбинированными роторами. // Вестник ХГПУ «Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика», Харьков, Украина: - 2000, - с. 253 – 254.