

На правах рукописи



Бейерлейн Евгений Викторович

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИСПЫТАНИЙ
МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА СРЕДНИХ И БОЛЬШИХ
МОЩНОСТЕЙ**

Специальность 05.09.01 –
«Электромеханика и электрические аппараты»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Рапопорт Олег Лазаревич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Казаков Юрий Борисович

кандидат технических наук, доцент
Рикконен Сергей Владимирович

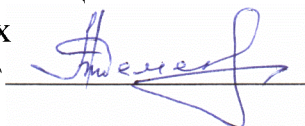
Ведущая организация: Обособленное подразделение «Научно-исследовательский институт автоматики и электромеханики Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники», г. Томск

Защита состоится «17» марта 2010 г. в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» по адресу 634034, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корп. 8, ауд. 217.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Томский политехнический университет» по адресу: г. Томск, ул. Белинского, 55.

Автореферат разослан « 3 » февраля 2010 г.

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



Дементьев Юрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в эксплуатации находятся сотни тысяч электрических машин (ЭМ) средней мощности до 1000 кВт применяемые, в том числе в качестве тяговых. Многие из них выработали свой ресурс или приближаются к этому. Замена их новыми, по разным причинам, производится недостаточными темпами. Это увеличивает число отказов ЭМ, объем ремонтных работ и соответственно затраты.

Современное состояние тяговых электрических машин (ТЭД) на железнодорожном транспорте характеризуется высокой аварийностью и средним фактическим сроком службы до ремонта не превышающем 600 тыс. км пробега. Имеются попытки повысить срок службы применением новых материалов и технологий, но они носят несистемный характер, и решить проблему не могут. Для оценки ресурса ТЭД во время эксплуатации, не организован мониторинг состояния электрических машин, без которого невозможно говорить об оценке остаточного ресурса, а значит о переходе на восстановительный ремонт по фактическому состоянию. Решение этой задачи актуально, так как стареющий парк электрических машин с каждым годом требует увеличения затрат на его восстановление.

Требования к качеству и надежности ТЭД постоянно повышаются. Одним из путей выполнения этих требований является строгое соблюдение условий испытаний, проводимых на всех этапах изготовления, и объективная оценка данных, полученных в процессе испытаний. Это в полной мере относится и к приемо-сдаточным испытаниям. По оценке специалистов затраты труда на проведение приемо-сдаточных испытаний сегодня составляют до 13 % от трудоемкости изготовления ЭМ. В соответствии с требованиями международных и национальных стандартов, испытания тяговых асинхронных электродвигателей (АТЭД) следует проводить не только в режиме холостого хода и короткого замыкания, но и часовом режиме при полной нагрузке.

По прогнозам специалистов, коллекторные ТЭД будут эксплуатироваться в России еще не менее 30 лет, однако наметилась тенденция перехода на АТЭД. Переход на асинхронные ТЭД вызовет полное переоснащение ремонтной базы, включая испытательные станции для АТЭД и разработку преобразователей частоты (ПЧ).

Учитывая, что мощность современных АТЭД для грузовых электропоездов должна быть выше 1000 кВт, затраты электроэнергии на испытания такого ТЭД составляют более 1,5 тыс. кВт-ч. Испытания коллекторных ТЭД осуществляют методом взаимной нагрузки (возвратной работы). В этом случае испытываются одновременно два идентичных ТЭД: один работает в режиме двигателя, второй – в режиме генератора, а компенсация потерь осуществляется за счет внешней сети.

Испытательных станций для АТЭД с реализацией энергосберегающей технологии испытаний в настоящее время не существует. Учитывая, что перспектива широкого применения АТЭД велика, уже сейчас имеются опытные образцы электровозов с АТЭД. Поэтому, задача создания энергосберегающих методов испытаний для АТЭД является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка энергосберегающих методов испытаний асинхронных тяговых электродвигателей средних и больших мощностей. Для достижения этой цели решались следующие задачи:

1. Теоретическое обоснование использования схемы взаимной нагрузки для испытаний асинхронных тяговых электродвигателей средних и больших мощностей.
2. Исследование влияния режимов испытаний АТЭД на энергетические характеристики испытательной станции, реализующей схему взаимной нагрузки.
3. Разработка алгоритмов измерения токов, напряжений и определения подводимой активной мощности при проведении испытаний АТЭД по схеме взаимной нагрузки.
4. Экспериментальное исследование разработанной схемы по методу взаимной нагрузки.
5. Разработка автоматизированной системы испытаний и алгоритмов ее реализации.

Научная новизна

1. Определен критерий и создан алгоритм оценки энергосбережения при испытаниях, использование которого позволяет определить наиболее эффективную схему испытаний АТЭД.
2. Разработана математическая модель АТЭД, включаемых по схеме взаимной нагрузки, которая позволяет оценить рабочие и механические характеристики, определить наиболее экономичный режим испытаний, построить энергетические характеристики и произвести расчет энергозатрат.
3. Разработаны алгоритмы обработки сигналов токов и напряжений при проведении испытаний АТЭД, позволившие проводить обработку полученных данных при испытаниях в автоматизированном режиме.
4. Разработаны алгоритмы и методики энергосберегающих испытаний мощных АТЭД, позволяющих экономить до 80 % потребляемой электроэнергии.

Практическая ценность вытекает из следующих результатов:

1. Предложена практическая схема испытаний крупных АТЭД с частотным регулированием по методу взаимной нагрузки с возвратом до 80 % энергии в сеть. Схема защищена патентом РФ.
2. Разработана схема измерений и передачи измерительных сигналов, а также алгоритм для их обработки, реализованные в автоматизированной станции испытаний крановых двигателей на ОАО «Сибэлектромотор».
3. В международном учебно-научном центре МУНЦ «Данфосс» ЭЛТИ ТПУ создан учебный стенд, в котором реализованы исследования АД, включенного по схеме взаимной нагрузки.

Положения, выносимые на защиту:

1. Энергосберегающий метод и схема испытаний асинхронных тяговых электродвигателей, позволяющая одновременно проводить испытания

- двух одинаковых асинхронных тяговых электродвигателей, без использования дополнительных машин.
2. Математическая модель асинхронных тяговых электродвигателей, включенных по схеме взаимной нагрузки, а также закон управления испытуемым двигателем, работающим от ПЧ, который обеспечивает наиболее экономичный режим испытаний.
 3. Методы и средства определения энергетических характеристик, устройство измерения активной мощности в трехфазных цепях несинусоидального напряжения и программное обеспечение для проведения обработки результатов испытаний.
 4. Экспериментально полученные результаты исследований в виде рабочих характеристик исследуемого асинхронного двигателя, осциллограмм токов и напряжений, полученных в результате испытаний по схеме взаимной нагрузки.

Методы исследований. При решении поставленных задач по исследованию работы схемы взаимной нагрузки при испытаниях крупных машин переменного тока, в диссертационной работе использовались математические и экспериментальные методы электротехники и электромеханики, информационные компьютерные технологии и программные пакеты MathCAD, MatLab. Из методов математики в работе использовались методы решения дифференциальных уравнений. В области электротехники и электромеханики использовались теория машин переменного тока, теория систем управления, теория эквивалентных схем замещения. Для разработки программного обеспечения использовались методы цифровой обработки сигналов, при решении вычислительных и офисных задач использовались пакеты программ LabVIEW, Microsoft Word, Microsoft Excel, Microsoft Visio. Экспериментальные исследования были проведены с помощью непосредственных методов испытаний электрических машин в соответствии с ГОСТ.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы были использованы при выполнении ряда научно-исследовательских тем, а также при проектировании и изготовлении станции приемо-сдаточных испытаний крановых электродвигателей на ОАО «Сибэлектромотор». Разработанная в диссертационной работе экспериментальная установка по схеме взаимной нагрузки используется в учебном процессе Томского политехнического университета при подготовке студентов направления 140600 «Электротехника, электромеханика и электротехнологии».

Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие двух актов о внедрении.

Апробация

Основные результаты и положения диссертационной работы обсуждались на заседаниях кафедры Электрических машин и аппаратов ЭЛТИ ТПУ в период с 2005 по 2009 г. и на ежегодных конференциях молодых ученых и аспирантов: Международная научно – практическая конференция студентов и молодых ученых «Современные техники и технологии» (г. Томск, 2004 – 2009 гг.);

Всероссийская научно – практическая конференция с международным участием «Повышение эффективности производства энергии в условиях Сибири» (г. Иркутск, 2005 г.); Всероссийская конференция – конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению программы «Энергетика и энергосбережение» (г. Томск, 2006 г.); Международная научно – техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (г. Томск, 2007 и 2009 гг.); Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука, технологии, инновации» (г. Новосибирск, 2007 г.); Международная конференция IFOST 2009 (Вьетнам).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 14 печатных работ, 3 из них в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка использованных источников из 113 наименований и 3 приложений. Она содержит 139 страниц машинописного текста, 10 таблиц и 44 иллюстраций.

Автор выражает благодарность научному консультанту Цукублину Анатолию Борисовичу за неоценимую помощь при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, её научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель работы, приведено краткое содержание диссертации по главам и сделан обзор основных положений работы.

Первая глава посвящена анализу состояния и перспективам развития тяговых машин электроподвижного состава в России, а также проведен анализ нормативно – технической базы в регулируемом электроприводе с асинхронными двигателями. Представлены основные схемы, которые используются при испытаниях крупных электрических машин переменного тока. В результате поставлены задачи по исследованию и совершенствованию методик и средств испытаний крупных асинхронных двигателей (АД).

Вторая глава посвящена вопросам разработки и обоснования энергосберегающей схемы испытаний асинхронных тяговых электродвигателей.

Требования к качеству и надежности ТЭД постоянно повышаются. Одним из путей выполнения этих требований является строгое соблюдение условий испытаний, и объективная оценка данных, полученных в процессе испытаний. Это в полной мере относится к испытаниям, проводимым на собранной электрической машине.

Основные испытания ТЭД выполняются под нагрузкой. Учитывая, что мощность двигателей сравнительно велика, с целью экономии электроэнергии, используются схемы испытаний позволяющие возвращать энергию в сеть. С этой точки зрения наиболее экономичными являются схемы испытаний ЭМ по методу взаимной нагрузки, когда две одинаковых ЭМ соединены электрически

и механически так, что одна из них, работая в режиме генератора, отдает всю вырабатываемую ею электрическую энергию второй ЭМ, работающей в режиме двигателя, а последняя расходует всю развиваемую ею механическую энергию на вращение первой ЭМ. Энергия извне потребляется только на покрытие потерь в схеме. В этом случае испытывается одновременно два ТЭД: один работает в режиме двигателя, второй – в режиме генератора. Схема взаимной нагрузки широко применяется для испытаний ТЭД постоянного тока.

Испытания асинхронных двигателей по методу взаимной нагрузки с непосредственным соединением их валов до настоящего времени были невозможным, так как частоты вращения двигателя и генератора при равном числе полюсов должны быть различны. В известной схеме соединение производится с помощью механической передачи, а заданные частоты вращения реализуются подбором диаметров шкивов, устанавливаемых на валах испытываемых машин, или задаются передаточным отношением редуктора. Отметим, что мощность асинхронной машины при неизменном напряжении зависит только от величины скольжения, поэтому способ подключения механического источника энергии в данном случае оказывается неприемлемым.

В настоящее время благодаря развитию силовой проводниковой техники создаются и серийно выпускаются различные виды полупроводниковых преобразователей частоты, что определило широкое применение частотного регулирования асинхронных двигателей. Это позволяет рассматривать сформулированную задачу реализации метода взаимной нагрузки через задание двум машинам разного скольжения при одинаковой частоте вращения роторов, соединенных механически.

Питание АТЭД на опытных образцах электровозов осуществляется от статического преобразователя частоты. Поэтому и испытания целесообразно проводить с использованием подобных условий. В связи с этим, предлагается схема испытаний АТЭД в продолжительном режиме, использующая два одинаковых двигателя как показано на рис. 1.

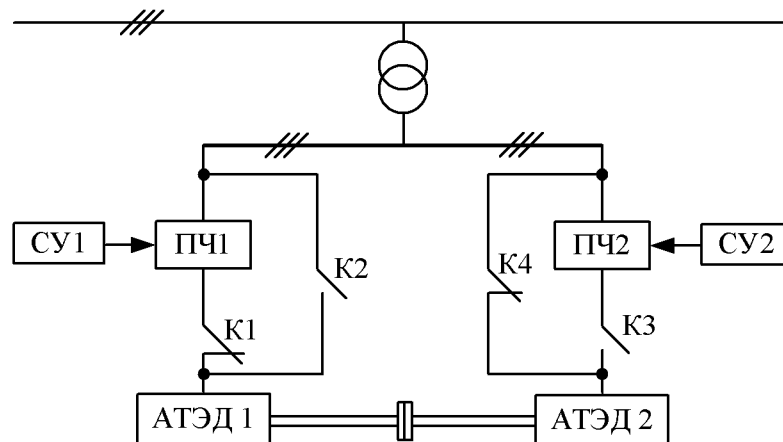


Рис. 1. Схема испытаний АТЭД

Комбинацией контакторов К1 – К4 можно обеспечить работу каждого из АТЭД от своего преобразователя частоты, имеющего свою систему управления

(СУ).

Для того, чтобы асинхронную машину ввести в генераторный режим, ей необходимо задать частоту вращения выше синхронной, то есть обеспечить отрицательное скольжение относительно частоты возбуждения. Поэтому испытуемый двигатель должен питаться от ПЧ напряжением с частотой выше сетевой.

Так как испытания в продолжительном режиме проводятся в номинальных условиях работы исследуемых двигателей, то для определения частоты питания второго двигателя в режиме генератора можно воспользоваться следующей зависимостью:

$$f_D = f_{\Gamma} \times \frac{1 - s_{\Gamma}}{1 - s_D},$$

где f_D и f_{Γ} – частоты питания двигателя и сети, а s_D и s_{Γ} – величины скольжения, соответственно, двигателя и генератора.

Двигатель, работающий в генераторном режиме, должен вращаться посредством первичного двигателя в направлении вращающегося поля статора, но с частотами вращения $n_{\Gamma} > n_{0\Gamma}$, при этом движение ротора относительно поля статора изменится (по сравнению с двигательным режимом этой машины), так как ротор будет обгонять поле статора.

Рассмотрим подробнее потоки энергии в схеме взаимной нагрузки для АТЭД описанной выше. Испытуемый двигатель работает в двигательном режиме при $0 < s < 1$, $n_D < n_{0D}$. В этом режиме к нему подводится электрическая мощность P_1 , которая, за вычетом потерь на нагрев обмоток статора Δp_{M1} и магнитных потерь в стали статора Δp_{C1} , преобразуется в электромагнитную мощность $P_{ЭМ}$, передаваемую через воздушный зазор на ротор. Полная механическая мощность, развиваемая двигателем, определится как $P_{MEX} = P_{ЭМ} - \Delta p_{M2} - \Delta p_{C2}$, где Δp_{M2} – потери на нагрев обмоток ротора двигателя, Δp_{C2} – магнитные потери в стали ротора. Полезная механическая мощность на валу двигателя $P_2 = M_2 \cdot \omega$ меньше мощности P_{MEX} на суммарные механические потери Δp_{MEX} , создающие момент сопротивления двигателя. В соответствии с энергетической диаграммой для двигательного режима работы:

$$P_2 = P_1 - \Delta p_{M1} - \Delta p_{C1} - \Delta p_{M2} - \Delta p_{C2} - \Delta p_{MEX}$$

Диаграмма потерь мощности в АТЭД, работающей в генераторном режиме, будет аналогичной потерям мощности машины работающей в двигательном режиме, за исключением суммарных механических потерь, которые будут компенсироваться машиной работающей в двигательном режиме.

Поскольку двигатель и генератор работают во время испытаний совместно, то есть, связаны механически и электрически, следовательно, их энергетические диаграммы представляют последовательное объединение диаграмм машин, работающих в двигательном и генераторном режимах, как это показано на рис. 2.

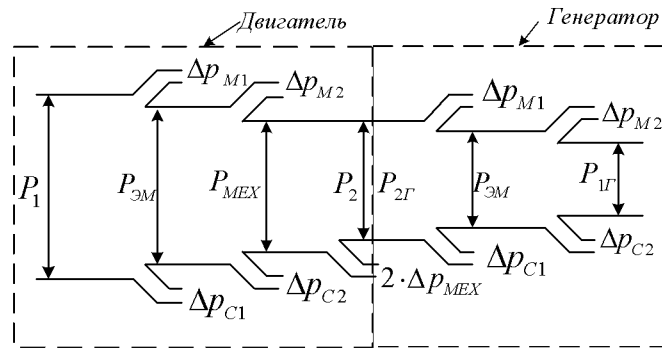


Рис. 2. Энергетическая диаграмма системы асинхронный двигатель - асинхронный генератор

Для определения экономии электроэнергии определим коэффициент экономичности схемы $K_{\text{э}}$. Он будет равен отношению разности активных мощностей, потребляемых испытуемой электрической машиной и схемой испытаний в целом, к потребляемой активной мощности испытуемой электрической машиной, который определяется как:

$$K_{\text{э}} = \frac{P_1 - P_{\text{сх}}}{P_1}, \quad (1)$$

где $P_1 = P_{2\text{д}}/\eta_{\text{д}}$ – активная мощность, потребляемая испытуемой электрической машиной; $P_{\text{сх}}$ – мощность, потребляемая схемой в целом.

Мощность, потребляемая схемой, определяется с учетом потерь:

$$P_{\text{сх}} = P_1 - P_{1\text{Г}}, \quad (2)$$

где $P_{1\text{Г}} = P_{2\text{д}} \cdot \eta_{\text{Г}}$ – активная мощность, вырабатываемая генератором.

Подставив в выражение (1) выражение (2) мы получим коэффициент экономичности схемы взаимной нагрузки:

$$K_{\text{э}} = \frac{\frac{P_2}{\eta_{\text{д}}} - P_2 \left(\frac{1 - \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{Г}}}{\eta_{\text{д}}} \right)}{\frac{P_2}{\eta_{\text{д}}}} = \eta_{\text{д}} \cdot \eta_{\text{Г}}. \quad (3)$$

Как видно из выражения (3) при применении схемы взаимной нагрузки для испытаний АТЭД, КПД которых близок $\eta_{\text{д}} = 0,90 \div 0,95$, экономия электроэнергии на проведения испытаний будет зависеть только от испытуемых машин, в этом случае до 90 % активной мощности возвращается генератором в цепь питания двигателя. Потери мощности обеих машин, а так же намагничивающие мощности покрываются в испытательной установке за счет первичной сети.

Третья глава посвящена математическому моделированию схемы взаимной нагрузки для испытаний АТЭД.

Создание математической модели вызвано необходимостью изучения основных процессов преобразования энергии в системе асинхронный двигатель асинхронный генератор при испытании АТЭД методом взаимной нагрузки. Для моделирования необходимо записать основные процессы в АТЭД, работающем в двигательном и генераторном режимах, в виде системы дифференциальных уравнений.

Математическое описание процессов электромеханического преобразования энергии наиболее удобно получить в неподвижных осях α, β , так как данная система координат позволяет моделировать работу асинхронного двигателя, работающего от источника несинусоидального напряжения (преобразователя частоты). Вывод системы уравнений описывающих основные законы работы АД, в неподвижных осях α, β проведем на основе уравнений обобщенной электрической машины.

При выводе уравнений, описывающих поведение асинхронной машины, сделаны следующие общепринятые допущения:

1. Считается, что машина симметричная с идеальными обмотками, обеспечивающими синусоидальное распределение магнитодвижущей силы и магнитного потока вдоль воздушного зазора, который принимается одинаковым по окружности ротора.
2. Не учитывается влияние насыщения магнитной цепи, что позволяет принять значения индуктивностей постоянными.
3. Не учитываются потери энергии в стали ротора.

Итоговая система уравнений для построения математической модели асинхронного электропривода записанная в неподвижной системе координат α, β , с учетом режима работы, будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} U_{1\alpha} = r(1 + T_1 \cdot p)I_{1\alpha} - \frac{k_2}{T_2}\psi_{2\alpha} - k_2 \cdot v_r \cdot \psi_{2\beta}; \\ U_{1\beta} = r(1 + T_1 \cdot p)I_{1\beta} - \frac{k_2}{T_2}\psi_{2\beta} + k_2 \cdot v_r \cdot \psi_{2\alpha}; \\ 0 = -k_2 \cdot r_2 \cdot I_{1\alpha} + \frac{(1 + T_2 \cdot p)}{T_2}\psi_{2\alpha} + v_r \cdot \psi_{2\beta}; \\ 0 = -k_2 \cdot r_2 \cdot I_{1\beta} + \frac{(1 + T_2 \cdot p)}{T_2}\psi_{2\beta} - v_r \cdot \psi_{2\alpha}; \\ \mu = k_2(\psi_{2\alpha} \cdot I_{1\beta} - \psi_{2\beta} \cdot I_{1\alpha}); \\ H \cdot p \cdot v_r = \mu \pm \mu_c. \end{cases}$$

Математическое моделирование асинхронного электродвигателя, осуществляется с помощью системы визуального моделирования SIMULINK, входящей в универсальный программный пакет MATLAB. Проводились исследования влияния законов управления испытуемого двигателя, работающего от преобразователя частоты, на затраты электроэнергии при испытаниях асинхронных машин.

При управлении АТЭД находят применение следующие законы:

- На участке разгона – закон управления с компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении статора:

$$(U_1 - I_1 R_1) / f_1 = \text{const}, \quad M = \text{const},$$

или его частный случай

$$U_1 / f_1 = \text{const}.$$

Из последнего уравнения можно сделать вывод, что для поддержания во всех режимах значительного момента при регулировании частоты f_1 необходимо иметь значительный магнитный поток, значение которого обеспечивается подводимым напряжением.

- На участке от мощности близкой к номинальной до максимальной – закон управления при постоянстве мощности:

$$U_1 \sqrt{f_1} = \text{const}, \quad P_2 = \text{const}.$$

Одним из важнейших вопросов, в рассматриваемой системе, является выбор величин скольжений двигателя и генератора, которые непосредственно определяют величины напряжений и частот питания.

При идентичности параметров машин, их механические характеристики существенно различаются. Так в генераторном режиме при одинаковых напряжениях и частотах питания максимальное значение момента в генераторном режиме больше двигательного, а изменение параметров питания двигателя по закону $U_1/f_1 = \text{const}$, не обеспечивает одинакового значения скольжения.

Для обеспечения равных по модулю величин скольжений работающей пары, напряжение и частота питания двигателя могут быть найдены из выражений:

$$M_{\Gamma} = \frac{m_1 \cdot r'_2 \cdot U_C^2}{\omega_{0\Gamma} \cdot s \cdot \left(\left(r_1 - \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \right)}, \quad (4)$$

$$M_{\mathcal{D}} = \frac{m_1 \cdot r'_2 \cdot U_{\mathcal{D}}^2}{\omega_{0\mathcal{D}} \cdot s \cdot \left(\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \cdot \left(\frac{f_{\mathcal{D}}}{f_H} \right)^2 \right)}, \quad (5)$$

где r_1, x_1 – параметры первичной цепи машины; r'_2, x'_2 – параметры вторичной цепи, приведенной к первичной; s – номинальное (расчетное) скольжение.

Приравняв значения модулей моментов двигателя (4) и генератора (5), и выразив напряжение двигателя с учетом изменения индуктивных сопротивлений при работе двигателя на частоте питающего напряжения отличной от номинальной получим:

$$U_{\mathcal{D}} = U_C \cdot \left[\frac{1+s}{1-s} \cdot \frac{\left(r_1 + \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2 \cdot \left(\frac{1+s}{1-s} \right)^2}{\left(r_1 - \frac{r'_2}{s} \right)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

На рис. 3 показаны механические характеристики испытуемых машин для этого случая, описанным выражением (6).

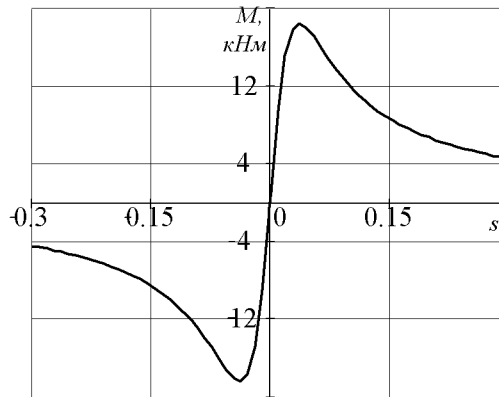


Рис. 3. Механическая характеристика

Проведем математическое моделирование работы АТЭД, включенного по схеме взаимной нагрузки при использовании выше описанных законов управления. В качестве объекта для исследования используем АТЭД НТА-1200 ($P_H=1200$ кВт; $U_H=1300$ В; $I_1=385$ А; $n_H=1295$ об/мин; $f_H=65,4$ Гц; $\eta_H=0,957$; $\cos\varphi_H=0,861$). Исходными данными являются номинальные частота и амплитуда подводимого напряжения для машины, работающей в генераторном режиме, а для машины, работающей в двигательном режиме, изменение входных величин в соответствии с выбранными законами управления. Результатом моделирования будут являться рабочие и механические характеристики исследуемого двигателя, а также потребляемая схемой в целом активная мощность. Наибольший интерес представляют зависимости потребляемой мощности схемы взаимной нагрузки P_{CET} от полезной мощности на валу двигателя P_2 .

На рис. 4. представлены зависимости $P_{CET}=f(P_2)$ для всех рассматриваемых законов регулирования. Так же на графиках представлены среднеквадратические отклонения, которые показывают, что в номинальном режиме при ($P_2=1200$ кВт) мощности, потребляемые из сети, отличаются существенно для различных законов.

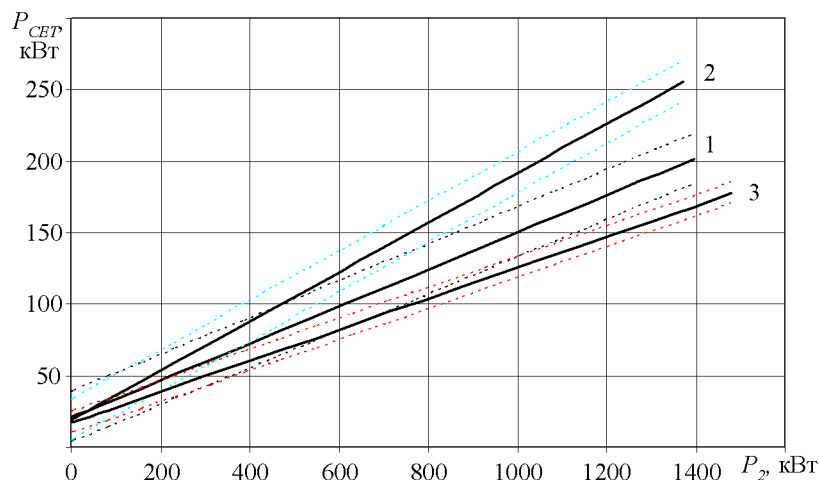


Рис. 4. Потребляемая мощность из сети в схеме взаимной нагрузки
 1 – $U/f=\text{const}$, 2 – $U/\sqrt{f}=\text{const}$, 3 – закон управления при постоянстве скольжения.

При анализе характеристик рис. 4 видно, что при испытаниях наиболее выгодно использовать закон управления с постоянным скольжением двигателя и генератора. В данном случае на покрытие потерь из сети потребляется наименьшее количество электроэнергии. Предложенный закон управления испытуемым двигателем на 20÷30 % экономичнее, чем закон управления с постоянным моментом и постоянной мощностью.

Глава четвертая посвящена разработке программно – аппаратных средств, реализующих метод испытаний по схеме взаимной нагрузки, и проведения экспериментальных исследований работы схемы.

При проведении испытаний крупных асинхронных машин необходимо измерять следующие величины: частоту тока статора, вращающий момент, токи и напряжения, потребляемую мощность. Сложность проведения испытаний обуславливается несинусоидальным характером выходного напряжения ПЧ.

Использование цифровых средств для проведения измерений ограничено их быстродействием и величинами пиковых сигналов токов и напряжений. Для решения этих задач необходимо использовать аналоговые устройства совместимые с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) и датчиками, обеспечивающими гальваническую развязку между измерительными цепями и устройством обработки сигнала. В качестве датчиков напряжения и тока целесообразней использовать датчики, выпускающиеся современной промышленностью, работающие на эффекте Холла, которые обеспечивают гальваническую развязку между входными и выходными параметрами.

На выходе датчика тока и напряжения формируются масштабированные сигналы мгновенных значений тока и напряжения:

$$\left. \begin{aligned} u_H(t) &= k_U \cdot u(t) \\ i_I(t) &= k_I \cdot i(t) \end{aligned} \right\},$$

где $u(t)$ и $i(t)$ – сигналы напряжения и тока несинусоидальной сети, представленные на рис. 5, а k_H и k_I – коэффициенты преобразования датчика напряжения (ДН) и датчика тока (ДТ).

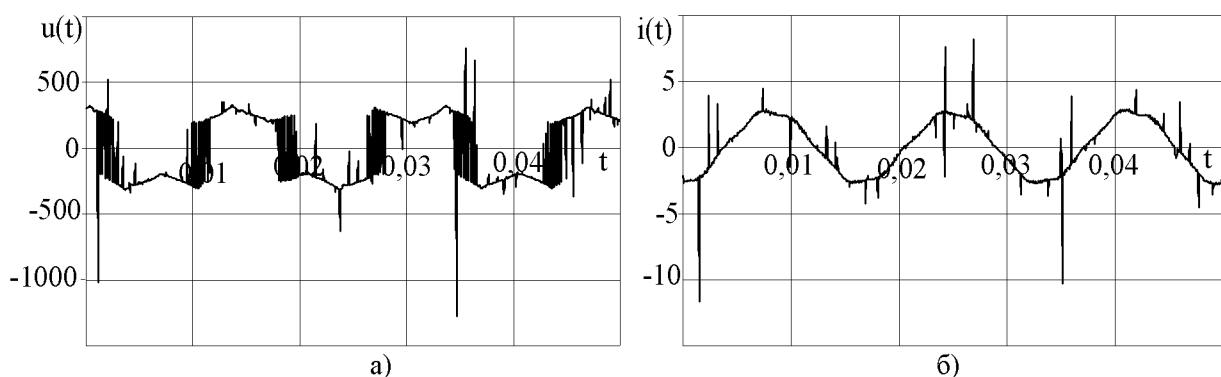


Рис. 5. Осциллограммы выходных сигналов: а) напряжения; б) тока

Одним из важнейших параметров, измеряемым при испытаниях, является активная мощность, подводимая через ПЧ к испытуемому двигателю. Так как характер напряжений и токов системы привода является несинусоидальным, то

активная мощность цепи несинусоидального напряжения определяется по выражению:

$$s(t) = u(t) \cdot i(t).$$

Выходные сигналы с датчиков поступают на вход АЦП, преобразуются в цифровой код и передаются через интерфейс на персональный компьютер. Средствами программы, написанной на персональном компьютере, формируется сигнал мгновенной мощности с учетом коэффициентов преобразования датчиков тока и напряжения равный:

$$p(t) = k_H \cdot k_U \cdot s(t) \cdot \cos \varphi.$$

Для определения активной мощности необходимо определить угол сдвига (φ) между сигналом тока и напряжения. Для этого необходимо в периодических сигналах тока и напряжения выделить первую гармонику и определить угол сдвига фаз: $\varphi = \frac{\Delta t}{T} 360^\circ$, где Δt – временной сдвиг между первыми гармониками сигналов тока и напряжения, T – период.

Для обработки сигналов в среде программирования LabVIEW 8.5 была разработана программа обработки сигнала на языке визуального программирования. Сигнал, через клеммную колодку и соединительный кабель поступает в устройство ввода, где производится его оцифровка. Частота оцифровки, согласно теореме Котельникова, должна быть взята с частотой равной или в два раза больше максимальной частоты спектра, для того чтобы аналоговый сигнал $s(t)$ был восстановлен однозначно и без потерь по своим дискретным отсчетам.

Оцифрованный сигнал передается в программу обработки в виде массива чисел, который разделяется на массив тока и напряжения. После чего производится вычисление среднеквадратичных значений сигналов, выделение первой гармоники при помощи частотных фильтров. На рис. 6 представлены кривые тока и напряжения после обработки.

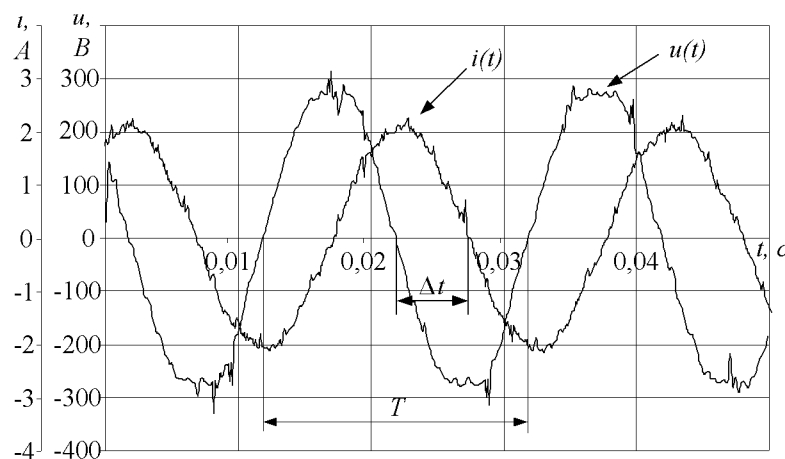


Рис. 6. Осциллограммы токов и напряжений после обработки

Для автоматизации процесса испытаний АТЭД разработан стенд по схеме взаимной нагрузки, содержащийся в составе стенда ПЧ позволяет задавать режим испытаний. Структурная схема данного стенда представлена на рис. 7.

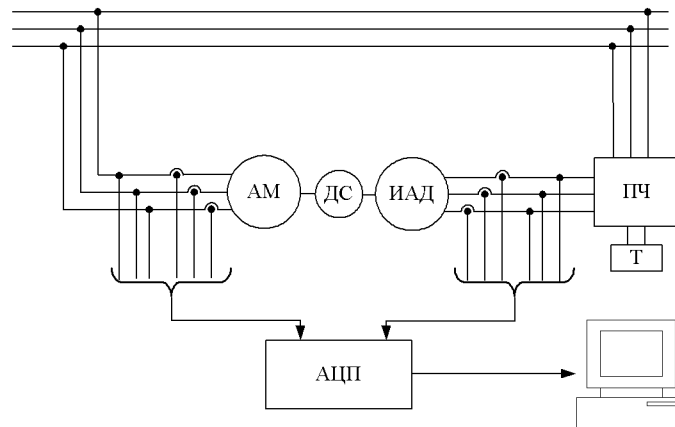


Рис. 7. Структурная схема стенда испытаний по методу взаимной нагрузки

Автоматизированный стенд состоит из преобразователя частоты (ПЧ), испытуемого асинхронного двигателя (ИАД), нагрузочного асинхронного двигателя (АМ), тормозного резистора (Т), датчика скорости (ДС), датчиков тока и напряжения. ПЧ подключен к сети переменного тока, к нему подключаются испытуемый асинхронный двигатель и тормозной резистор. Нагрузочный асинхронный двигатель подключен к сети переменного тока напрямую. Датчики тока и напряжения подключены в фазы испытуемого и нагрузочного двигателя.

Стенд работает следующим образом. Испытуемый частотно – регулируемый асинхронный двигатель сопрягается с нагрузочной асинхронной машиной. Преобразователь частоты управляет испытуемым двигателем, задавая ему необходимый режим работы. Датчик скорости находится на одном валу с асинхронными машинами и служит для измерения скорости. Датчики тока и напряжения служат для измерения фазных значений токов и напряжений, выходы датчиков соединены через интерфейсный кабель с АЦП, в котором производится преобразование сигналов и передача в персональный компьютер, где происходит обработка и отображение.

Для оценки точности математической модели были проведены сравнения экспериментально полученных энергетических характеристик с характеристиками, полученными при математическом моделировании. Для этого был разработан макет стенда испытания по методу взаимной нагрузки, который был собран на следующих элементах:

1. В качестве испытуемых электродвигателей использовались асинхронные электродвигатели серии 6А80В6У3 со следующими номинальными данными: $P_H=0.55$ кВт, $I_H=1,7$ А, $\eta_H=0.705$, $\cos\varphi=0,70$, $n_H=910$ об/мин.
2. Преобразователь частоты типа VLT 2800 (фирма Danfoss) с тормозным резистором.
3. Датчик тока, работающий на эффекте Холла LEM LA25-NP.
4. Датчик напряжения, работающий на эффекте Холла LEM LV25-P.
5. Устройство сбора информации National Instruments NI USB 6009 со следующими характеристиками: 8 аналоговых входов (14-bit, 48 kS/s); 2

аналоговых выхода (12-bit, 150 S/s); уровень тепловой защиты 30 В; частота оцифровки 10 кГц; сопряженность драйверов с Lab VIEW 8.8; USB коннектор с компьютером.

6. Датчик скорости, инкрементальный энкодер Kubler 1024 импульса на оборот.

На рис. 8 представлены рабочие характеристики испытуемого двигателя, полученные при математическом и физическом моделировании испытаний асинхронного двигателя методом взаимной нагрузки. Предложенный алгоритм проведения испытаний позволяет получить рабочие характеристики во всем диапазоне работы асинхронного двигателя (от холостого хода до режима номинальной нагрузки). Полученные результаты позволяют сделать вывод об адекватности результатов, полученных на основе математического моделирования. Относительная ошибка не превышает 6 %. Проведенное экспериментальное исследование подтверждает возможность применения схемы взаимной нагрузки для проведения испытаний.

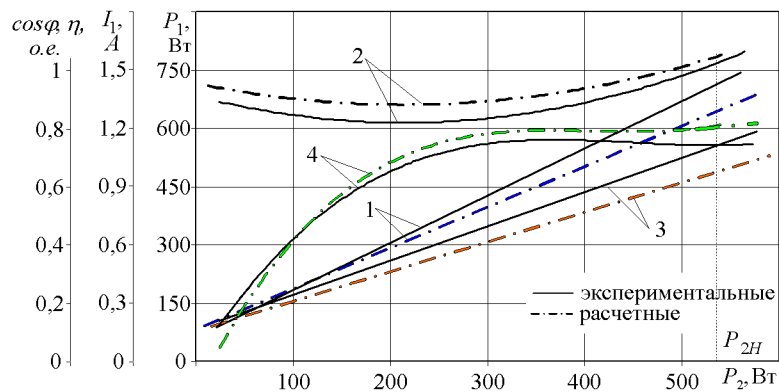


Рис. 8. Рабочие характеристики испытуемого двигателя
1 – $P_1=f(P_2)$; 2 – $I_1=f(P_2)$; 3 – $\cos\varphi=f(P_2)$; 4 – $\eta=f(P_2)$

На рис. 9 представлена характеристика потребляемой активной мощности схемой из сети от полезной мощности на валу испытуемого двигателя. Активная мощность, потребляемая схемой, определяется как разность потребляемой активной мощности испытуемого двигателя и активной мощности, вырабатываемой генератором. Мощность, потребляемая из сети, расходуется на покрытие потерь в схеме испытания.

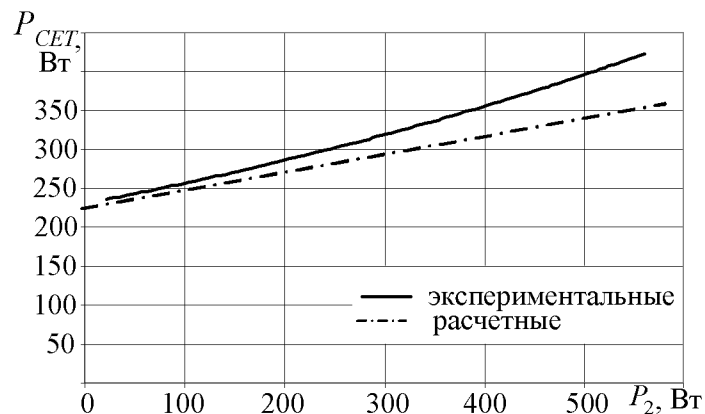


Рис. 9. Зависимость $P_{CET}=f(P_2)$

Полученные экспериментальные данные подтверждают зависимость коэффициента экономичности от КПД испытуемых машин. Экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что применение схемы взаимной нагрузки целесообразно для испытаний асинхронных машин средних и больших мощностей. Так как АД средних и больших мощностей обладают более высокими энергетическими характеристиками.

Использование любого оборудования, в том числе и схемы испытательной станции должно иметь экономическое обоснование целесообразности применения. Проведенный сравнительный анализ схемы испытаний, наиболее распространенной в настоящее время, со схемой испытаний по методу взаимной нагрузки на примере АТЭД НТА-1200 показал, что при применении схемы испытаний по методу взаимной нагрузки экономия потребленной электроэнергии во время испытаний составляет 75 % по сравнению общепромышленной схемой испытаний по методу возвратной нагрузки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты выполненных исследований заключаются в следующем:

1. Разработана схема испытаний по методу взаимной нагрузки, позволяющая производить энергосберегающие испытания двух одинаковых асинхронных тяговых электродвигателей в продолжительном режиме. Данная схема обеспечивает максимальное энергосбережение при испытании асинхронных тяговых электродвигателей в продолжительном режиме.
2. Экономичность схем испытаний тяговых асинхронных двигателей следует оценивать по предложенному коэффициенту экономичности, который основан на учете потерь во всех агрегатах, входящих в состав испытательной станции.
3. Предложенная схема обеспечивает наибольший коэффициент экономичности, который напрямую зависит только от вида испытуемых асинхронных двигателей, включенных по схеме взаимной нагрузки. Коэффициент экономичности схемы испытаний по методу взаимной нагрузки является наибольшим среди всех известных схем, так как определяется только КПД двух одинаковых машин входящих в состав схемы испытания.
4. Разработана математическая модель схемы взаимной нагрузки для испытаний асинхронных тяговых двигателей, которая позволяет оценивать рабочие и механические характеристики при различных способах частотного регулирования. С точки зрения энергосбережения наилучшим законом управления является предложенный закон при постоянстве скольжения. Использование, которого обеспечивает наиболее экономичный режим испытаний АТЭД в продолжительном режиме. Он позволяет экономить до 20÷30 % потребленной активной мощности, по сравнению с другими рассматриваемыми законами управления.
5. Разработан алгоритм и программное обеспечение измерения электрических величин при питании испытуемого двигателя от источника

несинусоидального напряжения, который позволил в автоматическом режиме в процессе испытаний измерять токи, напряжения, определять мощность с погрешностью не превышающей 2 %. Предложенный алгоритм измерения активной мощности был успешно испытан на кафедре ЭМА ТПУ, а так же внедрен на испытательной станции приемо-сдаточных испытаний крановых и общепромышленных двигателей ОАО «Сибэлектромотор» г. Томск.

6. Адекватность математической модели схемы взаимной нагрузки по энергетическим характеристикам проверена на разработанной физической установке. При этом среднеквадратичное отклонение не превышало 6 %.
7. Оценка экономической эффективности применения схемы испытаний по методу взаимной нагрузки для испытания асинхронных электродвигателей средних и больших мощностей показала, что экономия потребленной электроэнергии при применении данной схемы во время испытаний составляет 75 % по сравнению общепромышленной схемой испытаний по методу возвратной нагрузки.

Научные публикации по теме диссертации в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Бейерлейн, Е.В., Цукублин, А.Б., Рапопорт, О.Л. Испытание асинхронных машин методом взаимной нагрузки // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т. 308. – № 7. – С. 153–156.
2. Бейерлейн, Е.В., Цукублин, А.Б., Рапопорт, О.Л. Схема испытания тяговых частотно – регулируемых асинхронных электродвигателей // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. - №3. – С. 46-48.
3. Бейерлейн, Е.В. Обоснование применения энергосберегающей схемы испытаний крупных асинхронных электродвигателей // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 4. – С. 69–73.

Другие научные публикации по теме диссертации

4. Бейерлейн, Е.В., Цукублин, А.Б. Анализ схем испытания асинхронных тяговых электродвигателей // Современные техника и технологии : Материалы X международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 2 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – Т. 1. – С. 215-217.
5. Бейерлейн, Е.В., Цукублин, А.Б., Рапопорт, О.Л. Энергосберегающая схема испытаний тяговых асинхронных электродвигателей // Всероссийская научно – практическая конференция с международным участием “Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири”: г. Иркутск: 2005, С. 613-618.
6. Beierlein, E. Power properties of IM-IG system // Modern Techniques and Technologies : Proceedings of the 12th International scientific and practical conference of students, post-graduates and young scientist, – Tomsk: P.H.TPU, 2005. – Vol. 2. – P. 74-75.
7. Бейерлейн, Е.В. Энергосберегающие технологии испытания

- электрических машин переменного тока средних и больших мощностей // Материалы Всероссийской конференции – конкурсного отбора инновационных проектов студентов и аспирантов по приоритетному направлению Программы «Энергетика и энергосбережение». – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – С. 143-148.
8. Бейерлейн, Е.В., Волков, А.С. Энергосбережение при испытании крупных асинхронных машин // Наука. Технологии. Инновации : Материалы Всероссийской научной конференции молодых ученых, 6-9 декабря 2007г. : в 7 ч. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2007. – Ч. 3. – С. 52-54.
 9. Бейерлейн, Е.В. Энергетическая диаграмма схемы взаимной нагрузки // Современные техника и технологии : Материалы XIV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 24-28 марта 2008 г. : в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – Т. 1. – С. 337-338.
 10. Цукублин, А.Б., Бейерлейн, Е.В., Осадченко, А.А., Щербатов, В.В. Повышение эффективности изучения переходных процессов в электрических машинах применением единого комплекса физического и математического моделирования // Отчет по Гранту 7-42.05 Рег. Номер 0120. 0503982 Инв. Номер 02.2.006 04416.
 11. Бейерлейн, Е.В. Экономическая эффективность схемы взаимной нагрузки // Современные техника и технологии : Материалы XV международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 4-8 мая 2009 г. : в 3 т. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – Т. 1. – С. 371-372.
 12. Бейерлейн, Е.В. Измерение активной мощности при испытании крупных машин переменного тока // Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV международной научно-практической конференции, 13-16 октября 2009 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – С. 157-160.
 13. Rapoport, O.L., Beierlein, E.V. Energy-saving Technology for Testing of High Power Induction Motors // Proceedings of The International Forum on Strategic Technologies (IFOST 2009), Ho-chi-min city 2009. – С. 215-219.

Патенты

14. Пат. на ПМ 80018 РФ. МПК⁸ G01R 31/04. Устройство для испытания тяговых электродвигателей / Е.В. Бейерлейн, О.Л. Рапопорт, А.Б. Цукублин. Заявлено 21.04.2008; Опубл. 20.01.2009, Бюл. № 2. – 6 с.: ил.

Личный вклад автора

Автор единолично написал пять работ [3, 6, 9, 11, 12]. В работах написанных в соавторстве, вклад автора состоит в следующем: [1] разработка математической модели АТЭД включенных по схеме взаимной нагрузки; [2, 4, 5] обобщение результатов исследования и установка проблематики; [7, 8, 13] описание результатов исследования; [10, 14] постановка задач и алгоритмов расчета.