

На правах рукописи

АБДРАХМАНОВА ТАТЬЯНА БОРИСОВНА

**ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ БЛОК
СКВАЖИННОГО ЭЛЕКТРОНАСОСНОГО АГРЕГАТА
С МАГНИТНОЙ МУФТОЙ**

05.09.01 – “Электромеханика и электрические аппараты”

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2002

Работа выполнена на кафедре электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Муравлев О.П.

Консультант: кандидат технических наук
Подлевский Н.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Лукутин Б.В.

кандидат технических наук, доцент
Педиков В.М.

Ведущее предприятие: ОАО «Сибэлектромотор», г. Томск

Защита диссертации состоится 26 июня 2002 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета К212.269.03 в актовом зале Томского политехнического университета (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ТПУ.

Автореферат диссертации разослан мая 2002 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

кандидат технических наук, доцент _____ А.Е. Алехин

Актуальность работы. Скважинные электронасосные агрегаты предназначены для поднятия из глубины земли воды или нефти через специально обустроенные скважины. В состав агрегатов, которые используются в настоящее время на нефтепромыслах и водозаборах, входят, в качестве основных устройств, трехфазный асинхронный электродвигатель и центробежный насос. Длительная эксплуатация электронасосов показала, что они имеют малый срок службы и высокую аварийность, вызванную проникновением скважинной жидкости внутрь электродвигателя. Слабым местом конструкции является узел сочленения валов электродвигателя и насоса, где полости насоса и электродвигателя могут сообщаться друг с другом. Попытки защитить место сочленения валов уплотнениями различного типа не принесли успеха, так же как безуспешными оказались попытки создать электродвигатели, стойкие к воздействию скважинной жидкости. Решить данную проблему удалось благодаря успехам в разработке и промышленном освоении постоянных магнитов с высокой магнитной энергией на основе редкоземельных металлов. В проектах агрегатов нового типа герметизация электродвигателя осуществляется сплошным неподвижным экраном, непроницаемым для жидкостей и газов, который расположен между электродвигателем и насосом. Крутящий момент электродвигателя передается насосу через герметизирующий экран бесконтактно синхронной магнитной муфтой на постоянных магнитах. Электродвигатель и магнитная муфта образуют электромеханический блок, являющийся объектом исследования в настоящей работе.

Высокие герметизирующие свойства экрана позволяют создать в полости электродвигателя наиболее благоприятную среду для обмоток и подшипниковых опор, благодаря чему долговечность электродвигателей увеличивается в несколько раз. Использование на нефтепромыслах агрегатов нового типа повышает эффективность нефтедобычи за счет снижения затрат на ремонт оборудования, увеличения межремонтного срока, увеличения коэффициента использования скважин и за счет экономии электроэнергии по сравнению с аналогичными серийными агрегатами.

Однако с введением в состав агрегата магнитной муфты возникает необходимость решения задачи проектирования агрегата как электромеханической системы "электродвигатель – магнитная муфта – насос". Анализ научно-технического состояния данной области техники показал, что разработка методов проектирования агрегатов с магнитными муфтами требует решения ряда проблем, которые в настоящее время недостаточно проработаны и слабо освещены в технической литературе.

Целью диссертационной работы является разработка комплекса математических моделей электромеханического блока скважинного электронасосного агрегата и разработка основных положений параметрической оптимизации электродвигателя и магнитной муфты. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать математическую модель скважинного электродвигателя, адаптированную к оптимизационным расчетам и учитывающую особенности эксплуатации;
- создать математическую модель магнитной муфты на постоянных магнитах, пригодную для проведения оптимизационных расчетов;
- исследовать электромеханический переходный процесс пуска агрегата с целью проверки устойчивости системы "электродвигатель – муфта - насос" и выработки условий сохранения муфтой синхронизма в период пуска;
- разработать основные положения оптимального проектирования электродвигателя и магнитной муфты.
- Разработать математическую модель расчета температуры обмотки статора с целью контроля соблюдения ограничений по нагреву в оптимизационном процессе.
- Разработать на основе анализа колебательного переходного процесса пуска агрегата алгоритм совместного проектирования электродвигателя и магнитной муфты, обеспечивающий совместимость их электромеханических характеристик.

Научная новизна работы.

В результате выполнения работы получены следующие новые научные результаты:

- Предложена схема замещения и разработана математическая модель асинхронного электродвигателя, отражающие особенности происходящих в скважинных электродвигателях электромагнитных процессов и позволяющая рассчитать рабочие и пусковые характеристики в условиях непостоянства напряжения на входе электродвигателя, зависящего от скольжения.

- Разработана математическая модель синхронной магнитной муфты на постоянных магнитах, основанная на аналитическом расчете магнитных полей в активной зоне и представлении постоянного магнита как контура с током.

- Предложена математическая модель колебательного переходного процесса пуска агрегата, основанная на аналитических зависимостях крутящих моментов, приложенных к валам, и позволяющая рассчитать параметры колебаний с высокой точностью.

- Впервые предложен аналитический метод расчета допустимой рабочей температуры постоянных магнитов, основанный на анализе параметров магнитного поля в теле магнита.

- На основе разработанных математических моделей составлен алгоритм поиска оптимального проекта электронасосного агрегата с обоснованным выбором параметров оптимизации, ограничителей и критериев оптимальности.

Практическая ценность. Практическая ценность данной работы заключается в следующем:

- Созданная на основе предложенной автором математической модели инженерная программа для ПК предназначена для расчета параметров схемы замещения, пусковых и рабочих характеристик скважинного асинхронного электродвигателя при электропитании его по кабелю с большим активным сопротивлением.

- Разработанная автором и реализованная в виде инженерной программы для ПК математическая модель магнитной муфты предназначена для расчета

размеров активной зоны и характеристики синхронизирующего момента синхронной магнитной муфты.

- Математическая модель переходного процесса пуска, послужившая основой для создания инженерной программы расчета, предназначена для определения параметров крутильных колебаний агрегата и амплитуды синхронизирующего момента муфты, обеспечивающего устойчивое движение агрегата при разгоне.

- Предложенный аналитический метод оценки магнитного состояния магнитов муфты используется для расчета предельной рабочей температуры магнитов, при которой не происходит необратимого изменения их свойств.

- Созданный на основе разработанных математических моделей пакет программ позволил получить оптимальный проект скважинного электронасосного агрегата.

Методы исследований. Для решения поставленных задач привлекалась теория электрических машин, методы математического анализа, включая векторный анализ, методы математического моделирования, методы математического программирования и методы численного решения задач. Проведены экспериментальные исследования опытного образца электронасосного агрегата.

Апробация. Результаты проведенных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях и научно-технических советах:

- Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии" (г. Томск, 1999).

- Шестая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии" (г. Томск, 2000).

- Седьмая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых "Современная техника и технологии" (г. Томск, 2001).

- 16 научно-техническая конференция " Электронные и электромеханические системы и устройства" (г. Томск, 2000).

- Международная научно-техническая конференция " Электромеханические преобразователи энергии" (г. Томск, 2001).
- Научно техническая секция электромеханики НЦП "Полюс".
- Научно-технический совет НЦП "Полюс".

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано 7 печатных работ.

Реализация результатов работы. Пакет прикладных программ, разработанных на основе проведенных исследований, использован при проектировании водяных и нефтяных электронасосных агрегатов в НПЦ «Полюс. Опытные образцы агрегатов прошли испытания в НГДУ Лугинецкнефть ОАО «Томскнефть» ВНК с положительными результатами.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из семи разделов и заключения, содержащих 190 страниц машинописного текста, 12 таблиц, 19 рисунков и списка литературы из 115 наименований.

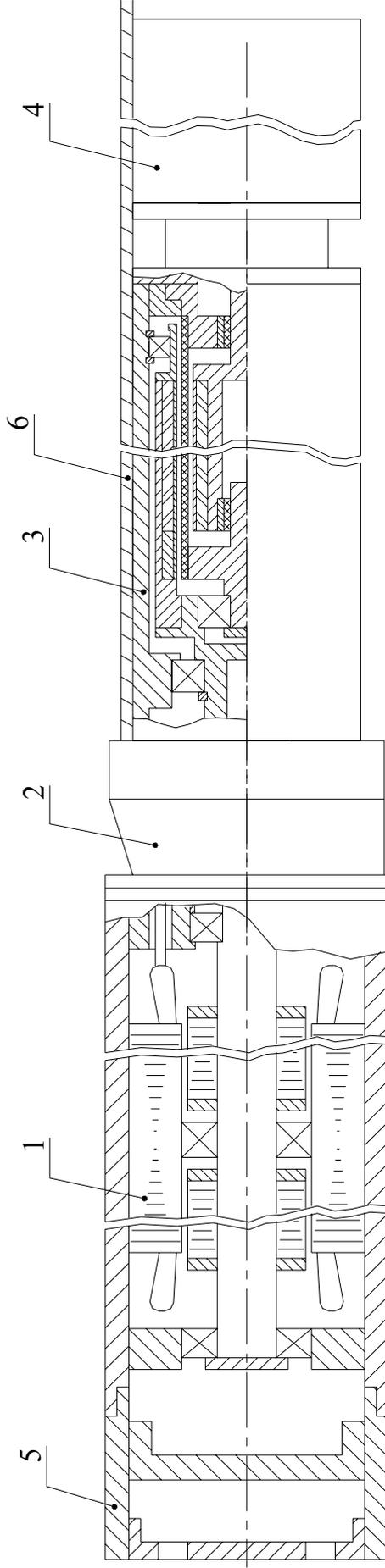
В первом разделе дана общая характеристика выполненной работы. Сформулированы задачи, цель работы, научная новизна и практическая ценность диссертации. Приведена краткая аннотация выполненной работы по разделам.

Во втором разделе дано описание состава агрегата и конструкции электромеханического блока.

Нефтяной электронасосный агрегат состоит из трехфазного асинхронного электродвигателя, магнитной муфты, компенсатора давления, герметичного токовода и центробежного насоса (рисунок 1).

В настоящее время в электронасосных агрегатах с целью обеспечения максимальной надежности применяются только короткозамкнутые трехфазные электродвигатели. Конструкция скважинных электродвигателей имеет некоторые особенности, обусловленные применением в скважинах с ограниченным диаметром обсадной трубы.

В третьем разделе отмечены особенности скважинных электродвигателей, приведена новая схема замещения, математические модели номинального



- 1 - асинхронный электродвигатель; 2 - герметичный токоввод;
3 - магнитная муфта; 4- центробежный насос;
5 - компенсатор; 6 - кабель.

Рисунок 1 Агрегат электронасосный нефтяной

режима, расчета рабочих и пусковых характеристик и результаты исследования теоретических характеристик электродвигателя.

Скважинные электродвигатели своим устройством и принципом действия не отличаются от электродвигателей общепромышленного исполнения, тем не менее, рабочие и пусковые характеристики скважинных электродвигателей имеют особенности, являющиеся следствием удаленности источника питания от места расположения электродвигателя, а также тем, что их главные размеры отличаются большим отношением длины пакета к внутреннему диаметру статора. Вследствие особенностей электропитания и соотношения главных размеров известные математические модели оказываются неадекватными реальным рабочим процессам в скважинном электродвигателе.

Электронасосы для подъема нефти эксплуатируются, как правило, на большой глубине и длина кабеля, подводящего напряжение к электродвигателю, достигает 1000 и более метров. Ограничение на поперечные размеры кабеля и большая его длина приводят к тому, что активное сопротивление жилы превосходит в несколько раз активное сопротивление фазы электродвигателя. Как следствие, увеличение скольжения, даже в узком пределе от значения при холостом ходе до номинального, приводит к изменению напряжения на клеммах электродвигателя, магнитной индукции в зазоре, намагничивающего тока и ЭДС статора, причем указанные изменения столь значительны, что пренебречь ими нельзя.

Участие в рабочем процессе активного и индуктивного сопротивлений кабеля учитывается включением их в предложенную схему замещения последовательно с сопротивлениями обмотки статора. Отмеченная зависимость тока намагничивания от режима работы лишает смысла преобразование схемы с переносом ветви намагничивания на вход, поэтому схема замещения сохранила "Т-образный" вид (рисунок 2). Сопротивления намагничивания и потерь в стали отображают связанные, но различные физические явления, поэтому они образу-

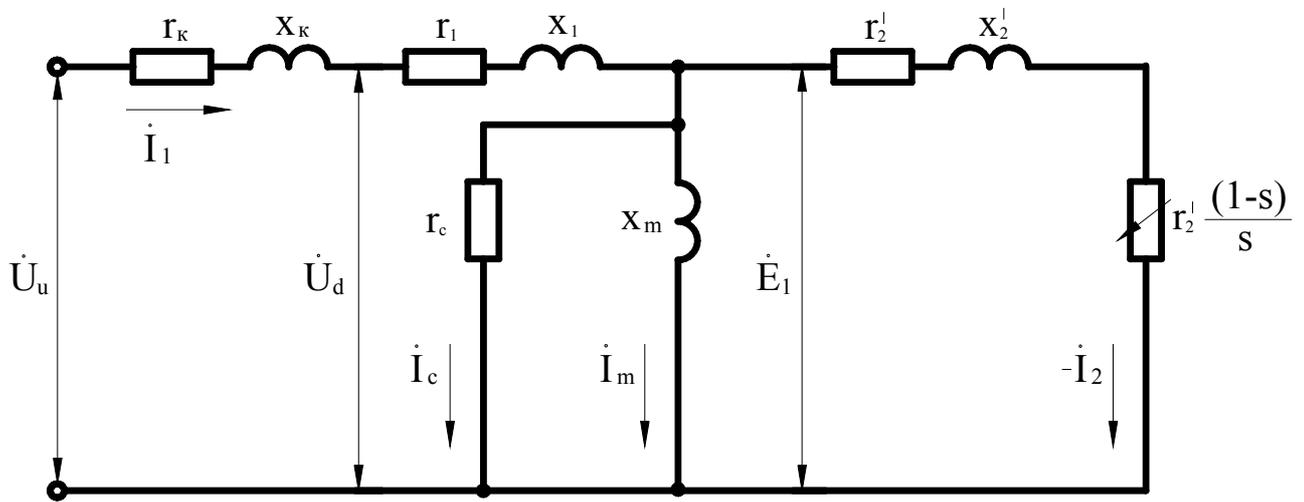


Рисунок 2 Схема замещения для номинального режима

ют отдельные ветви.

Сопротивления кабеля, обмоток статора и ротора, входящие в схему замещения, рассчитываются общепринятыми методами и считаются известными, неизвестными для данного режима будут сопротивления ветвей намагничивания и потерь в стали и сопротивление нагрузки. Неизвестна также и эдс статора, поэтому прямое решение схемы невозможно. В разработанной математической модели предусмотрено решение схемы замещения методом последовательных приближений с двумя циклами итераций: цикл подбора эдс статора и цикл подбора номинального скольжения. Смысл итерационных циклов состоит в подборе значения эдс статора, удовлетворяющего уравнению напряжений статора и подборе скольжения, при котором развивается заданная мощность на валу. В результате расчета определяются все данные номинального режима и напряжение наземного источника, обеспечивающего номинальное напряжение на электродвигателе при номинальном скольжении.

Рабочие и пусковые характеристики рассчитываются решением схемы замещения при напряжении источника, известном из расчета номинального режима, и при известных значениях скольжения. В математической модели предусмотрен один цикл итераций подбора эдс статора, соответствующей при данном скольжении напряжению наземного источника.

Анализ распределения потерь показал, что потери в кабеле превосходят сумму электрических, магнитных и гидравлических потерь в электродвигателе.

Улучшение энергетических показателей системы "электродвигатель-кабель" может быть достигнуто увеличением номинального напряжения электродвигателя.

Вследствие падения напряжения в кабеле от пусковых токов электродвигателя пуск агрегата происходит на искусственных механических характеристиках с пониженным значением начального пускового и максимального момента.

В четвертом разделе приведены математические модели магнитного поля в активной зоне муфты и характеристики синхронизирующего момента, проведен анализ топографии магнитного поля и изложен метод аналитического расчета допустимой рабочей температуры магнитов.

Практический интерес представляют характеристики магнитного поля в активной зоне, которая заключена между поверхностями внешнего и внутреннего магнитопроводов. Геометрия активной зоны может считаться 'простой', позволяющей решить полевую задачу аналитически, применив цилиндрическую систему координат с осью 'Z', совпадающей с осью муфты.

Магнитное поле в активной зоне муфты рассматривается как результат наложения двух частичных полей, создаваемых полюсами ведущей и ведомой полумуфт. Моделирование частичных полей проводится в соответствии с физическими моделями а и б, изображенными на рисунке 3.

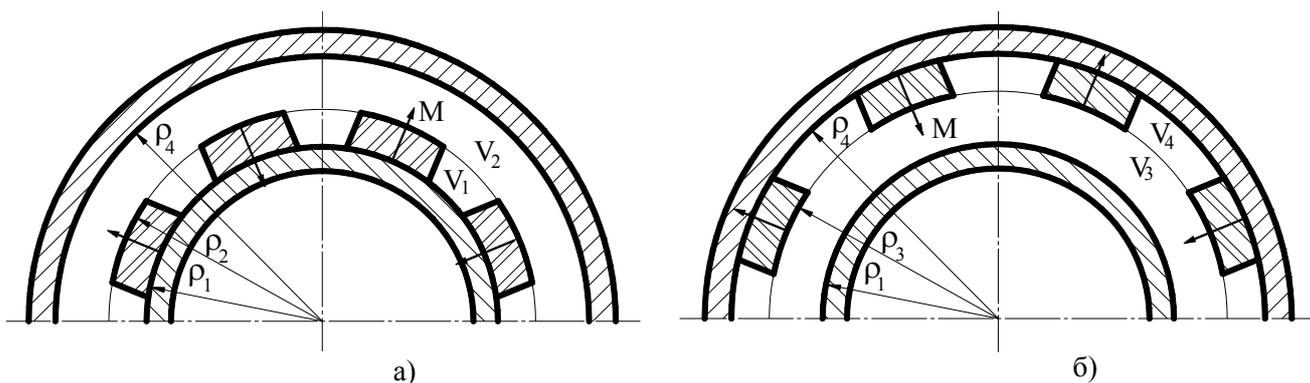


Рисунок 3 Расчетные схемы частичных полей

Магнитное поле в активной зоне, включая объем, занятый магнитами имеет безвихревой характер, поэтому распределение скалярного магнитного

потенциала описывается уравнением Лапласа. Кривая распределения вдоль окружности намагниченности в виде прямоугольников чередующейся полярности может быть представлена как сумма бесконечного числа нечетных гармоник. Соответственно, магнитные потенциалы и магнитная индукция содержат гармонические того же порядка. Аналитическим решением уравнения Лапласа в полярных координатах получены следующие уравнения магнитных потенциалов в виде суммы гармонических составляющих.

В областях V_1 и V_2 :

$$U_1(\rho, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M\rho_2(\rho_1^{2np} - \rho_2^{2np})(\rho_4^{2np} - \rho^{2np})}{\pi n^2 \rho_2^{np} \rho^{np} (\rho_4^{2np} - \rho_1^{2np})} \cos(n\rho\alpha) \sin(n\rho\theta);$$

$$U_2(\rho, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M\rho_2(\rho_4^{2np} - \rho_2^{2np})(\rho_1^{2np} - \rho^{2np})}{\pi n^2 \rho_2^{np} \rho^{np} (\rho_4^{2np} - \rho_1^{2np})} \cos(n\rho\alpha) \sin(n\rho\theta).$$

В областях V_3 и V_4 :

$$U_3(\rho, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M\rho_3(\rho_4^{2np} - \rho_3^{2np})(\rho_1^{2np} - \rho^{2np})}{\pi n^2 \rho_3^{np} \rho^{np} (\rho_1^{2np} - \rho_4^{2np})} \cos(n\rho\alpha) \sin(n\rho\theta);$$

$$U_4(\rho, \theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2M\rho_3(\rho_1^{2np} - \rho_3^{2np})(\rho_4^{2np} - \rho^{2np})}{\pi n^2 \rho_3^{np} \rho^{np} (\rho_4^{2np} - \rho_1^{2np})} \cos(n\rho\alpha) \sin(n\rho\theta).$$

В уравнениях приняты следующие обозначения величин, не указанных на рис. 3: p – число пар полюсов, n – номер гармоники, ρ, θ – координаты точки наблюдения в полярной системе.

Уравнения радиальной и тангенциальной составляющих магнитной индукции могут быть получены в виде производных магнитного потенциала по координате.

Синхронизирующий момент муфты является моментом тангенциальных сил, приложенных к взаимодействующим намагниченным полюсам полумуфт. Механические силы в электромеханических устройствах возникают в результате действия магнитного поля на ток, текущий по специально устроенным обмоткам. Магнитные муфты на постоянных магнитах не содержат обмоток, тем не менее, в предложенной физической модели возникновение тангенциальных сил

взаимодействия полумуфт основывается на том же принципе. Известно, что намагниченность постоянного магнита проявляется в магнитной цепи так же, как действие макротоков, протекающих по контуру, совпадающему с гранями магнита. Количественная связь намагниченности с линейной плотностью тока на гранях магнита, эквивалентного намагниченности, устанавливается равенством

$$\mathbf{j}_e = \text{rot}\mathbf{M}.$$

Возможность представления постоянного магнита в виде контура с током позволяет построить математическую модель, в которой тангенциальные силы взаимодействия полумуфт рассчитываются как результат действия радиального магнитного поля одной полумуфты на поверхностные токи, текущие по граням магнитов другой полумуфты. Конечный результат не зависит от того, какие магниты заменяются контуром с током. В нашем случае расчетные формулы выводятся при замене эквивалентными токами ведущих магнитов.

Магнитная индукция поля ведомой полумуфты изменяется по высоте грани ведущего магнита, поэтому вводится прием условного деления грани магнита на узкие полоски с током, по ширине которых индукция может считаться постоянной, с последующим суммированием сил. Окончательно выражение для синхронизирующего момента имеет вид.

$$T = 4pLMh_m \sum_{k=1}^{k=K} \rho_k \sum_{n=1}^{n=N} B_{nk} \sin(np\alpha_{2K}) \sin(np\varphi).$$

В уравнении приняты следующие обозначения величин: L – длина магнитов, h_m – высота магнитов, K – число токовых слоев, N – число учтенных гармоник поля, ρ_k – радиус расположения токового слоя, B_{nk} – амплитуда магнитной индукции гармоники n на токовом слое k .

Анализ магнитного поля ведомой полумуфты показал, что амплитуда высших гармонических радиальной составляющей магнитной индукции быстро уменьшается с увеличением радиуса точки наблюдения. В области протекания поверхностных токов высшие гармонические индукции обычно выражены слабо, поэтому характеристика синхронизирующего момента практически синусоидальна.

В пятом разделе выполнены исследования переходного процесса пуска агрегата и влияния электромеханических параметров электродвигателя, муфты и насоса на интенсивность возникающих крутильных колебаний.

Ротор электродвигателя с ведущей полумуфтой и ротор насоса с ведомой полумуфтой образуют электромеханическую колебательную систему, совершающую крутильные колебания всякий раз после вывода ее из положения равновесия внешними возмущающими моментами. Склонность системы к колебаниям обусловлена конечной жесткостью магнитной муфты, из-за чего угол расхождения полюсов изменяется вместе с изменением крутящих моментов, приложенных к валам. Количественные характеристики колебательного процесса зависят, в первую очередь, от значения возмущающих факторов в виде изменения моментов, приложенных к валам, и от значения восстанавливающего силового фактора, которым является синхронизирующий момент муфты.

Исследование переходного процесса проводится на математической модели, основу которой составляют дифференциальные уравнения движения ведущего и ведомого вала. В математическую модель включены зависимости момента на валу насоса и моментов жидкостного трения от угловой скорости и зависимость синхронизирующего момента муфты от угла расхождения полюсов, заданные аналитически без использования методов аппроксимации. Механическая характеристика электродвигателя задается методом кусочно-линейной аппроксимации на большом числе интервалов, что делает погрешность расчета текущего значения вращающего момента очень малой. В качестве примера, на рисунке 4 приведен теоретический график изменения угла расхождения полумуфт за время пуска агрегата мощностью 12 кВт.

В данном примере наблюдается типичная картина переходного процесса, в котором по мере разгона агрегата происходит развитие колебаний и угол расхождения достигает максимума, когда вращающий момент электродвигателя приближается к максимальному значению. Исследования на математической модели показали, что колебания усиливаются по мере разгона во всех случаях, если начальный пусковой момент электродвигателя меньше максимального.

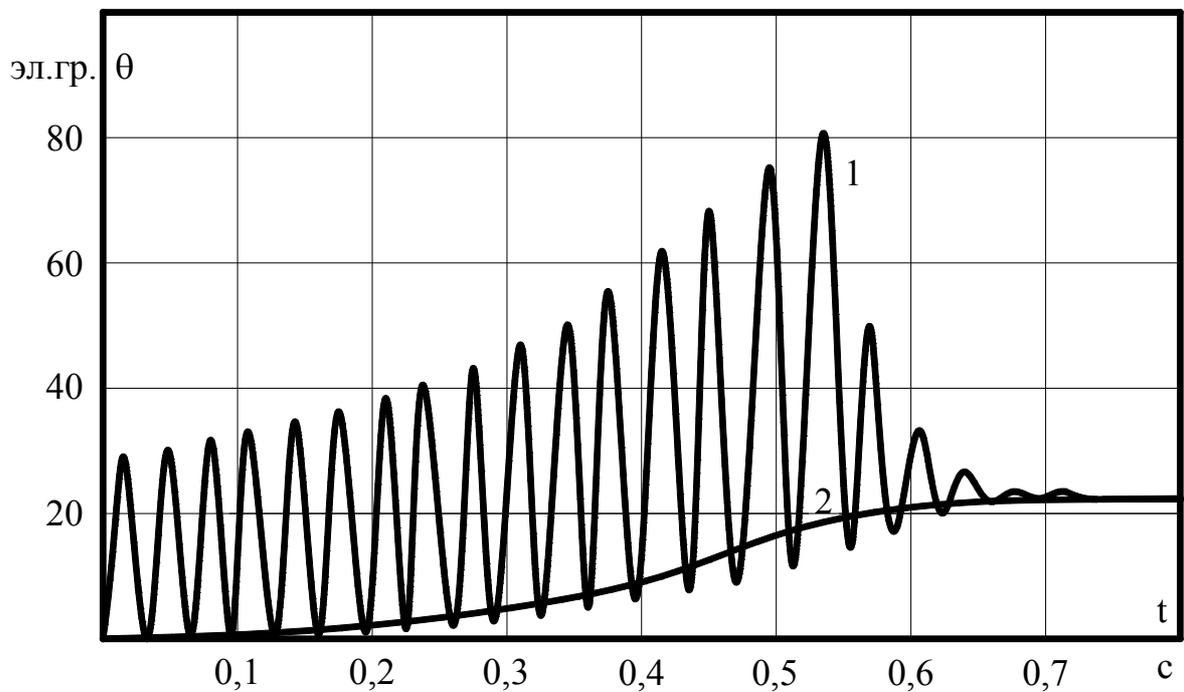


Рисунок 4 Изменение угла расхождения полумуфт

В шестом разделе рассмотрены вопросы отдельной параметрической оптимизации электромеханического блока электронасосного агрегата и разработки алгоритма совместного проектирования электродвигателя и магнитной муфты, обеспечивающего совместимость их характеристик.

Энергетические показатели электродвигателя принято оценивать значением КПД и коэффициента мощности, которые фактически характеризуют величину потерь мощности, сопровождающих рабочий процесс двигателя, но для оценки скважинного электродвигателя, имеющего значительные потери в питающем кабеле, более наглядно за критерий оптимальности принять значение тока фазы, единственно определяющего потери мощности в кабеле. В качестве параметров оптимизации определены внутренний диаметр статора, магнитная индукция в зазоре, магнитная индукция в спинке статора, магнитная индукция в зубце статора и число витков в фазе обмотки статора. Ограничениями являются минимальное значение начального пускового момента и допустимая температура меди обмотки.

Магнитная муфта на постоянных магнитах не содержит обмоток и не потребляет электрической энергии, поэтому понятия энергетических показателей при исследовании магнитных муфт теряют смысл. В качестве критерия опти-

мальности целесообразно принять минимум массы магнитов, что обеспечит минимальную стоимость дорогого материала, затраченного на изготовление одного образца. Параметры оптимизации включают в себя шесть величин: число пар полюсов, радиус внутренней поверхности ведущих магнитов, высота ведомых и ведущих магнитов, коэффициенты полюсного перекрытия. Ограничиваются максимальное значение внешнего радиуса ведущего ярма, минимальное расстояние между гранями ведомых магнитов на радиусе ведомого ярма и максимальная высота магнитов.

В седьмом разделе приведены результаты экспериментальных исследований электродвигателя и магнитной муфты. Сравнивались основные расчетные величины с их опытным значением, полученным испытаниями электродвигателя и магнитной муфты электронасосного агрегата ЭНА117 и опытного образца муфты агрегата ЭНА235. Сравнение полученных данных показывает хорошее совпадение расчетных и опытных значений.

В заключении отмечается, что проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили разработать электронасосные агрегаты нового поколения с увеличенным сроком службы.

Основные результаты выполненных научных исследований:

1. Автором разработана математическая модель скважинного асинхронного электродвигателя на основе 'Т-образной' схемы замещения, дополненной индуктивным и активным сопротивлением кабеля, которая позволила провести теоретические исследования номинального режима и режима пуска. Установлено, что запуск электродвигателя происходит на искусственных механических характеристиках, отличающихся пониженным значением начального пускового и максимального момента. В номинальном режиме скважинные электродвигатели объективно имеют относительно низкие значения КПД и коэффициента мощности по сравнению с асинхронными двигателями общепромышленного применения.

2. Разработана математическая модель синхронной магнитной муфты с герметизирующим экраном на основе разделения общего поля активной зоны муфты на частичные поля, создаваемые одной и другой полумуфтой. Входящие

в математическую модель уравнения магнитных потенциалов и магнитной индукции частичных полей выведены аналитическим решением уравнения Лапласа. Математическая модель позволила с большой степенью точности рассчитать характеристику синхронизирующего момента муфты, исходя из представления о фиктивных поверхностных токах, эквивалентных намагниченности, протекающих по боковым граням магнитов одной полумуфты и взаимодействующих с частичным магнитным полем другой полумуфты. Впервые разработан аналитический метод расчета допустимой рабочей температуры магнитов, основанный на анализе топографии магнитного поля в теле магнита, в котором используются математическая модель поля и стандартные характеристики магнитного материала. Это позволяет оценить допустимый тепловой режим магнитов из материала Ni-Fe-B еще на стадии проектирования изделия.

3. Электродвигатель с ведущей полумуфтой и насос с ведомой полумуфтой образуют колебательную систему, совершающую интенсивные крутильные колебания в переходных процессах. Разработана математическая модель колебательного переходного процесса пуска, связывающая электромеханические характеристики электродвигателя, муфты и насоса с текущим значением угла расхождения, который является главным показателем интенсивности колебаний агрегата. С использованием разработанных математических моделей проведены исследования влияния электромеханических параметров электродвигателя, магнитной муфты и насоса на интенсивность колебаний агрегата в пуске. Показано, что ограничение интенсивности колебаний на уровне допустимого угла расхождения может быть осуществлено рациональным выбором амплитуды синхронизирующего момента муфты.

4. На основе представленных выше математических моделей разработаны основные положения оптимального проектирования электродвигателя и магнитной муфты, где указаны критерии оптимальности, параметры оптимизации и ограничители. Дано обоснование использования метода полного перебора, как одного из возможных для решения задач целочисленного программирования. Обоснован выбор в качестве критерия оптимальности электродвигателя

минимума тока фазы, что обеспечивает минимальные потери мощности в системе 'электродвигатель- кабель'. Варианты, подлежащие сравнительному анализу, могут быть получены только варьированием структуры пазового слоя из-за ограничения на внешний диаметр двигателя, для чего параметрами оптимизации служат пять величин: диаметр расточки статора, число витков в фазе, индукция в зазоре, индукция в зубце и спинке статора. Основным ограничителем при оптимизации электродвигателя является предельная допустимая температура проводников обмотки статора. Для реализации данного ограничения в оптимизационный процесс вводится упрощенный расчет температуры обмотки.

Дано обоснование выбора, в качестве критерия оптимальности, минимума массы магнитов. Параметрами оптимизации служат шесть величин: диаметр внутренней поверхности ведущих магнитов, высота ведущих и ведомых магнитов, коэффициент полюсного перекрытия полумуфт и число пар полюсов. Основным ограничителем является предельно допустимый внешний диаметр ведущего ярма, значение которого определяется предварительной конструкторской проработкой.

5. Процессы отдельной параметрической оптимизации электродвигателя и магнитной муфты объединены в алгоритме циклического совместного проектирования электродвигателя и муфты, который заканчивается выбором варианта оптимального проекта.

6. Проведены экспериментальные исследования опытных образцов электродвигателя и магнитных муфт. Расхождение расчетных и опытных значений тока холостого хода и номинального скольжения опытных образцов электродвигателя не превышают 2.5%. При испытаниях опытных образцов магнитных муфт определялось значение амплитуды синхронизирующего момента в нормальных условиях и при повышенной температуре. Расхождение расчетных и опытных значений амплитуды синхронизирующего момента на калиброванной магнитной муфте не превысило 2%. Испытания подтвердили адекватность разработанных математических моделей электродвигателя и магнитной муфты и высокую точность предложенных методов расчета.

Результаты исследований и основное содержание работы отражены в следующих публикациях:

1. Абдрахманова Т. Б. Расчет синхронизирующего момента магнитной муфты // Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 1999.-С.274-275.

2. Абдрахманова Т. Б., Подлевский Н.И., Попов В.С. Аналитический метод определения допустимой рабочей температуры постоянных магнитов из сплава Ni-Fe-B // Электронные и электромеханические системы и устройства Тез. докл. НПЦ «Полюс». – Томск: Изд-во НПЦ «Полюс», 2000.-С.96-98.

3. Попов В.С., Подлевский Н.И., Чернышев А.И., Абдрахманова Т.Б. Особенности разработки и использования герметизированных электродвигателей с магнитными муфтами в нефтегазовом насосном оборудовании нового поколения // Электронные и электромеханические системы и устройства Тез. докл. НПЦ «Полюс». – Томск: Изд-во НПЦ «Полюс», 2000.-С.75-77.

4. Абдрахманова Т.Б, Подлевский Н.И, Попов В.С. Исследование характеристик скважинного электродвигателя на математической модели // Международная научно-практическая конференция «Электромеханические преобразователи энергии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001.-С.158.

5. Абдрахманова Т.Б., Попов В.С. Электромагнитные процессы в герметизирующем экране синхронной магнитной муфты// Седьмая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001.-С.265-267.

6. Подлевский Н.И, Попов В.С., Абдрахманова Т.Б. Исследование переходных процессов в герметизированном погружном электродвигателе с магнитной муфтой // Международная научно-практическая конференция «Электромеханические преобразователи энергии». Сб. статей. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001.-С.145.