

На правах рукописи

ГОЛЕМГРЕЙН ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ

**ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ
СИНХРОННОГО ГИБРИДНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Специальность 05.09.01 –
Электромеханика и электрические аппараты

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск 2002

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор

МУРАВЛЕВ О.П.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор

БЕКИШЕВ Р.Ф.

кандидат технических наук,

ТЕПЛОВ А.И.

Ведущее предприятие – НИИ Взрывозащищенных электрических машин

(г. Кемерово)

Защита диссертации состоится 11 июня 2002 г. в 15 час. На заседании диссертационного совета К212.269.03 в актовом зале главного корпуса Томского политехнического университета по адресу 634034, г. Томск, пр. Ленина 30.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан 27 апреля 2002 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета, к.т.н., доцент

Алехин А.Е.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное состояние и перспективы развития промышленности предопределяет широкое внедрение систем комплексной автоматизации и роботизации производственных процессов. В настоящее время автоматизация очень широко внедряется в промышленность, транспорт, сельское хозяйство, быт.

Весьма распространены в системах автоматики электрические машины. Они выполняют самые различные, порой весьма ответственные функции, например, приводят во вращение всевозможные механизмы, обеспечивают работу следящих систем и многое другое. Поэтому дальнейшее развитие автоматизации производства неразрывно связано с совершенствованием электрических машин.

Практика эксплуатации синхронных двигателей показала, что не всегда удается удовлетворить требованиям предъявляемым со стороны электроприводов в конструкции одного, например, синхронно-реактивного, магнитоэлектрического или какого-либо другого электродвигателя. В связи с этим в последнее время довольно широкое распространение стали получать специальные электродвигатели в качестве приводов для различных систем комплексной автоматизации и роботизации производственных процессов. Одним из представителей специальных электродвигателей является так называемый синхронный гибридный двигатель (СГД), объединяющий в единой конструкции положительные свойства синхронно-реактивных и магнитоэлектрических машин. Особенно актуальным является вопрос о создании такого гибридного двигателя, основную долю мощности которого вырабатывала бы синхронно-реактивная машина, как наиболее дешевая и простая по конструкции, а энергия полюсов постоянных магнитов в полном объеме использовалась бы для повышения эксплуатационных характеристик двигателя.

Важной задачей, решаемой при разработке синхронных гибридных двигателей, используемых в электроприводе, является задача обеспечения их наиболее устойчивой работы в различных режимах функционирования. Приводные двигатели многих автоматических систем непрерывно работают в динамических режимах и, кроме того, переходные режимы на практике всегда присутствуют при функционировании электродвигателей. В силу вышесказанного обеспечение динамической устойчивости гибридного двигателя следует признать важной задачей.

С этой точки зрения особый интерес представляет вопрос о влиянии параметров отдельных машин СГД, и особенно соотношений между параметрами синхронно-реактивной и магнитоэлектрической машин на границы динамической устойчивости.

Вместе с тем, отсутствие теоретических исследований вопросов динамической устойчивости данного типа электродвигателей, существенно затрудняет проектирование и препятствует их внедрению в производство.

За помощь в написании работы и проведении исследований хочется поблагодарить Верхотурова Анатолия Ивановича – доцента кафедры ЭМА ТПУ.

Цель работы. Решение вопросов, связанных с разработкой и созданием синхронных гибридных двигателей, обладающих высокой динамической устойчивостью работы.

В связи с этим были поставлены следующие задачи:

- провести сравнительный анализ синхронных двигателей малой мощности различного типа с точки зрения их устойчивой работы, а также их прочих достоинств и недостатков, определяющих области их применения;
- оценить влияние угла взаимного расположения осей полюсов и соотношения параметров составных частей комбинированного ротора на динамическую устойчивость синхронного гибридного двигателя;
- разработать рекомендации по проектированию синхронных гибридных двигателей с учетом обеспечения высокой динамической устойчивости их работы.

Методы исследований. Для решения поставленных задач были применены методы математического и физического моделирования. Теоретическое исследование синхронного гибридного двигателя проводилось с использованием теории электрических машин и теории двух реакций. Экспериментальные исследования опытных образцов синхронных гибридных двигателей проводились на специально созданном испытательном стенде в лаборатории электрических машин Томского политехнического университета.

Научная новизна. В работе содержатся следующие научные результаты:

- Разработана математическая модель синхронного гибридного двигателя, позволяющая применять численные методы для исследования динамических режимов работы с учетом электромагнитного влияния составных частей комбинированного ротора;
- исследован процесс втягивания в синхронизм и установлена степень влияния параметров гибридного двигателя на величину входного момента;
- произведена оценка влияния параметров и угла сдвига осей полюсов составных частей ротора на динамические свойства гибридного двигателя;
- на основе математической модели установлена степень влияния инерционных масс и параметров СГД на величины максимально допустимых нагрузок в различных динамических режимах.

Практическая ценность работы состоит в следующем:

- расчетные программы, созданные на основе математической модели, позволяют количественно оценить влияние основных параметров синхронного гибридного двигателя на его динамическую устойчивость;
- разработанные рекомендации по проектированию СГД дают возможность на стадии проектирования предусмотреть изменение конструктивных элементов и, соответственно, параметров этих двигателей с целью достижения устойчивой работы при удовлетворении всех требований;
- предложена методика расчета на ЭВМ динамической устойчивости СГД, которая может быть использована при автоматизированном проектировании этих двигателей для определения предела динамической перегружаемости и динамической устойчивости проектируемого двигателя;

– на основе математической модели СГД и соответствующих программ могут в дальнейшем рассматриваться динамические режимы, не рассмотренные в данной работе, например динамические режимы связанные с изменениями напряжения и частоты питающей сети.

Реализация результатов работы.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также выработанные рекомендации переданы для внедрения в ОАО «СКБ Сибэлектромотор» и будут использованы при разработке синхронных гибридных двигателей для специальных электроприводов и для серийного производства. На основе проведенных исследований разработаны лабораторные работы по курсу «Основы научных исследований».

Апробация работы.

Основные положения работы и результаты исследований были представлены на следующих научно-технических конференциях:

- Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 1999);
- шестая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 2000);
- научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства» (НПЦ «Полус», Томск 2000);
- седьмая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии» (Томск, 2001);
- научно-техническая конференция «Перспективные материалы, технологии, конструкции, экономика» (Красноярск 2001);
- международная научно-практическая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» (Россия, Томск 2001);
- научные семинары кафедры электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 8 печатных работах.

Объем работы. Диссертационная работа изложена на 97 страницах машинописного текста, содержит 100 иллюстраций, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 114 наименований и приложений на 25 страницах.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ дана оценка актуальности работы, определены цели и задачи исследований, показаны новизна научных результатов и их практическая ценность.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ на основе специальной литературы была проведена сравнительная оценка различных видов синхронных микродвигателей на современном этапе развития техники. Необходимость такого анализа следует из того, что в различных диапазонах мощностей для разных областей практического применения следует постоянно искать оптимальный вариант двигателя.

Из всей номенклатуры синхронных машин в области мощностей от сотен ватт до нескольких киловатт наиболее пригодны синхронные реактивные двигатели (СРД) и синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ).

Можно предположить, что наиболее полно могут удовлетворить требованиям, предъявляемым к электродвигателям, так называемые синхронные гибридные двигатели, сочетающие положительные свойства СРД и СДПМ. В настоящее время были проведены исследования и разработаны несколько видов конструкций СГД. Разработанные конструкции синхронных гибридных двигателей достаточно технологичны при изготовлении. Их можно изготавливать на базе серийных асинхронных (по конструкции статора) и синхронных реактивных (по конструкции ротора) электродвигателей. Существующие виды СГД по своим энергетическим характеристикам сравнимы с асинхронными двигателями в тех же габаритных размерах.

Один из видов синхронных гибридных двигателей имеет следующую конструкцию. Ротор гибридного двигателя состоит из двух или нескольких составных частей, расположенных на валу в аксиальном направлении. Одна часть комбинированного ротора представляет собой бочку ротора усовершенствованного синхронного реактивного двигателя. Вторая часть также имеет вид усовершенствованного СРД, только в дополнительных внутренних пазах располагаются постоянные магниты. Магнитоэлектрическая часть комбинированного ротора может располагаться с одного торца, либо с обоих торцов ротора усовершенствованного СРД. При этом существует возможность изменять угол взаимного пространственного расположения осей полюсов составных частей комбинированного ротора (рис.1).

Таким образом, в настоящее время конкурентом синхронного реактивного двигателя и синхронного двигателя с постоянными магнитами, используемых в электроприводах, может стать синхронный гибридный двигатель. Однако одним из главных препятствий для серийного производства СГД является то, что практически не велись исследования по их устойчивости.

Процессы в СГД в общем случае имеют характер электромеханических переходных процессов, то есть принимаются во внимание механическая и электрическая инерционность двигателя. Поэтому возникает необходимость совместного рассмотрения уравнений равновесия напряжений электрических контуров машины и уравнения моментов. При исследовании динамической устойчивости частота вращения ротора – переменная величина. Поэтому строгое рассмотрение динамической устойчивости связано с решением нелинейных дифференциальных уравнений. В общем случае решение этих уравнений возможно только численными методами.

При конечных возмущениях характер протекания переходного процесса зависит не только от исходного режима машины, но и от вида возмущения. Простейшее возмущение – это внезапное изменение какой-либо величины, остающейся затем постоянной, например внезапное увеличение или снижение нагрузки на валу синхронного двигателя. На практике встречаются возмущения в виде одного или ряда импульсов (кратковременная нагрузка двигателя). В общем случае возмущение может иметь сложный характер во времени.

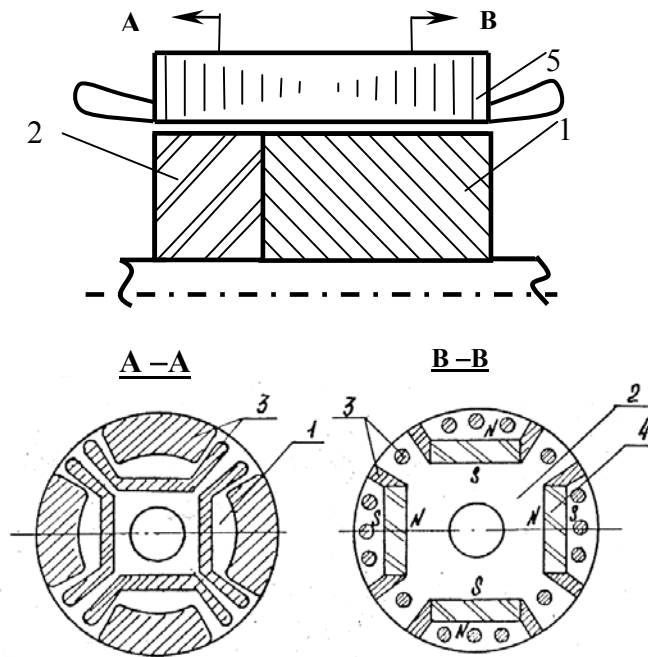


Рис. 1. Конструкция синхронного гибридного двигателя.
1 – лист ротора СРД; 2 – лист ротора СДПМ; 3 – пазы залитые алюминием; 4 – постоянные магниты.

Теоретическое исследование влияния параметров синхронного гибридного двигателя на показатели динамической устойчивости и границы динамической устойчивости будем проводить на основе математической модели. Но точное аналитическое описание электромеханического переходного процесса в СГД выполнить чрезвычайно сложно. Для облегчения этой задачи рассмотрим некоторую идеализированную синхронную машину с рядом общепринятых допущений. Для упрощения расчетов и облегчения восприятия полученных результатов была введена система относительных единиц.

С целью математического описания динамических режимов работы СГД составляются уравнения равновесия напряжений обмоток и уравнения движения ротора. Для синхронных машин наиболее удобной является форма записи этих уравнений в осях d и q , то есть выбирается система координат жестко связанная с ротором.

Дифференциальные уравнения синхронного гибридного двигателя, описывающие электромеханический переходный процесс, в системе координат d и q в операторной форме ($p = d/dt$) будут иметь следующий вид

$$\begin{aligned}
U_d &= p \cdot \psi_d + \rho \cdot i_d + \psi_q \cdot \omega \\
U_q &= p \cdot \psi_q + \rho \cdot i_q + \psi_d \cdot \omega \\
0 &= p \cdot \psi_D + r_D \cdot i_D \\
0 &= p \cdot \psi_Q + r_Q \cdot i_Q \\
M &= H \cdot p \cdot \omega + M_c,
\end{aligned} \tag{1}$$

где потокосцепления обмоток записываются следующим образом

$$\begin{aligned}
\psi_d &= i_d \cdot x_{d\delta} + i_q \cdot x_{\delta} + i_D \cdot x_{dD} + \varepsilon \cdot \cos \lambda; \\
\psi_q &= i_q \cdot x_{q\delta} + i_d \cdot x_{\delta} + i_Q \cdot x_{qQ} + \varepsilon \cdot \sin \lambda; \\
\psi_D &= i_D \cdot x_{DD} + i_d \cdot x_{dD} + \varepsilon \cdot \cos \lambda; \\
\psi_Q &= i_Q \cdot x_{QQ} + i_q \cdot x_{qQ} + \varepsilon \cdot \sin \lambda,
\end{aligned} \tag{2}$$

а электромагнитный момент определяется из выражения

$$M = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d. \tag{3}$$

В уравнениях 1 – 3 приняты следующие обозначения

U_d, U_q – напряжения обмотки статора по осям d и q;

i_d, i_q, i_D, i_Q – токи в обмотках статора и эквивалентных роторных обмотках;

$\psi_d, \psi_q, \psi_D, \psi_Q$ – потокосцепления обмотки статора и эквивалентных роторных обмоток;

ρ, r_D, r_Q – активные сопротивления обмотки статора и эквивалентных роторных обмоток;

$x_{d\delta}, x_{q\delta}, x_{\delta}$ – эквивалентные индуктивные сопротивления обмотки статора;

x_{dD}, x_{qQ} – сопротивления взаимной индукции между обмотками статора и ротора;

x_{DD}, x_{QQ} – полные индуктивные сопротивления эквивалентных роторных обмоток;

ε – степень возбужденности;

H – инерционная постоянная вращающихся масс.

λ – угол поворота между полюсами составных частей комбинированного ротора.

Эквивалентные индуктивные обмотки статора определяются как

$$\begin{aligned}
x_{d\delta} &= x_d + x_{dl} \cdot \cos^2 \lambda + x_{ql} \cdot \sin^2 \lambda \\
x_{q\delta} &= x_q + x_{ql} \cdot \cos^2 \lambda + x_{dl} \cdot \sin^2 \lambda \\
x_{\delta} &= (x_{dl} - x_{ql}) \cdot \cos \lambda \cdot \sin \lambda
\end{aligned} \tag{4}$$

где x_d, x_q, x_{dl}, x_{ql} – синхронные индуктивные сопротивления по осям d, dl и q, ql в зонах расположения соответственно синхронно-реактивной и магнитоэлектрической частей ротора;

Проекции вектора фазного напряжения на продольную и поперечную оси U_d и U_q можно представить в виде

$$\begin{aligned} U_d &= -\sin \theta; \\ U_q &= \cos \theta, \end{aligned} \quad (5)$$

где θ – угол между вектором (напряжения и поперечной осью ротора (угол нагрузки), а амплитудное значение фазного напряжения принято за базовое $U_m = 1$

Угол нагрузки в системе относительных единиц можно определить из соотношения

$$p \cdot \theta = 1 - \omega. \quad (6)$$

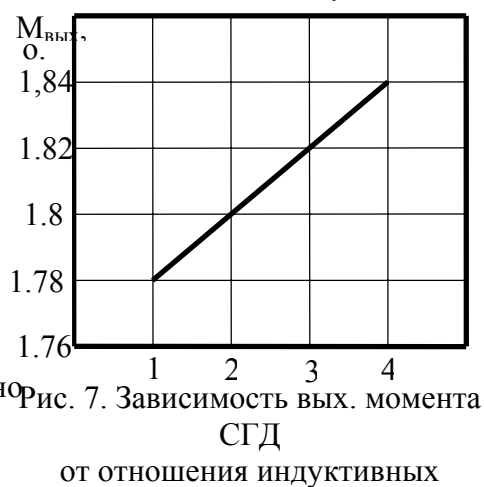
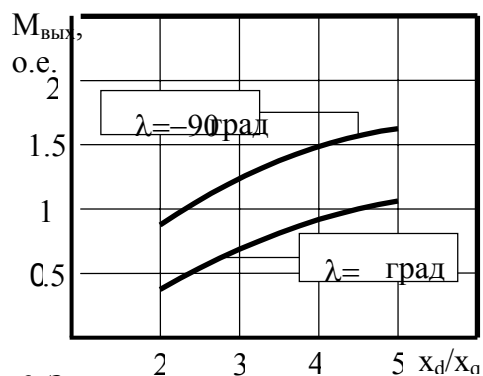
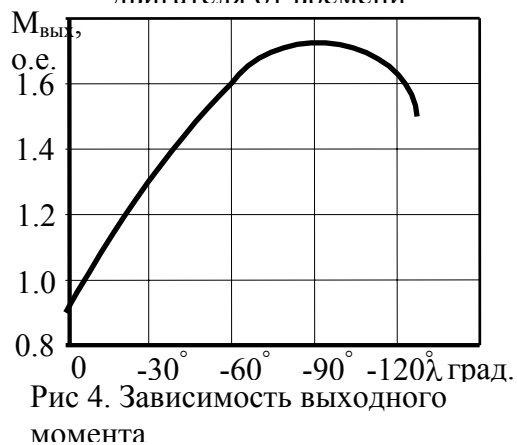
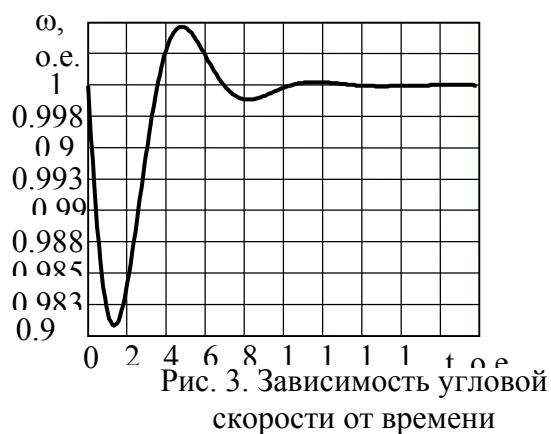
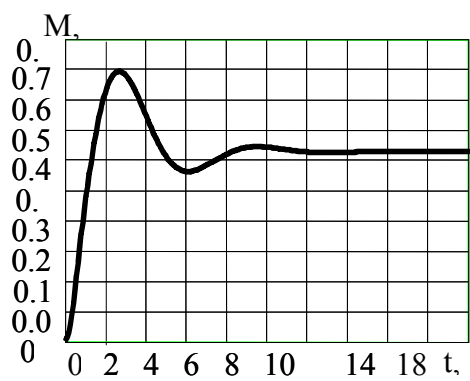
Приведем систему уравнений 1 к виду, удобному для моделирования на ЭВМ

$$\left. \begin{aligned} p \cdot \Psi_d &= -\sin \theta - \rho \cdot i_d + \Psi_q \cdot \omega; \\ p \cdot \Psi_q &= \cos \theta - \rho \cdot i_q - \Psi_d \cdot \omega; \\ p \cdot \Psi_D &= -r_D \cdot i_D; \\ p \cdot \Psi_Q &= -r_Q \cdot i_Q; \\ p \cdot \omega &= 1/H \cdot (M - M_c); \\ p \cdot \theta &= 1 - \omega. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Система уравнений 7 является системой дифференциальных уравнений синхронного гибридного двигателя при работе от сети с постоянным по амплитуде и частоте напряжением. Эти дифференциальные уравнения преобразуются далее к виду удобному для численного решения.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ рассмотрен режим наброса нагрузки. Наброс нагрузки производится скачком, и в нашем случае, примем величину скачка момента сопротивления на валу двигателя $M_n = 0,5$ о.е. Характер изменения момента двигателя M , угловой частоты ω при угле $\lambda = -\pi/2$ в зависимости от времени представлены на рис. 2, 3. Момент двигателя M в первоначальный момент равняется нулю. Затем происходит быстрый рост момента двигателя, что означает смещение электромагнитного поля относительно ротора СГД. В силу инерционности ротора M превышает свое установившееся значение и в некоторый момент времени рост угла нагрузки прекращается, и он достигает своего максимального значения, после чего снижается и колеблется с последующим затуханием около установившегося значения. Переходный процесс для всех углов λ заканчивается установившемся значением момента двигателя $M = 0,5$ о.е.

Немаловажным показателем работы синхронного гибридного двигателя в режиме наброса нагрузки является момент выхода из синхронизма $M_{вых}$. Это такой максимальный момент сопротивления, набрасываемый на вал двигателя, при котором двигатель еще не выходит из синхронизма.



Для определения качественных показателей работы синхронного гибридного двигателя воспользуемся так называемыми критериями качества. При исследованиях гибридного двигателя наиболее приемлемым является определение запаса устойчивости и быстродействия по переходной характеристике. При этом в качестве типового входного воздействия примем единичный скачок момента на валу двигателя. Склонность электромеханической системы, которой и является гибридный двигатель, к колебаниям, а следовательно, и запас устойчивости могут быть охарактеризованы максимальным значением изменяющейся величины момента M_{max} или угла нагрузки θ_{max} . Еще одним критерием может служить так называемое перерегулирование σ , определяемое по следующей формуле

$$\sigma = \frac{M_{max} - M(\infty)}{M(\infty)} \cdot 100\%, \quad (8)$$

где $M_{max} \neq 0$ представляет собой установившееся значение исследуемой величины после завершения переходного процесса.

Быстродействие системы может определяться по длительности переходного процесса t_n . Длительность переходного процесса определяется как время, протекающее от момента приложения единичного скачка до момента, после которого имеет место неравенство

$$|M(t) - M(\infty)| \leq \Delta M = \Delta_1, \quad (9)$$

где Δ_1 – заданная малая постоянная величина, представляющая собой обычно допустимую ошибку.

Зависимости выходного момента от параметров гибридного двигателя приведены на рис. 4 – 7.

ТРЕТЬЯ ГЛАВА посвящена рассмотрению импульсного наброса нагрузки. Импульсный наброс нагрузки является более общим случаем, а соответственно и более сложным, по сравнению с ранее рассмотренным режимом, когда длительность импульса не ограничена. Настоящий раздел посвящен исследованию наброса нагрузки при возмущении двигателя посредством прямоугольного импульса нагрузки. Причем в данном импульсе может варьироваться как время действия импульса, так и величина момента нагрузки. Иными словами необходимо изучить влияние параметров гибридного двигателя на показатели динамической устойчивости при изменении величины набрасываемого момента и длительности его воздействия.

В общем случае СГД первоначально устойчиво работает в режиме холостого хода. В последующий момент нагрузка скачкообразно возрастает до некоторого постоянного значения. Импульс нагрузки прикладывается на определенное время Δt , после чего также мгновенно снимается, и двигатель вновь начинает работать без нагрузки. Характер происходящих в двигателе процессов проясняется с помощью рис. 8,9.

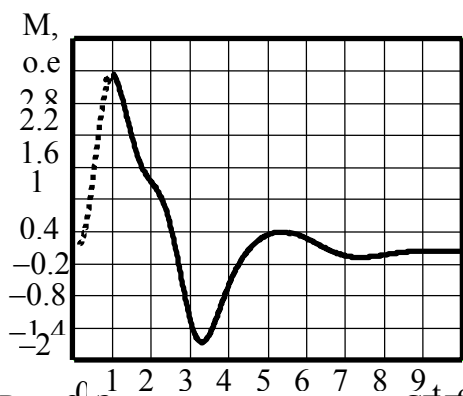


Рис. 8. Зависимость момента M от времени при импульсной нагрузке.

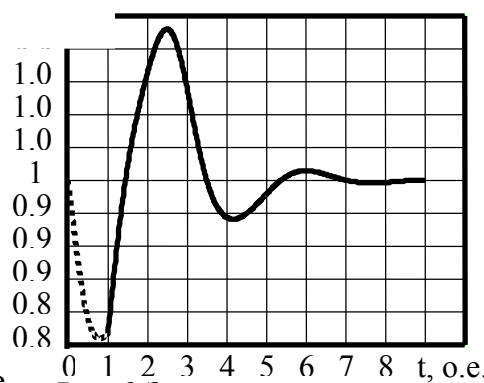


Рис. 9. Зависимость частоты вращения от времени при импульсной нагрузке.

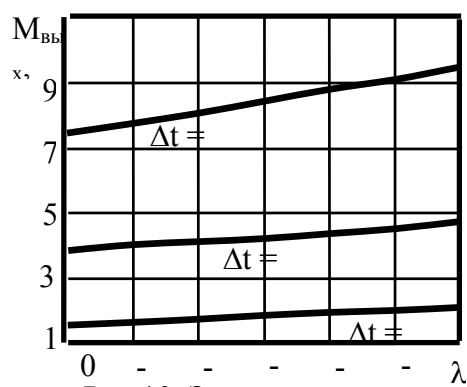


Рис.10. Зависимость вых. момента

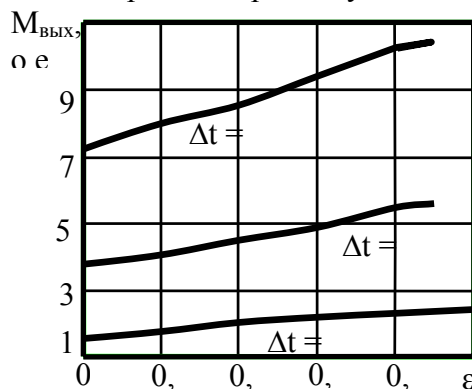


Рис.11. Зависимость импульсного вых

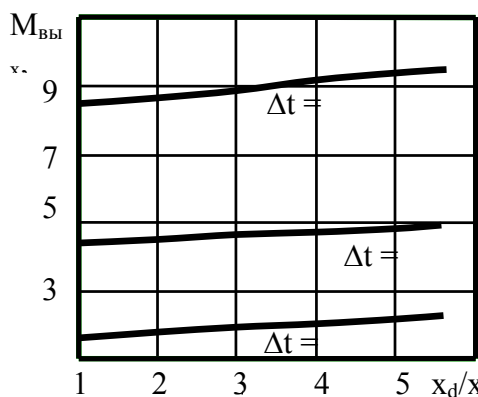


Рис.12. Зависимость вых. момента от отно-

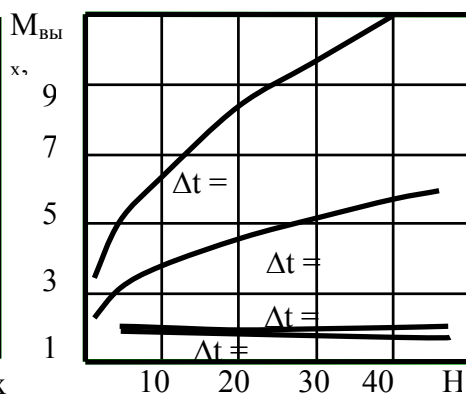


Рис. 13. Зависимость вых. импульсного

Необходимо отметить, что динамическая устойчивость двигателя не определяется исключительно по величине снижения частоты вращения. В некоторых случаях, например при больших длительностях импульса и инерционности, уменьшение частоты вращения до $\omega = 0,95 \omega_e$ приводит к выпадению СГД из синхронизма, в то время как в рассмотренном ранее случае даже при $\omega = 0,85 \omega_e$ двигатель сохраняет устойчивость. Смысл процесса выпадения из синхронизма при импульсной нагрузке сводится к проворачиванию ротора двигателя относительно поля статора и принятие углом нагрузки нового установившегося значения. В противном случае двигатель не выходит из синхронизма.

Зависимости предельного импульсного момента гибридного двигателя от параметров демонстрируются на рис. 10 – 13.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ исследованы режимы пуска и ресинхронизации.

Синхронные гибридные двигатели рассчитываются на прямой пуск от полного напряжения сети. СГД работает при пуске как асинхронный и должен развить скорость близкую к синхронной и под действием синхронизирующего момента войти в синхронизм.

Условия втягивания в синхронизм характеризуются входным моментом $M_{вх}$. В качестве критерия втягивания в синхронизм при проектировании гибридных двигателей следует принимать величину $M_{вх}$ равную максимальному моменту сопротивления на валу, при котором двигатель достигнет синхронной скорости, работая от сети с номинальным напряжением и частотой.

При исследовании втягивания в синхронизм пуск СГД рассчитывался исходя из следующих начальных условий. В начальный момент времени ротор неподвижен и к обмотке статора внезапно подводится номинальное напряжение. Результатами выполнения программы расчета являются зависимости интересующих нас величин (электромагнитного момента, частоты вращения) от времени при различных начальных условиях и параметрах СГД (рис. 14, 15).

По результатам вычислений находилась искомая величина момента входа двигателя в синхронизм. Для этого определялись два граничных значения момента нагрузки, отличающиеся друг от друга на фиксированную величину (не более 1%). При этом двигатель должен втягиваться в синхронизм при меньшем значении M_n , либо при большем моменте продолжает работать в установившемся асинхронном режиме. Исходя из этого, входной момент принимался равным меньшему из указанных M_n .

Входной момент, при всех равных условиях, имеет одинаковые значения, как при пуске двигателя, так и при ресинхронизации. Характер зависимостей входного момента от параметров двигателя иллюстрируют рис. 16 – 19.

При исследовании пускового режима получена также статическая механическая характеристика, которая имеет характер, сходный с аналогичной характеристикой асинхронного двигателя.

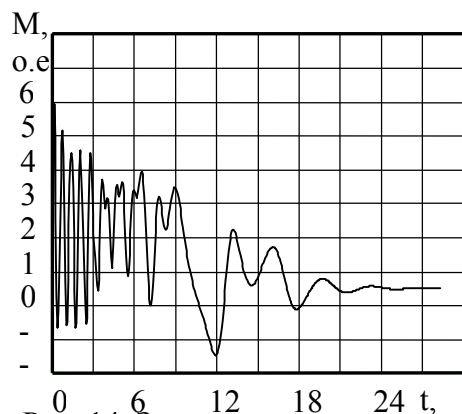


Рис. 14. Зависимость момента от времени при пуске.

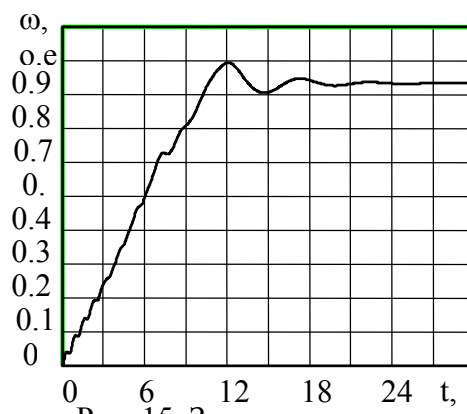


Рис. 15. Зависимость частоты вращения от времени при

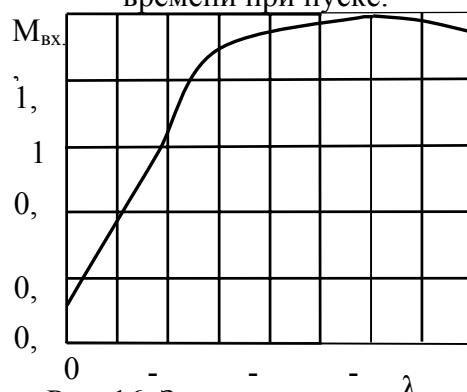


Рис. 16. Зависимость входного момента от угла между полюсами

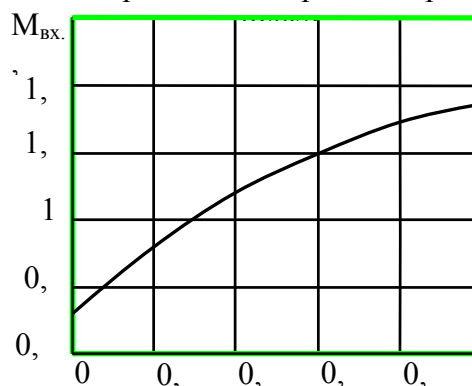


Рис. 17. Зависимость входного момента от степени возбужденности

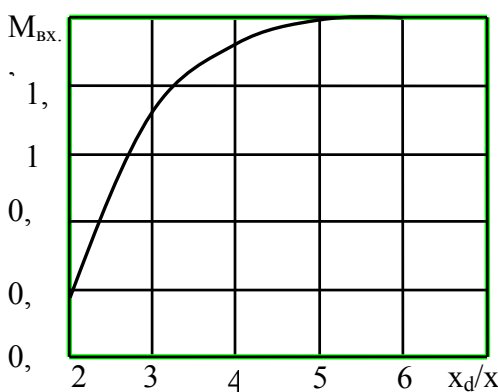


Рис. 18. Зависимость момента входа от отношения индуктивных

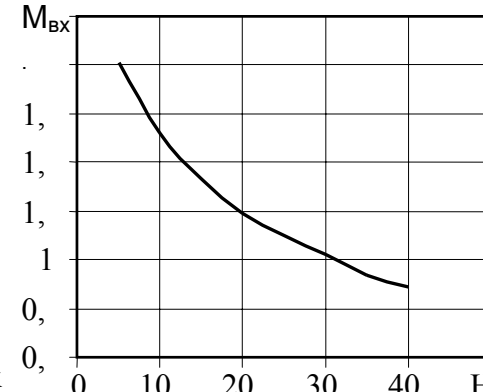


Рис. 19. Зависимость входного момента от инерционной

В ПЯТОЙ ГЛАВЕ рассмотрены экспериментальные исследования.

Для определения адекватности математической модели, а соответственно и результатов исследования реальным процессам в гибридном двигателе, требуется проведение эксперимента, в ходе которого должны быть определены максимальный, минимальный моменты, а также моменты входа в синхронизм и выхода.

Конкретные параметры испытуемого двигателя были получены проведением соответствующих экспериментов. Испытуемый синхронный гибридный двигатель был создан на базе асинхронного двигателя АИР-90. На роторе этого двигателя аксиально расположены магнитоэлектрическая и синхронно-реактивная части, которые занимают 30 и 70% длины активной части соответственно. Синхронная частота вращения СГД составляет 1500 об/мин, а номинальный момент – 12,5 Н·м. Номинальная мощность двигателя 2 кВт.

На рис. 20 приведена электрическая схема экспериментальной установки. Пуск двигателя осуществляется непосредственным включением в сеть. Для контроля фазных токов статора в каждую фазу включены амперметры. Скорость ротора фиксируется с помощью тахогенератора ТГ, сигнал которого передается на регистрирующий измерительный прибор Π , отградуированный в масштабе оборотов в минуту. Для нагружения двигателя используется электромагнитный тормоз ЭМТ, Обмотка возбуждения которого питается постоянным током от мостового выпрямителя. Регулировка уровня постоянного напряжения производилось с помощью автотрансформатора Т. Скачкообразный наброс нагрузки осуществлялся с помощью кнопочной станции К, путем замыкания и размыкания цепи обмотки возбуждения ЭМТ. Измерение моментов осуществлялось с помощью маятниковое измерительное устройство M_2 .

Результатом проведенных экспериментальных исследований стали зависимости входного и выходного моментов в зависимости от угла λ и момента инерции вращающихся масс, представленные на рис. 21 – 24. На тех же рисунках приведены кривые, полученные с помощью предложенной математической модели для аналогичных параметров двигателя, которые имели следующие значения $x_{dэ} / x_{qэ} = 2,04$; $\rho = 0,03$; $\varepsilon = 0,143$. При получении зависимостей входного и выходного моментов от угла λ момент инерции имел значение 0,04 кг·м². Когда снималась зависимость от момента инерции угол $\lambda = -90^\circ$.

На приведенных рисунках сплошные линии соответствуют расчетным кривым, а штрихованные – полученным экспериментально. Как видно из приведенных иллюстраций для всех исследуемых зависимостей, характер расчетных и экспериментальных кривых аналогичен. Однако расчетные кривые проходят несколько выше экспериментальных. Данное несоответствие объясняется тем, что при создании математической модели были приняты допущения, которые несколько искажают реальные процессы в машине. Кроме того, экспериментальное определение момента двигателя сопряжено с погрешностями моментомера, измерительных приборов. Вследствие вышесказанного, полученное несоответствие расчетных и экспериментальных данных (до 10%) следует признать допустимым. Исходя из этого, можно заключить, что математическая модель в достаточной степени отражает происходящие в гибридном двигателе процессы и может использоваться для анализа

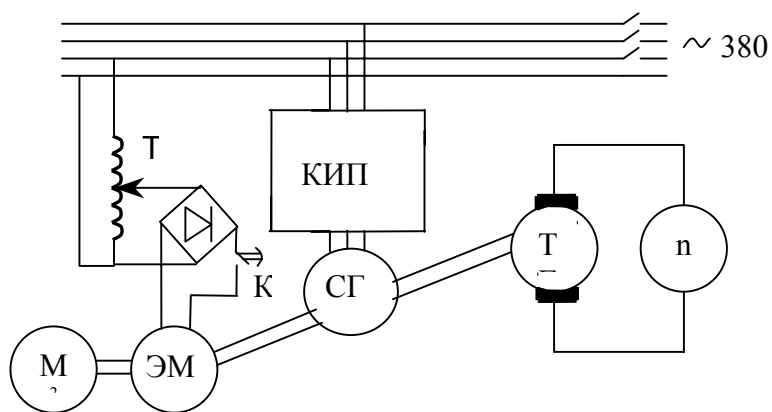


Рис. 20. Электрическая схема экспериментальной

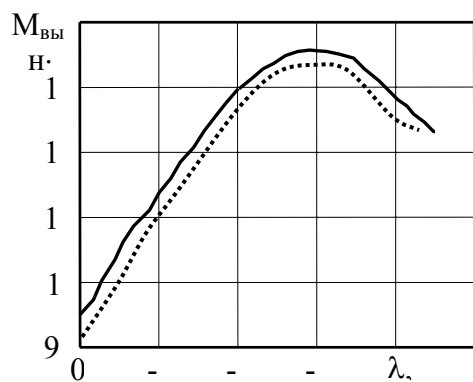


Рис. 21. Зависимость вых. момента от угла

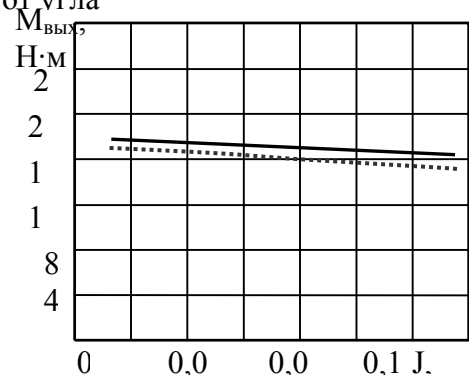


Рис. 23. Зависимость выходного момента от момента инерции

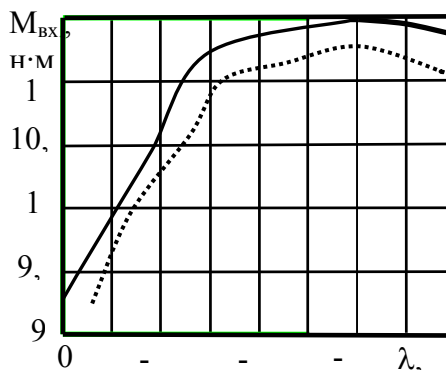


Рис. 22. Зависимость входного момента

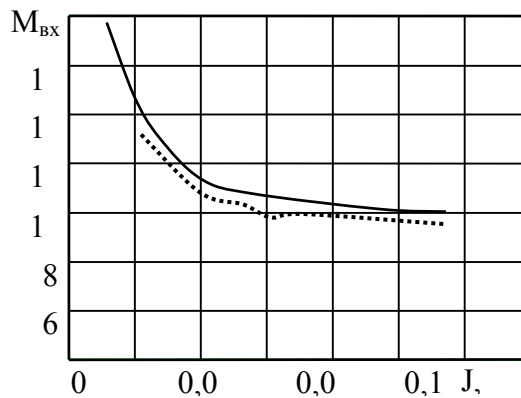


Рис. 24. Зависимость входного момента от момента инерции

динамических процессов в нем.

В ПРИЛОЖЕНИИ приведены расчетные программы для различных динамических режимов.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проделанной исследовательской работы решена задача адекватной оценки динамических свойств и характеристик гибридного двигателя в различных режимах. В режиме наброса нагрузки бесконечной длительности определены предельные выходные моменты, и такие показатели динамической устойчивости как перерегулирование, ударные токи статора, длительности переходного процесса в зависимости от параметров гибридного двигателя. Исследованы зависимости предельного импульсного момента в зависимости от параметров СГД в режиме импульсного наброса нагрузки. Синхронизирующие свойства гибридного двигателя получены при рассмотрении режимов пуска и ресинхронизации.

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований динамической устойчивости синхронных гибридных двигателей можно сделать следующие выводы.

1. На основе рассмотрения динамических и статических показателей различных видов синхронных двигателей малой мощности сделан вывод, что гибридные двигатели могут найти применение в области мощностей от сотен ватт до десятков киловатт. Из нескольких конструктивных вариантов исполнения СГД выбран для исследования вариант с аксиальным расположением частей ротора двигателя, при котором можно изменять угол взаимного расположения составных частей.

2. Получена математическая модель для исследования гибридного двигателя на основе уравнений Парка – Горева с использованием эквивалентных параметров СГД. Разработаны программы расчета динамических режимов, работающие в среде Mathcad. Использование этих программ позволило получить зависимости момента двигателя, частоты, тока статора, угла нагрузки от времени для различных динамических режимов. Данные зависимости позволили получить границы динамической устойчивости СГД, показатели качества переходного процесса.

3. Проведенные исследования доказывают наличие существеннейших преимуществ конструкции, обеспечивающей угол $\lambda = -90^\circ$. При набросе нагрузки бесконечной длительности угол λ , имеет наибольшее влияние на момент выхода из синхронизма, установившейся ток статора, максимальное изменение угла нагрузки, а соответственно, и колебания ротора, а также время переходного процесса. При этом момент выхода из синхронизма имеет максимальное значение, а ударный и установившейся токи статора минимальны.

Увеличение степени возбужденности оказывает значительное влияние на границы динамической устойчивости, ведет к снижению ударного и установившегося токов статора. При этом данное увеличение не сказывается на времени переходного процесса и перерегулировании.

Значительное влияние на показатели динамической устойчивости оказывает отношение индуктивных сопротивлений x_d / x_q . Рост данного отношения способствует увеличению момента выхода из синхронизма и уменьшению установившегося тока статора.

4. Характер границ динамической устойчивости при импульсном набросе нагрузки в зависимости от параметров гибридного двигателя совпадает с режимом

наброса нагрузки бесконечной длительности, а разница заключается лишь в величине момента выхода из синхронизма при различных длительностях импульса нагрузки. Доказательством этому может служить то, что с увеличением длительности импульса нагрузки, значения выходного момента приближается к значениям того же момента при набросе нагрузки с бесконечной длительностью импульса.

5. Из всех воздействующих параметров наибольшее изменение момента входа вызывает степень возбужденности ε . При изменении ε от 0 до 0,5 входной момент увеличивается более чем в два раза.

Максимальное значение входного момента приходится на угол $\lambda = -90^\circ$. Следовательно, данное значение λ предпочтительнее остальных в данном отношении.

Отношение индуктивных сопротивлений синхронно-реактивной части на начальном участке вызывает быстрый рост M_{ex} . По мере увеличения x_d/x_q рост входного момента замедляется и при значениях более 5 практически прекращается.

6. При пуске гибридный двигатель имеет статические механические характеристики сходные с асинхронными двигателями, с той лишь разницей, что имеются колебания момента двигателя, вызываемые переменной составляющей момента двигателя. Втягивание в синхронизм происходит под действием синхронных моментов в области подсинхронных скоростей.

Гибридные двигатели обладают значительным пусковым моментом, что весьма ценно при эксплуатации двигателя. Рост степени возбужденности и отношения индуктивных сопротивлений СРД вызывает снижение $M_{пуск}$ на величину не более 20%. Отношение индуктивных сопротивлений СГД слабо влияет на пусковой момент.

7. Из большого разнообразия методов и конструктивных схем экспериментального определения момента двигателя был выбран моментомер с электромагнитным тормозом и маятниковым измерительным устройством. Для проверки адекватности математической модели и расчетных данных были экспериментально получены параметры синхронного гибридного двигателя. Сравнительная оценка расчетных и экспериментальных данных произведена на зависимостях входного и выходного моментов от угла λ и инерционной постоянной. Из сходства характеров анализируемых кривых, и небольшом расхождении между ними, не превышающем 10%, сделано заключение об адекватности математической модели.

8. Полученные экспериментальные и расчетные данные достаточно полно описывают динамические процессы синхронного гибридного двигателя. Основываясь на этих данных, даны рекомендации по проектированию таких двигателей. Прежде всего, оптимальным следует признать угол $\lambda = -90^\circ$. За счет использования современных постоянных магнитов нужно стремиться к лучшему их использованию.

9. Результаты диссертационной работы целесообразно использовать при разработке специальных электроприводов с улучшенными динамическими характеристиками. Данные 19 ований и разработок, проведенных в диссертационной работе, внедрены в ОАО "СКБ Сибэлектромотор", на кафедре Электрических машин и аппаратов Томского политехнического университета в учебном процессе при изучении специальных дисциплин.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ АВТОРА

1. Големгрейн В.В., Верхотуров А.И. Математическая модель для исследования динамической устойчивости синхронного гибридного электродвигателя.// Пятая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии»: Тез. докл. – Томск: ТПУ, 1999. – С. 309 – 310.
2. Големгрейн В.В., Верхотуров А.И. Определение запаса динамической устойчивости синхронного гибридного двигателя.// Шестая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии»: Тез. докл. – Томск: ТПУ, 2000. – С. 289 – 290.
3. Големгрейн В.В., Верхотуров А.И. Динамическая устойчивость синхронного гибридного двигателя при импульсном набросе нагрузки.// Научно-техническая конференция «Электронные и электромеханические системы и устройства»: Тез. докл. – Томск: НПП «Полюс», 2000. – С. 272.
4. Верхотуров А.И., Големгрейн В.В. Результаты исследования динамической устойчивости синхронного гибридного двигателя при импульсном набросе нагрузки. // Сб. научных трудов НПП «Полюс» – Томск: МП «Раско» при издательстве «Радио и связь», 2001. С. 365 – 367.
5. Верхотуров А.И., Големгрейн В.В. Экспериментальные исследования синхронизирующих свойств синхронного гибридного электродвигателя. // Сб. научных тр. - Красноярск: ГАЦМиЗ, 2001. Вып 7. С. 404 – 408.
6. Големгрейн В.В., Верхотуров А.И. Исследование вхождения в синхронизм синхронного гибридного двигателя.// Седьмая областная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современная техника и технологии»: Тез. докл. – Томск: ТПУ, 2001. Том 2. – С. 76 – 79.
7. Верхотуров А.И., Големгрейн В.В., Стукач В.С. Результаты экспериментальной оценки динамических свойств синхронного гибридного электродвигателя. // Материалы Международная научно-практическая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» – Томск: ТПУ, 2001. – С. 141.
8. Верхотуров А.И., Големгрейн В.В., Стукач В.С. Исследование пускового режима синхронного гибридного двигателя. // Материалы Международная научно-практическая конференция «Электромеханические преобразователи энергии» – Томск: ТПУ, 2001. – С. 140.