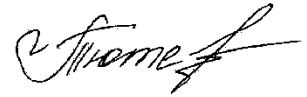


На правах рукописи



Тютева Полина Васильевна

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ ДЛЯ
НАСОСНЫХ АГРЕГАТОВ**

Специальность 05.09.01 –
«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010 г.

Работа выполнена на кафедре Электромеханических комплексов и материалов Энергетического института Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национального исследовательского Томского политехнического университета».

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Муравлева Ольга Олеговна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Литвак Валерий Владимирович

кандидат технических наук
Теплов Алексей Иванович

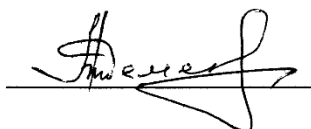
Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет», г. Новосибирск

Защита диссертации состоится «1» декабря 2010 г. в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете по адресу 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корп. 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « 20 » октября 2010 г.

Ученый секретарь совета по защите докторских и кандидатских диссертаций, к.т.н., доцент



Дементьев Ю.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема энергосбережения становится все более актуальной в мировом аспекте. Особенно актуальна эта проблема для российской экономики, поскольку в России энергоемкость промышленного производства и социальных услуг оказывается во много раз выше общемировых показателей. Эта проблема еще более обостряется в связи с постоянным увеличением в нашей стране стоимости энергоносителей: природного газа, нефтепродуктов, электроэнергии. В себестоимости продукции в России доля энергозатрат часто становится доминирующей, конкурентоспособность отечественной продукции все больше зависит от экономного расходования энергетических ресурсов.

Опыт освоения рыночных отношений последнее десятилетие показал, что Россия по своим показателям энергоэффективности не всегда может быть достойным конкурентом в едином мировом экономическом пространстве. Поэтому, проблема энергосбережения стала остро актуальной в коммунальной сфере, где энергетические затраты, выраженные в денежной форме, оказались особенно обременительными для российского бюджета и населения. Энергоемкость экономики России в 3 раза выше энергоемкости мировой экономики, в 7 раз больше, чем в Японии, в 4,5 раза больше, чем в США. В сфере жилищно-коммунального хозяйства российские нормы расхода тепла и воды в 3 раза выше, чем у Финляндии и Норвегии.

Насосные агрегаты на основе асинхронных двигателей (АД) являются одними из самых массовых потребителей электроэнергии, потребляя около 25 % всей вырабатываемой электроэнергии. Один из путей повышения экономичности электропривода (ЭП) насосных агрегатов связан с использованием энергоэффективных АД. В таких машинах за счет увеличения массы активных материалов, применения высококачественной изоляции и оптимизации конструкции снижаются потери энергии, и происходит повышение их КПД на несколько процентов. Направление развития электрических машин, связанное с повышением их энергоэффективности, в первую очередь, связано с ростом цен на энергоносители и ограничениями, связанными с глобальным потеплением. Именно эти процессы обуславливают поиск способов повысить энергоэффективность АД, разрабатываемых для ЭП насосных агрегатов.

Разработки по созданию энергоэффективных АД, проектируемых в соответствии с новейшими требованиями по снижению энергопотребления, ведутся большей частью зарубежными фирмами (США, Финляндия, Нидерланды, Италия, Великобритания и т.д.). Разработка новой серии АД требует огромных вложений в производство, именно с этим связаны основные сложности с созданием энергоэффективных АД в России. Поэтому решение вопросов с разработкой новых подходов к проектированию энергоэффективных АД, предназначенных для регулируемого электропривода (РЭП), является актуальным, имеет научную новизну и практическую значимость.

Цель работы. Разработка подходов к проектированию энергоэффективных АД, предназначенных для насосных агрегатов. Для достижения этой цели поставлены следующие задачи:

1. Разработать компьютерную модель проектирования энергоэффективных АД, позволяющую проектировать энергоэффективные асинхронные двигатели.

2. Создать компьютерную модель оценки экономической эффективности использования энергоэффективных АД в регулируемых электроприводах насосных агрегатов в жилищно-коммунальном хозяйстве при реализации различных способов регулирования.
3. Разработать алгоритмы и программно-вычислительные комплексы для ЭВМ на основе компьютерных моделей проектирования энергоэффективных АД и оценки экономической эффективности использования энергоэффективных АД в регулируемых электроприводах насосных агрегатов.
4. Оценить изменение срока службы изоляции, уровня шума и вибрации при проектировании энергоэффективных АД.
5. Провести экспериментальное исследование, направленное на проверку результатов компьютерного моделирования энергоэффективных АД при использовании двигателей с большей высотой оси вращения.

Научная новизна

1. Разработана компьютерная модель проектирования энергоэффективных АД, позволяющая проектировать энергоэффективные асинхронные двигатели при изменении длин сердечников статора и ротора и использовании машин большей высоты оси вращения.
2. Предложена компьютерная модель экономической оценки эффективности работы АД в регулируемом электроприводе, позволяющая оценить экономическую эффективность использования общепромышленных и энергоэффективных двигателей в составе насосных агрегатов при реализации различных способов регулирования.
3. Разработаны алгоритмы для создания программно-вычислительных комплексов по проектированию энергоэффективных АД и экономической оценке эффективности их работы в регулируемом электроприводе насосных агрегатов.
4. Исследовано изменение срока службы, надежности изоляции обмотки статора, уровня шума и вибрации при использовании энергоэффективных АД.

Практическая значимость работы. Проведенные исследования позволили разработать программно-вычислительные комплексы и компьютерные модели для проектирования энергоэффективных АД и оценки их экономической эффективности, направленных на повышение экономической эффективности работы АД в составе насосного агрегата.

1. Разработан программно-вычислительный комплекс для проектирования энергоэффективных АД, позволяющий реализовать на ЭВМ компьютерную модель проектирования энергоэффективных АД.
2. Создан программно-вычислительный комплекс по оценке экономической эффективности АД, реализующий на ЭВМ компьютерную модель экономической оценки эффективности работы энергоэффективных АД в регулируемых электроприводах насосных агрегатов.
3. Предложены рекомендации по созданию энергоэффективных АД с оценкой стоимости их модернизации.
4. Экспериментальные исследования подтвердили адекватность компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Компьютерная модель проектирования энергоэффективных АД, на основе

которой, при увеличении массогабаритных показателей за счет изменения длин сердечников статора и ротора, и использования машин большей высоты оси вращения, проектируются энергоэффективные АД.

2. Комплекс теоретических исследований по проектированию энергоэффективных АД и их работы в составе регулируемого электропривода насосных агрегатов, а также экспериментальные исследования.
3. Программно-вычислительный комплекс по оценке экономической эффективности работы АД в составе регулируемого электропривода насосных агрегатов, учитывающий особенности совместной работы насосного агрегата и асинхронного двигателя.
4. Рекомендации по проектированию асинхронных двигателей с учетом требований и особенностей при создании энергоэффективных машин.

Методы исследований. При проведении исследований использовались аналитические, графоаналитические и экспериментальные методы. Для реализации, поставленных в диссертации задач, использовались основы теории электрических машин и электропривода. Для автоматизации процедур решения различных задач, связанных с математическим описанием процессов, графоаналитических и графических построений, использовались компьютерные программы MathCAD и Excel.

Реализация и внедрение результатов работы. Математические модели, компьютерные модели, программно вычислительные комплексы и предложенные рекомендации используются при проектировании и изготовлении энергоэффективных АД средней мощности, предназначенных для насосных агрегатов. Рассмотренные вопросы создания специальных асинхронных двигателей, учитывающие характеристики системы в которой эксплуатируется АД, а также учет вопросов влияния затрат материалов на энергетические характеристики АД используются при проектировании и изготовлении других типов электрических машин. Результаты работы переданы для внедрения в ОАО «Сибэлектромотор», г. Томск. Программа расчета энергоэффективных АД средней мощности используется на кафедре ЭМКМ ЭНИН ТПУ при подготовке магистрантов.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования докладывались, обсуждались и получили одобрение на: Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии»: (ТПУ, г. Томск, 2006-2009 гг.); Международной научно-практической конференции «Электромеханические преобразователи энергии» (ТПУ, г. Томск, 2007 и 2009 гг.); Международной зарубежной Конференции региона 8 IEEE EUROCON 2009 (ЛЭТИ, Санкт-Петербург, 2009 г.). В том числе сделано 6 докладов на английском языке. Научные работы по материалам и результатам диссертационных исследований, представленные на всероссийских и международных конференциях и конкурсах научно-исследовательских работ, неоднократно отмечены дипломами различных степеней.

Публикации. Общее количество публикаций по теме диссертации – 20, из них: 6 статей в изданиях ВАК, 12 работ опубликовано в трудах конференций, получено 2 свидетельства на регистрацию программ для ЭВМ.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из 6 разделов (включая введение и заключение), содержит 214 страниц машинописного текста, 56 рисунков, 56 таблиц, список литературы из 127 наименований и 2 приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность проводимого исследования, дана общая характеристика работы, определена цель, сформулированы научная новизна и практическая ценность диссертации. Описаны основные результаты работы выполненной по разделам.

Во **второй главе** проведен обзор основных вопросов, перспектив и особенностей работы асинхронных двигателей в составе насосных агрегатов, анализ возможностей создания компьютерных моделей для проектирования энергоэффективных асинхронных двигателей. Определены задачи исследования.

В **третьей главе** рассматривается создание компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД при реализации варианта с максимальным использованием технологического задела, т.е. при использовании машин больших высот оси вращения и изменении длин сердечников и обмоточных данных. Компьютерная модель и ее алгоритм легли в основу разработанного программно-вычислительного комплекса (ПВК) проектирования энергоэффективных АД, реализованного в виде программы для ЭВМ.

Основным требованием при проектировании АД является создание энергоэффективных асинхронных машин. Энергоэффективные двигатели – двигатели, которые совершают больше работы на единицу энергии, чем обычные аналоги (они имеют более высокий КПД), а также обладают повышенной надежностью, более низкими показателями по шуму и вибрации. Единое понятие энергоэффективного электродвигателя появилось в октябре 1997 года в США, когда Американский конгресс принял «Акт об энергетической политике», определявший критерии классификации энергоэффективных электродвигателей. В европейском сообществе и Российской Федерации в 2000 г. были приняты нормы на КПД АД. Евронормы СЕМЕР для двух- и четырехполюсных АД предусматривают три уровня КПД: нормальный – EFF3; повышенный – EFF2 и высокий – EFF1.

При проектировании энергоэффективных машин возможна реализация следующих подходов к проектированию:

1. Создание энергоэффективных АД без использования имеющегося технологического задела.
2. Создание энергоэффективных АД с максимальным использованием имеющегося технологического задела.

Первый подход имеет преимущество в проектировании наиболее оптимальных типоразмеров АД, для получения машин с высокой энергоэффективностью, удовлетворяющей европейским и российским стандартам. Однако реализация второго подхода позволит снизить затраты на подготовку производства, сохранение поперечной геометрии двигателей позволит использовать уже имеющееся оборудование для штамповки листов статора и ротора, заливки роторов и отливки станин. Выбор между этими подходами

напрямую зависит от наличия финансовых возможностей по переоснащению основного производства.

Исходя из названных подходов проектирования энергоэффективных АД, в работе реализуется следующее направление – это проектирование АД с максимальным использованием имеющегося технологического задела, т.е. с большими по сравнению с базовыми машинами массогабаритными показателями. Для создания энергоэффективных АД для работы в системе РЭП возможны следующие пути их проектирования: без изменения поперечной геометрии при изменении длины сердечников статора и ротора, а также при изменении обмоточных данных машины; использование АД большей высоты оси вращения. Данные пути проектирования энергоэффективных АД наиболее экономически целесообразны, т.к. не требуют дополнительных вложений в переоборудование производства и обучение персонала.

Разработанная математическая модель проектирования энергоэффективных АД охватывает особенности геометрии АД и дает возможность проектировать двигатель, удовлетворяющий требованиям энергоэффективности. Математическая модель проектирования энергоэффективных АД послужила основой для компьютерной модели и алгоритма, реализованных в виде ПВК «Программа расчета энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности» в современном пакете на языке программирования MathCAD.

В качестве исходных параметров для компьютерной модели приняты следующие данные:

- номинальные данные АД;
- поперечная и продольная геометрия базовых машин;
- стоимость электроэнергии и стоимость материалов.

В качестве выходных данных компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД приняты следующие группы величин:

1. Энергетические параметры и характеристики АД.
2. Среднее превышение температуры обмотки статора.
3. Экономические показатели.
4. Коэффициенты влияния.
5. Единичный показатель надежности и уровень магнитного шума и вибрации.

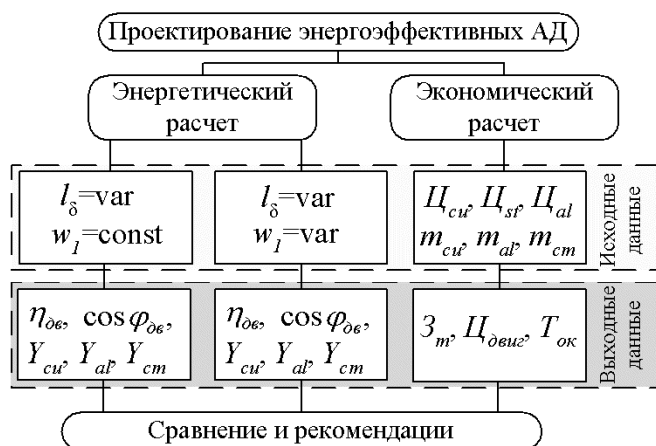


Рис. 1. Блок-схема компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД

На рис. 1 представлена краткая блок-схема компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД при реализации вариантов проектирования с изменением длин сердечников АД и обмоточных данных машины. Для реализации способа проектирования при использовании АД большей высоты оси вращения изменяются только исходные данные энергетического расчета. При проектировании АД производятся основные расчеты энергетической и экономической части, входными

данными для энергетической части являются геометрические размеры и обмоточные данные машины, а выходными – энергетические характеристики и удельные расходы активных материалов, для экономического расчета – масса материалов и их стоимость и стоимость двигателя и срок окупаемости соответственно.

Для технико-экономического обоснования выбора энергоэффективного АД наряду с показателями энергоэффективности используются приведенные затраты на разработку, внедрение, изготовление и эксплуатацию двигателя за нормативный срок окупаемости кроме формулы может быть определен по выражению:

$$Z_m = C_\partial + \sum_{i=1}^{T_n} (C_a)_i, \quad (1)$$

где C_∂ – полная себестоимость двигателя; C_a – годовые затраты на активные потери электроэнергии, T_n – нормативный срок окупаемости.

Кроме того, принимается во внимание предварительная стоимость двигателя $\Pi_{\text{двиг}}$, которая учитывает полную себестоимость двигателя ($C_m + C_t$); приведенные затраты, $K_{\text{вн}}$ – коэффициент учитывающий внепроизводственные расходы, а также норму прибыльности ρ_n предприятия производителя:

$$\Pi_{\text{двиг}} = (1 + \rho_n) \cdot (1 + K_{\text{вн}}) \cdot (C_m + C_t). \quad (2)$$

Стоимость повышения КПД на 1 % или стоимость модернизации при проектировании энергоэффективного АД рассчитывается следующим образом:

$$\Delta \Pi_{\%} = 0,01 \cdot \frac{\Pi_{\text{двиг}_{i+1}} - \Pi_{\text{двиг}_i}}{\eta_{i+1} - \eta_i}, \quad (3)$$

где $\Pi_{\text{двиг}_{i+1}}$ и $\Pi_{\text{двиг}_i}$ – значения стоимости машины при изменении входных данных при проектировании энергоэффективных АД, η_{i+1} и η_i – значения КПД при изменении входных данных при проектировании энергоэффективных АД.

Данные, полученные на основе компьютерной модели, служат для расчета изменения срока службы изоляции, а также для расчета изменения уровня шума и вибрации. Результаты расчета и анализ приведены в пятой главе.

Рассмотренные выходные параметры и характеристики АД, получаемые при решении ПВК для проектирования энергоэффективных АД, рассчитываются для вариантов перехода на более высокие уровни энергоэффективности EFF1 и EFF2.

Рассмотрим путь проектирования энергоэффективных АД связанный с изменением массогабаритных показателей при сохранении геометрии поперечного сечения, при изменении длины сердечников статора и ротора, изменении обмоточных данных машины. Подход реализуется при максимальном использовании имеющегося технологического оборудования. Изменение длины сердечников статора и ротора было взято в диапазоне от 100 до 250 % от базовой длины, также наряду с изменением длины сердечников изменяется число витков обмотки статора – от 100 до 60 % от базового значения. Расчет производится для четырех полюсных АД общепромышленного назначения, для двигателей со следующими параметрами $2p=4$, $U_1=220$ В, $f_1=50$ Гц. В качестве базовых двигателей были выбраны следующие машины серии 4А: 4А80В4, 4А90Л4, 4А100S4, 4А100Л4, 4А112М4, 4А132S4, 4А132М4, 4А160S4, 4А160М4, отрезок серии мощностью от 1,5 до 18,5 кВт. Данной серии было отдано предпочтение,

т.к. геометрические размеры продольного и поперечного сечения находятся в свободном доступе, однако, в дальнейшем компьютерное моделирование энергоэффективных АД успешно проводилось на отдельных машинах серий АД и 6А.

На рис. 2, а представлено изменение потерь в АД при увеличении расхода активных материалов при достижении уровней энергоэффективности EFF1 и EFF2. Снижение электрических потерь в АД (рис. 2, а) происходит за счет увеличения диаметра обмоточного провода фазы статора при уменьшении числа витков обмотки фазы статора. Однако с ростом номинальной мощности проектируемого энергоэффективного АД происходит рост магнитных потерь, что связано с перераспределением активной и реактивной составляющей мощностей АД. Таким образом, уровень энергоэффективности EFF2 достигается при снижении электрических потерь в статоре на 5...28 %, электрических потерь в роторе на 6...15 %, и увеличении потерь в стали около 1...9 %. Уровень энергоэффективности EFF1 достигается при снижении электрических потерь в статоре на 34...55 %, электрических потерь в роторе на 26...45 %, и увеличении магнитных потерь в стали около 7...48 %. Таким образом, уровень энергоэффективности EFF2 достигается при суммарном снижении потерь на 5...21 %, а EFF1 на 23...44 %.

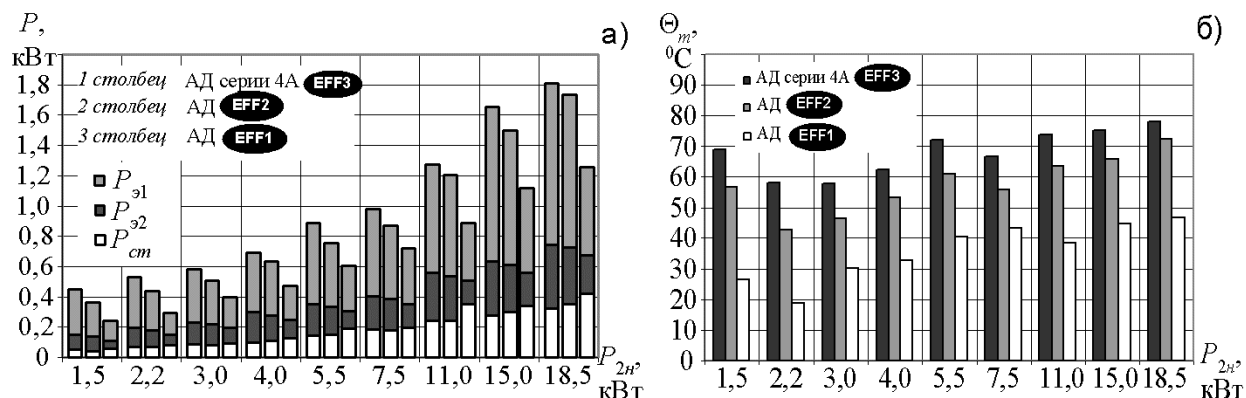


Рис. 2. Изменение потерь АД (а) и превышения температуры обмотки статора (б) при переходе на различные уровни энергоэффективности и сохранении поперечной геометрии

Снижение потерь при работе АД позволяет снизить также среднее превышение температуры обмотки статора. На рис. 2, б представлено изменение превышения температуры обмотки статора при переходе на различные уровни энергоэффективности, чем выше уровень энергоэффективности, тем, за счет снижения электрических потерь в статоре и роторе, больше оказывается снижение среднего превышения температуры обмотки статора. Значение среднего превышения температуры обмотки статора позволяет ориентировочно судить о надежности спроектированной электрической машины. В среднем при переходе на уровень EFF2 снижение превышения температуры обмотки статора происходит на $15,8^{\circ}\text{C}$, а при проектировании АД с уровнем EFF1 на $39,9^{\circ}\text{C}$.

По результатам расчета ряда двигателей серии 4А номинальной мощностью 1,5...18,5 кВт построен график (рис. 3), на котором отмечены уровни КПД, регламентируемые СЕМЕР для EFF2 и EFF1. Отметим также значения КПД, полученные у энергоэффективных АД при реализации направления

проектирования АД, связанного с сохранением поперечной геометрии базового АД и изменением его обмоточных данных и длин сердечников статора и ротора.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что проектирование энергоэффективных АД на основе способа при изменении обмоточных данных и длин сердечников, а также сохранении поперечной геометрии АД позволяет

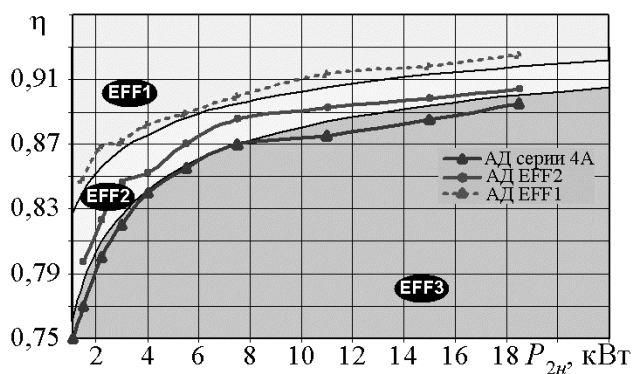


Рис. 3. Значения КПД по спецификации СЕМЕР и энергоэффективных АД, полученных при сохранении поперечной геометрии

получить машину, удовлетворяющую требованиям по энергоэффективности согласно европейской спецификации СЕМЕР. Для уровня EFF2 длина сердечников составляет 115...120 %, число витков в обмотке фазы статора составляет около 90 %. При этом для уровня энергоэффективности EFF2 увеличение затрат на активные материалы составляет 4...10 % от цены энергоэффективного двигателя.

Переход на уровень энергоэффективности EFF1 не может

быть рекомендован при способе проектирования энергоэффективных АД, связанном с изменением длин сердечников и обмоточных данных. Т.к. для проектирования АД с EFF1 следует брать длину сердечников статора и ротора 160...200 %, а число витков 70...60 % от базовых значений. При длине сердечников выше 150 % от базового значения возрастает технологическая сложность изготовления АД, поэтому не рекомендуется выбирать длины сердечников выше данного значения. Стоимость модернизации АД при изменении длин сердечников и обмоточных данных или стоимость повышения КПД на 1 % составляет 4...12 % от базовой стоимости АД. Сроки окупаемости при внедрении АД с уровнем энергоэффективности EFF2 оказываются ниже по сравнению с АД с EFF1 за счет меньшей стоимости АД.

Исходя из полученных результатов, можно сформулировать следующие рекомендации для проектирования энергоэффективных АД при изменении длины сердечников и обмоточных данных:

1. Для проектирования энергоэффективного АД требуется одновременное изменение длины сердечников и числа витков в обмотке фазы статора.
2. Для перехода на уровень энергоэффективности EFF2 длина сердечников статора и ротора должна быть равной 120...130 % от базовых значений, при этом большие значения соответствуют АД малой мощности (примерно до 3 кВт). Число витков в обмотке фазы статора должно составлять около 90 % от базового значения.
3. Для перехода на уровень EFF1 требуется более серьезное изменение длин сердечников и числа витков в обмотке фазы статора, поэтому данный способ не может быть использован для проектирования энергоэффективных АД.

Реализация подхода к проектированию энергоэффективных двигателей, связанного с сохранением поперечной геометрии двигателей, позволяет спроектировать энергоэффективный АД, удовлетворяющий европейским и российским стандартам. Проектирование идет при сохранении имеющегося

оборудования для штамповки листов статора и ротора, заливки роторов и отливки станин, что позволяет минимизировать затраты на подготовку производства. Таким образом, реализация предложенного направления создания энергоэффективных АД для РЭП, связанного с увеличением массогабаритных показателей за счет изменения длин сердечников и обмоточных данных машины при максимальном использовании имеющегося технологического задела, позволяет спроектировать машину, обладающую улучшенными энергетическими характеристиками.

В четвертой главе рассматривается вопрос создания ПВК, направленного на оценку экономической эффективности работы энергоэффективных АД в составе РЭП насосных агрегатов.

При проектировании новых энергоэффективных АД обязательно должны проводиться экономические расчеты, позволяющие судить об экономической эффективности проведенных улучшений. Для этих целей разработана математическая модель оценки экономической эффективности работы АД в составе РЭП насосного агрегата, которая дает возможность сравнивать экономический эффект, как от внедрения регулируемого электропривода в насосные агрегаты, так и от внедрения энергоэффективных АД взамен двигателей общепромышленного исполнения. На основе полученной математической модели создан ПВК, который реализован в виде программы расчета.

Математическая модель оценки экономической эффективности АД учитывает электромагнитные и экономические расчеты, так как модель должна учитывать экономические законы создания и эксплуатации АД наряду с основными электромеханическими процессами. Входными данными для ПВК оценки экономической эффективности АД служат ряд параметров:

- поперечная и продольная геометрия АД;
- закон регулирования производительности насосного агрегата;
- стоимость электроэнергии и материалов;
- механическая характеристика насосного агрегата $M_c = f(n)$.

Кроме того, для расчетов принят реальный суточный график водопотребления небольшого населенного пункта.

Регулирование частоты вращения электропривода насосного агрегата осуществляется посредством следующих законов: регулирование напряжения на статоре, при постоянной частоте питания $f_1 = 50$ Гц; одновременное изменение частоты и напряжения по законам $U/f = \text{const}$, $U/f^2 = \text{const}$, $U/f^{2.5} = \text{const}$, $U/f^3 = \text{const}$. В общем случае закон регулирования выглядит следующим образом: $U/f^{1+k/2} = \text{const}$.

В качестве выходных параметров математической модели оценки экономической эффективности работы насосного агрегата приняты две группы характеристик – энергетические и экономические (рис. 4). На рис. 4 изображена краткая блок-схема математической модели оценки экономической эффективности работы АД в РЭП насосного агрегата при реализации различных законов регулирования.

Используя полученные данные ПВК, также рассчитываются экономические параметры при следующих вариантах стоимости за электроэнергию: 1 вариант – тариф на 2008 год 1,43 руб., рост стоимости электроэнергии на 25 % ежегодно; 2 вариант – тариф на 2008 год 1,43 руб., рост стоимости электроэнергии на 10 %

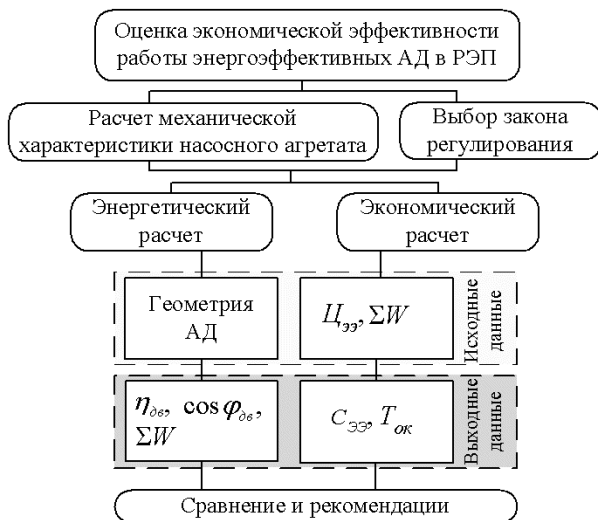


Рис. 4. Блок-схема математической модели оценки экономической эффективности АД

год на основе энергоэффективного АД, потребленной РЭП насосного агрегата за год на основе энергоэффективного АД.

Срока окупаемости при эксплуатации РЭП насосного агрегата при переходе на РЭП на основе базового и энергоэффективного АД:

$$T_{ок.баз} = \frac{C_{\Pi}}{\Delta_{\Delta.баз(EFF)}}, \quad (6)$$

где C_{Π} – стоимость преобразователя частоты.

Для расчета на основе ПВК оценки экономической эффективности работы АД в составе насосного агрегата использовались следующие насосные агрегаты центробежного типа К 160/20а, К 150-125-250, К 150-125-315, К 200-150-315, с АД номинальной мощности 11,0; 18,5; 30,0; 45,0 кВт соответственно.

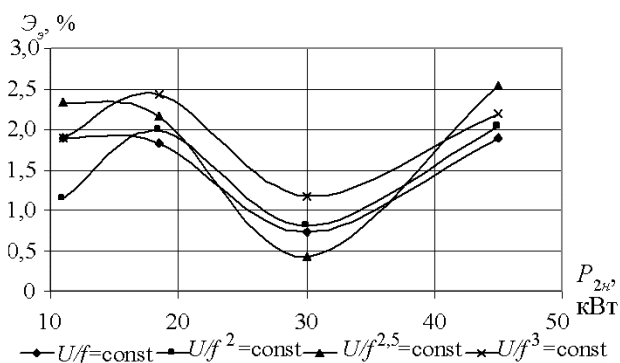


Рис. 5. Экономия электроэнергии за 2008-2017 гг. при использовании регулируемого электропривода

использовании различных АД, а также при различных нагрузочных характеристиках насоса наиболее экономически выгодными оказываются различные законы регулирования частоты вращения насоса. Разница в экономии электрической энергии между законами регулирования оказывается меньше 1,5 %. Поэтому можно сделать вывод, что использование сложных законов не оправдано с точки зрения расходов на создание и внедрение специальных преобразователей

ежегодно; 3 вариант – тариф Евросоюза на 2008 год 0,1211 EU (расчеты проводились при курсе 1 EU = 45 руб.), рост тарифов в Евросоюзе составляет около 5 %.

На основе проведенного компьютерного моделирования рассчитывается процент экономии потребленной электроэнергии при использовании энергоэффективных АД взамен общепромышленных:

$$\Delta_{\Delta\%} = \frac{C_{\Delta\Delta EFF} - C_{\Delta\Delta баз}}{C_{\Delta\Delta EFF}} \cdot 100\%, \quad (5)$$

где $C_{\Delta\Delta EFF}$ – экономия электроэнергии, потребленной РЭП насосного агрегата за год на основе энергоэффективного АД, $C_{\Delta\Delta баз}$ – экономия электроэнергии, потребленной РЭП насосного агрегата за год на основе энергоэффективного АД.

На рис. 5 представлен процент экономии потребленной электроэнергии при использовании энергоэффективных АД с уровнем EFF1 по сравнению с общепромышленными АД, при реализации различных законов регулирования. На рис. 5 наглядно видно, что по сравнению с общепромышленными АД энергоэффективные машины при использовании любого закона регулирования оказываются экономически более выгодными. Однако в различных насосных агрегатах, то есть при

частоты, способных реализовывать данные законы. Следует использовать общепринятый закон регулирования, такой как $U/f=\text{const}$, он позволит экономить электроэнергию при внедрении общепромышленных преобразователей частоты в насосные агрегаты с энергоэффективными АД.

Сроки окупаемости (табл. 1) при реализации различных законов управления получаются от одного до двух лет (российский уровень цен). За счет увеличения экономии электроэнергии при реализации европейского сценария происходит снижение срока окупаемости. Учитывая диапазон изменения срока окупаемости при всех законах регулирования следует отметить, что закон регулирования не влияет на сроки окупаемости как для базового, так и для энергоэффективного АД. При европейском уровне цен период окупаемости значительно меньше, чем при российском и в среднем составляет 0,35 года для базового АД и 0,26 года для энергоэффективного АД. При российском уровне цен сроки окупаемости в среднем получились следующие: для базового АД – 1,33 года, для энергоэффективного АД – 1,24 года.

Таблица 1. Диапазон изменения срока окупаемости при всех законах регулирования, год

Тип АД	Мощность АД, кВт			
	11,0	18,5	30,0	45,0
Российский уровень цен, ежегодный рост 10 и 25 %				
Базовый АД	1,31÷1,37	1,82÷1,87	1,03÷1,05	1,08÷1,12
Энергоэффективный АД	1,22÷1,28	1,72÷1,77	0,94÷0,95	0,98÷1,02
Европейский уровень цен, ежегодный рост 5 %				
Базовый АД	0,34÷0,36	0,48÷0,49	0,27	0,28÷0,29
Энергоэффективный АД	0,26÷0,27	0,38÷0,39	0,18	0,19÷0,20

При наметившейся тенденции роста цен на энергоносители внедрение РЭП на основе энергоэффективных АД является экономически целесообразным способом энерго- и ресурсосбережения. Поэтому можно сделать вывод, что в ситуации значительного роста цен на энергоносители следует вкладывать средства в энергосберегающие технологии, что позволит повысить конкурентоспособность в дальнейшем.

Проведенный анализ результатов ПВК оценки экономической эффективности частотно-регулируемого асинхронного электропривода при различных законах регулирования позволяет сделать вывод, что использование энергоэффективного АД в РЭП оказывается экономически выгодным. При эксплуатации энергоэффективного АД улучшаются энергетические показатели, за счет этого происходит снижение среднего превышения температуры обмотки статора, что позволяет повысить надежность ЭП. Экономия стоимости потребленной электроэнергии при внедрении РЭП достигает 45 %. Следует использовать общепринятый закон регулирования частоты вращения $U/f=\text{const}$, т.к. он не требует осуществления дополнительных вложений. Срок окупаемости при замене нерегулируемого электропривода на асинхронный частотно-регулируемый электропривод не превышает двух лет.

В пятой главе рассматривается использование подходов к проектированию энергоэффективных АД при использовании АД больших габаритов, расчет

изменения срока службы изоляции, уровня электромагнитного шума и вибрации энергоэффективных АД, а также результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение результатов компьютерного моделирования.

При проектировании энергоэффективных АД возможно использование направления проектирования машин при увеличении расхода активных материалов за счет использования АД большей высоты оси вращения. При этом за счет увеличения использования материалов повышается уровень энергоэффективности АД. По результатам расчета, произведенного на основе ПВК «Программа для расчета энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности», для ряда двигателей серии 4А номинальной мощностью 1,5...18,5 кВт построим график (рис. 6) на котором отметим значения КПД, полученные у энергоэффективных АД при реализации метода проектирования АД с использованием АД большей высоты оси вращения. При использовании данного

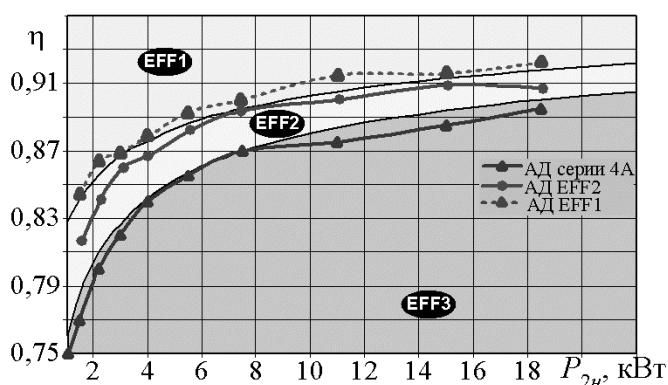


Рис. 6. Значения КПД по спецификации СЕМЕР и энергоэффективных АД, полученных при использовании АД большей высоты оси вращения

энергоэффективности АД до EFF1 и EFF2 за счет уменьшения электрических потерь. Снижение электрических потерь в статоре и роторе АД при переходе на EFF1 происходит за счет снижения активных сопротивлений фазы обмотки статора и стержней ротора, что связано с увеличением площади поперечного сечения пазов статора и ротора машин большей высоты оси вращения. Уровень энергоэффективности EFF1 достигается при снижении электрических потерь в статоре на 40...62 %, электрических потерь в роторе на 56...75 %. Потери в стали, напротив, с увеличением высоты оси вращения энергоэффективного АД возрастают за счет возрастания массы стали, но увеличение уровня потерь в стали компенсируется за счет снижения электрических. Общее суммарное снижение потерь для уровня энергоэффективности EFF1 составляет 29...41 %, а для EFF2 на 13...30 %. Снижение электрических потерь при работе АД позволяет снизить также среднее превышение температуры обмотки статора. Повышение уровня энергоэффективности за счет снижения потерь мощности АД позволяет снизить среднее значение превышения температуры в обмотке статора, для уровня EFF1 снижение составляет 25...64 %.

Увеличение расхода активных материалов при проектировании и изготовлении АД приводит к увеличению стоимости активных материалов АД, однако увеличение стоимости компенсируется за счет улучшенных энергетических характеристик машины, а, следовательно, меньших затрат на

направления проектирования переход АД на уровень EFF2 происходит на следующем габарите АД. Для перехода на более высокий уровень энергоэффективности EFF1 требуется более серьезное изменение расхода активных материалов, а поэтому переход осуществляется через один габарит.

При расчете компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД происходит повышение уровня

эксплуатацию АД. С ростом номинальной мощности АД происходит увеличение затрат на активные материалы, связанных с повышением КПД. При переходе на уровень EFF1 увеличение стоимости активных материалов составляет 23...35 % от стоимости энергоэффективного АД. Стоимость модернизации или стоимость увеличения КПД энергоэффективного АД на 1 % составляет 7...24 % от базовой стоимости.

Исходя из проведенных исследований, сформулированы следующие рекомендации по проектированию энергоэффективных АД при использовании машин большей высоты оси вращения:

1. Для перехода на уровень энергоэффективности EFF2 требуется использование АД большей высоты оси вращения, при этом следует выбирать АД следующего габарита по сравнению с базовой машиной.
2. Для перехода на уровень энергоэффективности EFF1 следует использовать АД габаритом через один от базовой машины.

Таким образом, на основе результатов расчета, выполненных на ПВК «Программа для расчета энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности», можно сделать вывод, что проектирование при использовании АД большей высоты оси вращения позволяет получить машины, удовлетворяющие требованиям СЕМЕР и обладающие уровнями EFF1 и EFF2.

Нагревостойкость определяется скоростью старения изоляции в условиях повышенных температур, особое значение приобретают методы расчета скорости старения и на этой основе – срока службы изоляции. Тогда увеличение срока службы изоляции можно рассчитать:

$$\frac{T_{сл}}{T_0} = e^{\frac{\ln(2) \cdot \Theta_i}{\Delta\Theta}} \quad (7)$$

где T_0 – срок службы базовый, составляет 20000 ч., Θ_i – фактическое значение превышения температуры обмотки статора над окружающей средой, $\Delta\Theta$ – превышение температуры сверх предельно допустимого значения для выбранного класса нагревостойкости, снижающее срок службы изоляции вдвое.

Электромагнитный шум и вибрация в энергоэффективном АД оценивается из соображений, что амплитудное значение радиальной силы, создаваемое магнитным полем машины, а значит и значение уровня шума и вибрации в АД, пропорционально квадрату индукции в воздушном зазоре. Тогда коэффициент, учитывающий изменение возмущающих сил уровня электромагнитных шумов и вибраций в энергоэффективном АД может быть рассчитан:

$$k_{\delta} = 1 - \frac{(B_{\delta. eff})^2}{(B_{\delta. баз})^2}, \quad (8)$$

где $B_{\delta. eff}$ – индукция в воздушном зазоре энергоэффективного АД, $B_{\delta. баз}$ – индукция в воздушном зазоре базового АД. При расчете коэффициента положительный знак указывает на снижение, а отрицательный на возрастание возмущающих сил уровня электромагнитных шумов и вибраций в АД.

Снижение превышения температуры обмотки статора при переходе на различные уровни энергоэффективности позволит повысить срок службы изоляции по сравнению с базовыми АД (табл. 2 и 3). Для уровня EFF2 анализ

показывает небольшое преимущество метода проектирования энергоэффективных АД при использовании АД большей высоты оси вращения, срок службы изоляции оказывается выше в среднем на 30 %, что связано с более серьезным изменением массогабаритных показателей, чем при способе связанном с изменением длин сердечников и обмоточных данных. Поэтому оба представленных способа проектирования могут быть использованы для создания энергоэффективных АД с уровнем EFF2. При переходе на уровень EFF1 увеличение срока службы оказывается выше у способа, связанного с изменением длин сердечников и обмоточных данных. Однако данный способ не может быть рекомендован для проектирования АД с уровнем EFF1, т.к. он требует изменения длин сердечников и обмоточных данных сверх рекомендованных пределов.

Таблица 2. Увеличение срока службы изоляции при использовании энергоэффективных АД при сохранении поперечной геометрии

P_{2H} , кВт		1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0	18,5
EFF2	$\Delta\Theta_i$, °C	31,96	15,31	11,35	8,95	10,94	10,76	10,29	9,44	5,76
	T_{cl}/T_0 , о.е.	5,9	2,9	2,1	1,7	2,0	2,0	1,9	1,8	1,1
EFF1	$\Delta\Theta_i$, °C	62,55	39,44	27,66	29,68	31,60	23,23	35,25	30,78	31,48
	T_{cl}/T_0 , о.е.	11,5	7,3	5,1	5,4	5,8	4,3	6,5	5,7	4,4

Таблица 3. Увеличение срока службы изоляции при использовании энергоэффективных АД большей высоты оси вращения

P_{2H} , кВт		1,5	2,2	3,0	4,0	5,5	7,5	11,0	15,0	18,5
EFF2	$\Delta\Theta_i$, °C	33,99	19,25	16,57	20,04	26,80	20,89	24,66	17,97	18,21
	T_{cl}/T_0 , о.е.	6,3	3,6	3,1	3,7	5,0	3,9	4,5	3,3	3,3
EFF1	$\Delta\Theta_i$, °C	40,45	27,77	25,53	27,58	36,22	29,51	34,17	30,07	27,65
	T_{cl}/T_0 , о.е.	7,4	5,3	4,7	5,1	6,6	5,4	6,3	5,5	5,1

Изменение индукции в воздушном зазоре приводит к изменению уровня возмущающих сил электромагнитного шума и вибрации, а, следовательно, уровня электромагнитных шумов и вибраций. На рис. 7 представлены результаты расчета коэффициента, учитывающего изменение возмущающих сил уровня электромагнитного шума и вибрации в энергоэффективных АД, при реализации способа проектирования при изменении длин сердечников и обмоточных данных с сохранением поперечной геометрии (рис. 7, а), а также при реализации способа проектирования с АД большей высотой оси вращения (рис. 7, б).

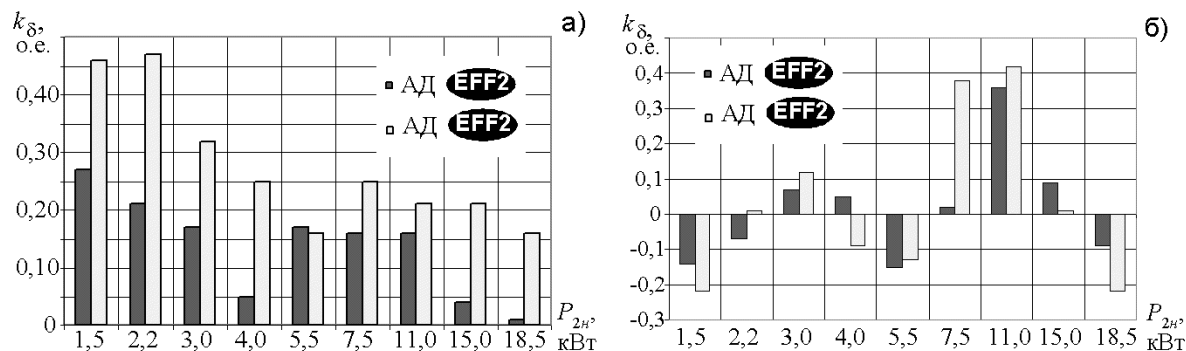


Рис. 7. Коэффициент, учитывающий изменение возмущающих сил уровня электромагнитного шума и вибрации при использовании энергоэффективных АД: а) при сохранении поперечной геометрии, б) с большей высотой оси вращения

Использование энергоэффективных АД, спроектированных на основе базовых машин при сохранении поперечной геометрии и изменении длин сердечников и обмоточных данных, позволяет снизить уровень возмущающих сил уровня электромагнитного шума и вибрации в энергоэффективных АД. В среднем снижение возмущающих сил уровня электромагнитного шума и вибрации при использовании энергоэффективных АД при сохранении поперечной геометрии для EFF2 происходит на 20 %, а при использовании машины с уровнем EFF1 на 30 %. Использование АД больших высот оси вращения не всегда позволяет снизить уровень возмущающих сил уровня электромагнитного шума и вибрации. В некоторых случаях наблюдается возрастание шума, что связано со скачкообразным изменением геометрических размеров машин при использовании АД больших высот оси вращения. Для более стабильного снижения уровня шума и вибрации в энергоэффективных АД большей высоты оси вращения следует наряду с увеличением высоты оси вращения увеличивать длину сердечников статора и ротора. Повышенный срок службы изоляции и снижение сил, вызывающих электромагнитный шум и вибрацию, позволят повысить конкурентоспособность и эксплуатационную надежность энергоэффективных АД.

Для подтверждения расчетных данных проведены экспериментальные исследования при проектировании энергоэффективного АД за счет использования машин с большей высотой оси вращения и определение его энергетических показателей. Экспериментальное исследование позволит судить об адекватности данных, полученных при помощи компьютерной модели проектирования энергоэффективных АД. Исследования произведены в виде исследовательских испытаний, преследующих цель установления возможности повышения энергоэффективности за счет изменения габарита АД.

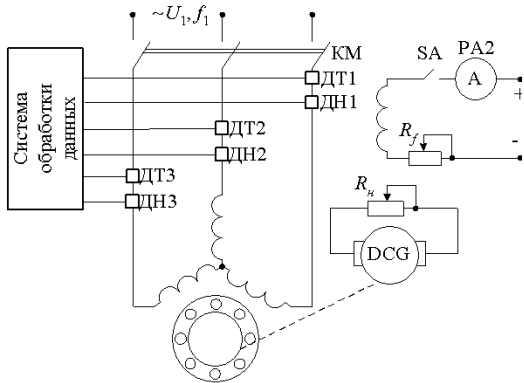


Рис. 8. Схема для определения экспериментальных данных

В качестве измерительной аппаратуры (рис. 8) использованы датчики тока (ДТ) и напряжения (ДН). В качестве системы обработки данных, получаемых датчиками тока и напряжения, использован анализатор количества и качества электроэнергии CIRCUTOR AR.5. Класс точности анализатора для тока и напряжения равен 0,5. В качестве нагрузочной машины используется генератор постоянного тока П-32 номинальной мощностью $P_{2н}=1,5$ кВт, номинальное напряжение $U_n=115$ В, номинальная частота

вращения $n=1450$ об/мин, возбуждение – независимое. Для определения энергетических показателей испытуемого АД проведены следующие опыты: измерение активного сопротивления фазы обмотки статора (R_1); холостого хода; непосредственной нагрузки.

Расчет и экспериментальные исследования при получении энергоэффективного АД на основе АД большей высоты оси вращения произведен на базе общепромышленных АД АД80А4, АД80В4, АД90L4. Двигатель АД80А4 является базовым при проведении расчетов и экспериментального исследования. На основе проведенных экспериментальных исследований и расчетов

энергоэффективного АД (табл. 4) представлены данные АД в номинальном режиме, проведен расчет относительной ошибки.

Таблица 4. Экспериментальное исследование (АД80А4 базовая машина)

	АД80А4			АД80В4			АД90L4		
	Расч.	Эксп.	$\delta_x, \%$	Расч.	Эксп.	$\delta_x, \%$	Расч.	Эксп.	$\delta_x, \%$
$P_2, \text{Вт}$	1100	1100	0,0	1100	1100	0,0	1100	1100	0,0
$I_1, \text{А}$	2,56	2,62	2,3	2,71	2,80	3,2	3,85	3,95	2,5
$I_0, \text{А}$	1,36	1,66	17,7	1,75	1,94	10,0	2,80	2,99	6,4
$P_1, \text{Вт}$	1381	1386	0,4	1346	1349	0,2	1313	1318	0,4
$R_1, \text{Ом}$	8,36	8,20	2,0	6,04	6,20	2,6	2,60	2,58	0,9
$P_{\Sigma 1}, \text{Вт}$	164	167	1,8	133	146	9,1	115	121	4,8
$P_{\Sigma 2}, \text{Вт}$	61	69	11,6	43	44	2,8	22	23	3,7
$P_{\Sigma m}, \text{Вт}$	41	44	7,5	52	53	2,3	75	78	4,0
$\cos \varphi$	0,818	0,800	2,2	0,753	0,693	8,7	0,517	0,510	1,4
η	0,797	0,794	0,4	0,818	0,815	0,4	0,838	0,834	0,5

Относительная ошибка при определении таких энергетических показателей как КПД и коэффициент мощности не превышает 4,5 %. При определении потерь в АД относительная ошибка в среднем не превышает 5,0 %. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает возможность реализации способа проектирования энергоэффективных АД, связанного с использованием АД большей высоты оси вращения. Экспериментально доказана адекватность данных моделирования на основе ПВК «Программа расчета энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности», средняя ошибка при определении КПД и коэффициента мощности не превышает 4,5 %.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В диссертационной работе решены задачи проектирования энергоэффективных АД, предназначенных для электропривода насосных агрегатов. Основные научные и практические результаты выполненной работы сводятся к следующим положениям:

1. Для проектирования энергоэффективных АД разработаны компьютерная модель и алгоритм проектирования энергоэффективных АД, которые нашли внедрение в ПВК в виде программы для ЭВМ «Программа для расчета энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности». Данный ПВК актуален для предприятий осуществляющих проектирование и изготовление АД, заинтересованных в повышении конкурентоспособности за счет выпуска энергоэффективных АД.
2. На основе разработанной компьютерной модели и алгоритма оценки экономической эффективности работы АД в РЭП насосных агрегатов и математического аппарата разработан ПВК, реализованный в виде программы расчета «Программа расчета экономической эффективности регулируемого электропривода насосных агрегатов на основе энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности». Данный ПВК актуален для предприятий, осуществляющих проектирование и выпуск энергоэффективных АД для нужд жилищно-коммунального хозяйства, а также жилищных

компаний, желающих повысить свою конкурентоспособность и интерес со стороны потенциальных потребителей.

3. Для проектирования АД при изменении длин сердечников и обмоточных данных, т.е. при максимальном использовании имеющегося технологического задела, требуется одновременное изменение длины сердечников и числа витков в обмотке фазы статора. Стоимость модернизации составляет 4...12 % от базовой стоимости машины. Для проектирования АД с уровнем энергоэффективности EFF2 рекомендуется брать длину сердечников статора и ротора 120...130 % от базового значения, а число витков 90 % от базового значения. Проектирование энергоэффективных АД с уровнем EFF1 для способа без изменения поперечной геометрии не представляется возможным.
4. Проектирование энергоэффективных АД при использовании машин большей высоты оси вращения позволяет получить АД, удовлетворяющий требованиям СЕМЕР и обладающий уровнями EFF1 и EFF2. Стоимость модернизации составляет 7...24 % от базовой стоимости машины. Для перехода на уровень энергоэффективности EFF2 для машин средней мощности требуется выбирать АД следующего габарита, а для перехода на более высокий уровень энергоэффективности EFF1 необходимо использовать АД габаритом через один.
5. Энергоэффективные АД обладают лучшими значениями надежности по сравнению с общепромышленными двигателями. Энергоэффективные АД, спроектированные при изменении длин сердечников и обмоточных данных, обладают сниженным уровнем возмущающих сил электромагнитного шума и вибрации по сравнению с базовыми АД. Использование АД большей высоты оси вращения не всегда позволяет снизить уровень возмущающих сил уровня электромагнитного шума и вибрации. С точки зрения повышения срока службы изоляции, для проектирования АД с уровнем EFF2 могут быть использованы оба способа создания энергоэффективных машин – при изменении длин сердечников и обмоточных данных, а также использования АД большей высоты оси вращения. При проектировании АД с уровнем энергоэффективности EFF1 следует отдавать предпочтение способу, связанному с использованием АД большей высоты оси вращения.
6. Проведение экспериментального исследования подтвердило адекватность данных, полученных на основе компьютерной модели проектирования энергоэффективных двигателей. По результатам анализа экспериментальных данных можно сделать вывод, что предлагаемый способ проектирования энергоэффективных АД, связанный с использованием АД большей высоты оси вращения, позволяет спроектировать машину, обладающую уровнем энергоэффективности EFF1. Средняя ошибка при определении КПД и коэффициента мощности не превышает 4,5 %.
7. Использование энергоэффективного АД в РЭП насосных агрегатов оказывается наиболее экономически выгодным. При реализации частотного управления следует использовать общепринятый закон регулирования частоты вращения $U/f = \text{const}$, т.к. он не требует осуществления дополнительных вложений. Экономия стоимости потребленной электроэнергии при внедрении РЭП достигает 45 %. Срок окупаемости при замене нерегулируемого

электропривода на асинхронный частотно-регулируемый электропривод не превышают двух лет.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Muravleva O.O., Tyuteva P.V. Induction motors improvement for a variable speed drive // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2007. – V. 310. – № 2 – С. 177–181.
2. Тютёва П.В., Муравлева О.О. Оценка экономической эффективности асинхронного регулируемого электропривода насосных агрегатов // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – №2. – С. 61 – 64.
3. Муравлева О.О., Тютёва П.В. Использование энергетически эффективных двигателей в регулируемом приводе насосов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2008. – № 5. – С. 29 – 33.
4. Муравлева О.О., Тютёва П.В. Особенности проектирования асинхронных двигателей в современных условиях // Проблемы Энергетики (Казань). – 2008. – №7-8/1. – С. 173–183.
5. Тютёва П.В. Алгоритм оценки эффективности работы асинхронных двигателей в насосных агрегатах // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т.315. – №.4 – С. 74–79.
6. Тютёва П.В., Муравлева О.О. Оценка стоимости модернизации асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т.316. – №.4 – С. 184–186.

Свидетельства на программы для ЭВМ:

7. Тютёва П.В. Программа расчета энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2008611552 от 26 марта 2008 г.
8. Тютёва П.В. Программа расчета экономической эффективности регулируемого электропривода насосных агрегатов на основе энергоэффективных асинхронных двигателей средней мощности. Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2009616616 от 30 ноября 2009 г.

Другие научные публикации по теме диссертации:

9. Tyuteva P.V., Muravleva O.O. Specificity of induction motors designing for energy saving // Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the 12th International scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientist. – Tomsk, 2006. – P. 79–82.
10. Муравлев О.П., Муравлева О.О., Тютёва П.В. Модернизация асинхронных двигателей для обеспечения энергосбережения // Проблеми сучасної електротехніки : Технічна електродинаміка: Труды IX междунар. конф. – Київ, 2006. – Час. 3. – С. 59–62.
11. Муравлева О.О., Тютёва П.В. Оценка влияния материалоемкости на энергоэффективность асинхронных двигателей // Вестник Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Сб. науч. трудов. Тематический выпуск: Проблемы совершенствования электрических машин и аппаратов. Теория и практика. – Харьков, 2007. – Т.25. – С. 57–61.

12. Муравлева О.О., Тютеева П.В. Энергосбережение насосного агрегата при использовании асинхронного регулируемого электропривода // Автоматизированный электропривод: Труды V междунар. конф. по автоматизированному электроприводу. – Санкт-Петербург, 2007. – С. 467–470.
13. Тютеева П.В., Муравлева О.О. Особенности проектирования асинхронных двигателей для регулируемых электроприводов // Электромеханические и электромагнитные преобразователи энергии и управляемые электромеханические системы: Труды III междунар. научно-техн. конф. – Екатеринбург, 2007. – С. 81–84.
14. Тютеева П.В., Муравлева О.О. Экономическая эффективность регулируемого электропривода при учете энергетических характеристик асинхронного двигателя // Электромеханические преобразователи энергии: Труды междунар. научно-практ. конф. – Томск, 2007. – С. 80–83.
15. Tyuteva P.V., Muravleva O.O. Research in pump units and pipeline characteristics at various ways of regulation // Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the 13th International scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientist. – Tomsk, 2007. – P. 65–68.
16. Tyuteva P.V., Muravleva O.O. The peculiarities of mechanical characteristics of pump units as electric drive loading machines // Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the 14th International scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientist. – Tomsk, 2008. – P. 63–66.
17. Тютеева П.В., Муравлева О.О. Пути модернизации асинхронных двигателей при изменении геометрии поперечного сечения // Электромеханические преобразователи энергии: Труды IV междунар. научно-практ. конф. – Томск, 2009. – С. 114–117.
18. Tyuteva P.V. Cost efficiency of the improved induction motors at the change of motor speed // Modern Techniques and Technologies: Proceedings of the 15th International scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientist. – Tomsk, 2009. – P. 69–72.
19. Tyuteva P.V., Muravleva O.O. Operation features of the improved induction motors in the variable speed drive of pump units // IEEE EUROCON2009: Proceedings of the International conference. – Saint-Petersburg, 2009. – P. 716–721.
20. Тютеева П.В. Выбор метода оптимизации энергоэффективных асинхронных двигателей // Современная техника и технологии: Материалы XV междунар. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Томск, 2009. – С. 488–490.

Личный вклад автора

Автор единолично написал 5 работ [5, 7, 8, 18, 20]. В работах написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: [1, 4, 6, 9, 10, 11, 17] разработка математической модели проектирования энергоэффективных АД; [2, 3, 12, 13, 19] разработка алгоритма и компьютерной модели оценки экономической эффективности работы энергоэффективных АД в составе РЭП насосных агрегатов; [14, 15, 16] обобщение и описание результатов исследования.