

На правах рукописи



ПЕТУХОВ АНАТОЛИЙ МИХАЙЛОВИЧ

**АВТОНОМНЫЙ ИСТОЧНИК
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА**

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2014

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» (ФГБОУ ВПО «КнАГТУ») на кафедре «Электромеханика».

Научный руководитель: **СЕРИКОВ Александр Владимирович**
доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Электромеханика»
ФГБОУ ВПО «КнАГТУ»

Официальные оппоненты: **БЕСПАЛОВ Виктор Яковлевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва),
профессор кафедры «Электромеханика»

КИНИЦА Олег Игоревич
кандидат технических наук,
заместитель начальника учебно-производственного комбината филиала ОАО «Авиационная холдинговая компания «Сухой» Комсомольского-на-Амуре авиационного завода имени Ю.А. Гагарина»

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Защита диссертации состоится «17» октября 2014 г. В 1000 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.04 в ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» по адресу: 681013, г.Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 201-3, e-mail: kem@knastu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru.

Автореферат разослан «__» августа 2014 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.092.04
кандидат технических наук, доцент



Суздорф В.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Области применения автономных источников переменного тока, преобразующих механическую энергию вращения, довольно широки. Энергия двигателей автомобильной техники, летательных аппаратов, водного транспорта частично преобразуется генераторами в электроэнергию для питания бортовой аппаратуры. Механическая энергия дизельных, бензиновых и др. электростанций полностью используется для вращения вала генератора, снабжающего электроэнергией различных потребителей. Несмотря на большое разнообразие используемых в настоящее время автономных источников переменного тока, не прекращается работа по поиску новых технических решений в этой области, поскольку существующие решения не в полной мере способны удовлетворить возрастающие требования потребителей. В связи с этим, получение стабильной и регулируемой частоты в автономных системах электропитания, работающих при переменных частотах вращения первичного двигателя, является актуальной задачей в электроснабжении.

Для получения переменного тока стабильной частоты в автономных источниках электропитания применяются устройства различного принципа действия. Одними из первых были разработаны автономные источники с использованием приводов постоянной скорости, от которых со временем отказались, так как они обладают низкими показателями быстродействия, надежности, являются громоздкими и сложными в изготовлении. В современных автономных источниках электроэнергии используются синхронные и коллекторные генераторы, но такие системы уже не в полной мере способны удовлетворить возрастающим требованиям потребителей. Отдельной ветвью развития автономных систем электроснабжения стабильной частоты являются машинно-вентильные системы. Ряд научных работ последнего десятилетия был посвящен разработке машинно-вентильных систем с предварительным формированием кривой напряжения в электромашинном генераторе и прямоугольным законом управления преобразователем частоты. Такие источники стабильной частоты имеют простую схему управления вентильным преобразователем, но электромашинная часть подобных устройств имеет усложненную конструкцию.

Целью работы является дальнейшее развитие теории, разработка, моделирование, создание и исследование бесконтактного автономного источника электроснабжения переменного тока.

Задачами исследования являются:

— анализ результатов известных исследований и технических решений автономных источников переменного тока стабильной частоты;

- разработка нового технического решения, теоретическое описание и создание математической модели электромашинной части;
- теоретические исследования разработанной математической модели;
- получение аналитических зависимостей амплитуд и фаз токов и электромагнитного момента электромашинной части автономного источника в установившемся режиме от параметров электрической машины, напряжения и частоты возбуждения, частоты вращения ротора и параметров нагрузки;
- создание опытного образца электромашинной части предлагаемого технического решения автономного источника;
- экспериментальные исследования опытного образца.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработано новое техническое решение по созданию трехфазного источника переменного тока стабильной частоты для автономных систем энергоснабжения, использующее последовательное электромеханическое преобразование энергии в разнополюсных электрических машинах с согласованными обмотками, позволяющее сформировать переменное напряжение стабильной частоты при переменной частоте вращения ротора бесконтактным методом без использования полупроводникового преобразователя на выходе системы;
- предложено теоретическое описание электротехнического комплекса на базе двух асинхронных машин совмещенных в общем магнитопроводе системой дифференциальных уравнений замкнутых контуров (далее – электротехнический комплекс), включающей в себя уравнения разнополюсных электрических машин и параметры нагрузки, позволяющей уменьшить количество уравнений в системе;
- получены аналитические зависимости амплитуд, фазовых сдвигов токов и электромагнитного момента электротехнического комплекса преобразованием описывающей его системы дифференциальных уравнений, которые позволяют исследовать установившиеся режимы его работы методами математического анализа.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- произведена модернизация существующей математической модели электрической машины в фазной системе координат с включением в нее уравнений всех обмоток электротехнического комплекса и параметров нагрузки, что обеспечивает получение новых результатов по теме диссертации;
- предложено новое техническое решение бесконтактного автономного источника электроснабжения переменного тока стабильной частоты;
- последовательное преобразование системы дифференциальных уравнений, разработанное автором для получения аналитических

зависимостей токов и электромагнитного момента электротехнического комплекса от параметров электрической машины, напряжения и частоты возбуждения, частоты вращения ротора и параметров нагрузки, может использоваться для любой электромеханической системы, описанной дифференциальными уравнениями;

— представлены рекомендации по выбору параметров обмоток, которые в совокупности с аналитическими выражениями для токов и электромагнитного момента позволяют провести теоретический поиск оптимального варианта построения электротехнического комплекса по выбранному критерию;

— создан и испытан опытный образец для проведения экспериментальных исследований режимов работы источника.

Методы исследования. Научные исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, основывались на применении методов теории электромеханического преобразования энергии, теории дифференциальных уравнений, матричного анализа. При решении задач исследования динамических режимов системы использовались методы численного моделирования, применяющиеся для моделирования процессов в пакете программ Matlab/Simulink. Экспериментальные исследования проводились на изготовленном автором опытном образце.

Положения, выносимые на защиту:

— новое техническое решение автономного источника электроснабжения переменного тока;

— математическая модель совмещенного двухмашинного генератора и ее реализация в пакете Simulink программы моделирования Matlab;

— результаты теоретических исследований совмещенного двухмашинного генератора;

— аналитические выражения для токов и электромагнитного момента совмещенного двухмашинного генератора;

— опытный образец совмещенного двухмашинного генератора;

— результаты экспериментальных исследований опытного образца.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность теоретических расчетов подтверждена экспериментальными исследованиями опытного образца. Основное содержание и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2010 г.); пятой международной научно-практической заочной конференции «Энергетика и энергоэффективные технологии» (г. Липецк, 2011 г.); 43-й научно-технической конференции аспирантов и студентов (г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.); Всероссийской научно-практической конференции «Электропривод транспорта и промышленности» (г. Хабаровск, 2013 г.).

Личный вклад заключается в разработке новой конструкции автономного источника электроснабжения переменного тока; создании математической модели разработанного электротехнического комплекса на базе двух совмещенных в общем магнитопроводе асинхронных машин; выводе аналитических выражений для амплитуд, фазовых сдвигов токов и электромагнитного момента электротехнического комплекса; разработке рекомендаций по выбору параметров обмоток для исключения взаимовлияния электрических машин при совмещении их в общем магнитопроводе; создании опытного образца электротехнического комплекса; исследовании модели и испытании опытного образца.

Публикации. По результатам исследований, отраженных в диссертации опубликовано восемь научных работ, в том числе три – в изданиях рекомендованных ВАК, получен патент на полезную модель.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 142 страницах машинописного текста, списка литературы из 62 наименований и приложения. В работе содержится 50 рисунков, 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследований; подчеркнута научная новизна работы; оценена теоретическая и практическая значимость результатов работы; указаны методы исследования; определены положения, выносимые на защиту; указана степень достоверности и апробация результатов.

В первой главе проведен анализ известных технических решений автономных источников переменного тока стабильной частоты и рассмотрены принципы их построения.

Определены преимущества автономных источников электроснабжения, использующих системы с переменной скоростью вращения генератора и постоянной выходной частотой (ПСПЧ) над системами с приводом постоянной скорости. Приведена классификация источников переменного тока с системой ПСПЧ по способам стабилизации частоты и анализ их достоинств и недостатков. Рассмотрены машинно-вентильные системы и их классификация по схемной реализации статического преобразователя частоты (СПЧ). Классифицируются и сравниваются генераторы, использующие для получения стабильной частоты электромашиное формирование кривой выходного напряжения.

Разработана конструкция автономного источника на основе двух симметричных асинхронных машин, совмещенных в общем магнитопроводе. Для обозначения комплекса введен термин:

совмещенный двухмашинный генератор (СДМГ). Предложена следующая структура источника (рис.1): электромашинная часть, устройство возбуждения и датчик частоты вращения.

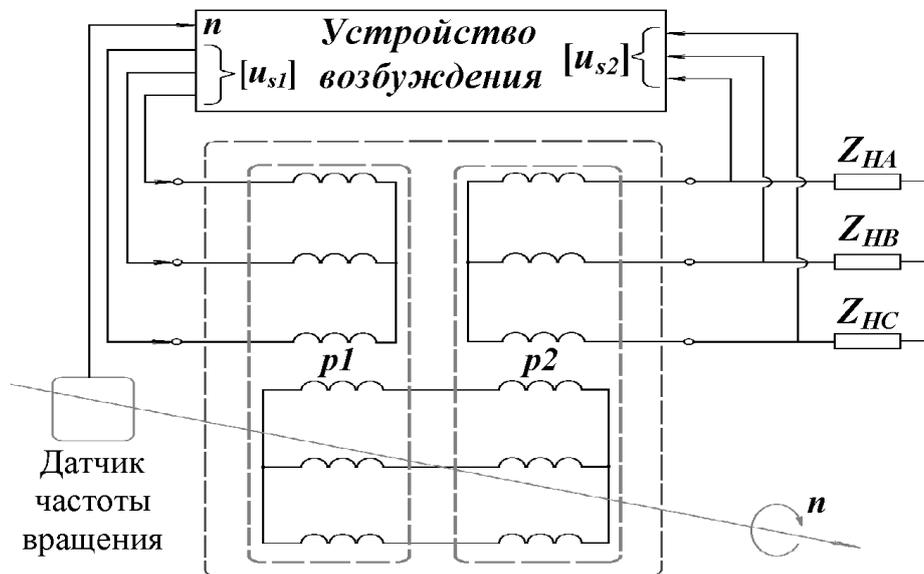


Рис. 1. Схема источника на базе совмещенного двухмашинного генератора.

Обмотки электрических машин различаются количеством пар полюсов и выполняются таким образом, что взаимовлияние электрических машин исключается. Стабильность частоты на выходе генератора достигается подстройкой частоты напряжения на выходе устройства возбуждения при изменении частоты вращения вала приводного двигателя.

Достоинствами автономного источника на базе СДМГ при такой конструкции являются:

- отсутствие каких-либо дополнительных устройств между генератором и нагрузкой;
- возможность изменения частоты и амплитуды выходного напряжения в широких пределах;
- простота конструкции, отсутствие скользящих контактов.

Во второй главе выполнено математическое описание СДМГ как электротехнического комплекса на базе двух асинхронных машин совмещенных в общем магнитопроводе системой дифференциальных уравнений замкнутых контуров, а также построены и исследованы модели в программном комплексе Matlab.

Система уравнений выполнена на основе математической модели электрической машины в фазных координатах. Для проведения расчетов СДМГ представлен в виде системы контуров, включающих в себя нагрузку генератора (рис. 2).

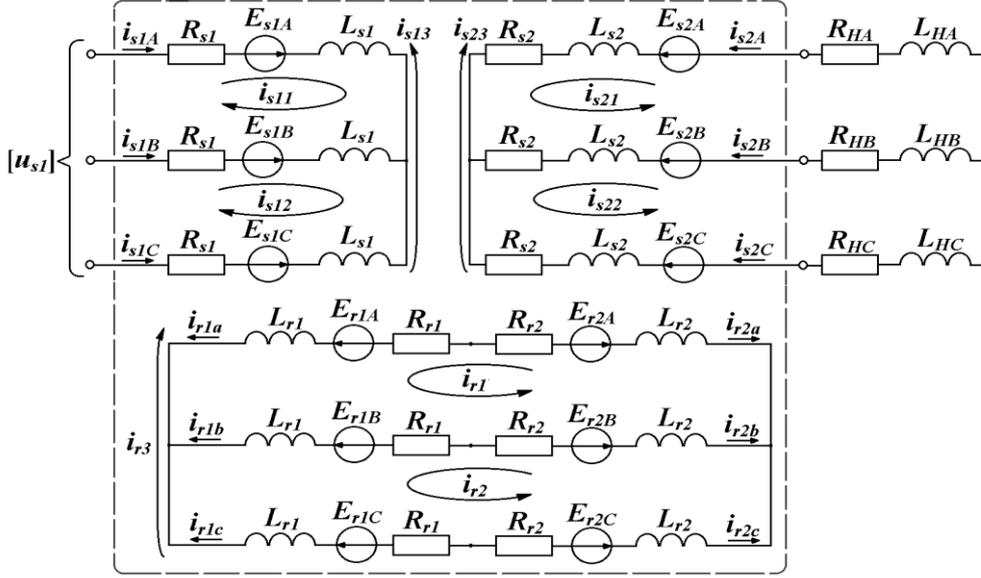


Рис.2. Схема электрических цепей СДМГ:

$E_{njk} = d\Psi_{njk}/dt$ – ЭДС фазы; Ψ_{njk} , i_{njk} , R_{nj} – потокосцепление, ток и сопротивление фазы; i_{gm} – контурные токи; R_{Hk} , L_{Hk} – параметры нагрузки; L_{nj} – индуктивность фазы; $n = s, r$; $j = 1, 2$; $k = A, B, C, a, b, c$; $g = 1, 2, 3$; $m = 1, 2, 3$

После преобразований получена система дифференциальных уравнений электромагнитных контуров СДМГ в матричном виде:

$$[u] = [L] \frac{d}{dt} [i] + [Z][i] \quad (1)$$

В системе уравнений (1) приняты обозначения:

$$[L] = \begin{bmatrix} L_{s1}[X] & [0]_{3 \times 3} & 3L_{msr1}[Q_1(\Theta_1, \Delta_1)] \\ [0]_{3 \times 3} & [L_{S2H}] & -3L_{msr2}[Q_1(\Theta_2, \Delta_2)] \\ 3L_{msr1}[Q_2(\Theta_1, \Delta_1)] & -3L_{msr2}[Q_2(\Theta_2, \Delta_2)] & L_r[X] \end{bmatrix},$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} R_{s1}[X] & [0]_{3 \times 3} & -3p_1\omega_r L_{msr1}[Q'_1(\Theta_1, \Delta_1)] \\ [0]_{3 \times 3} & [R_{S2H}] & 3p_2\omega_r L_{msr2}[Q'_1(\Theta_2, \Delta_2)] \\ -3p_1\omega_r L_{msr1}[Q'_2(\Theta_1, \Delta_1)] & 3p_2\omega_r L_{msr2}[Q'_2(\Theta_2, \Delta_2)] & R_r[X] \end{bmatrix}$$

$$[X] = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}, [Q_{1,2}] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta \pm \Delta) & \cos(\theta \mp \Delta) \\ \cos(\theta \mp \Delta) & \cos \theta & \cos(\theta \pm \Delta) \\ \cos(\theta \pm \Delta) & \cos(\theta \mp \Delta) & \cos \theta \end{bmatrix},$$

$$[Q'_{1,2}] = \begin{bmatrix} \sin \theta & \sin(\theta \pm \Delta) & \sin(\theta \mp \Delta) \\ \sin(\theta \mp \Delta) & \sin \theta & \sin(\theta \pm \Delta) \\ \sin(\theta \pm \Delta) & \sin(\theta \mp \Delta) & \sin \theta \end{bmatrix}, L_r = l_{r1} + \frac{3}{2}L_{mr1} + l_{r2} + \frac{3}{2}L_{mr2},$$

$$L_{s1} = l_{s1} + \frac{3}{2}L_{ms1},$$

$$L_{SHA} = l_{s2} + \frac{3}{2}L_{ms2} + L_{HA}, L_{SHB} = l_{s2} + \frac{3}{2}L_{ms2} + L_{HB}, L_{SHC} = l_{s2} + \frac{3}{2}L_{ms2} + L_{HC},$$

$$\begin{aligned}
R_r &= R_{r1} + R_{r2}, \quad R_{SHA} = R_{s2} + R_{HA}, \quad R_{SHB} = R_{s2} + R_{HB}, \quad R_{SHC} = R_{s2} + R_{HC}, \\
[R_{S2H}] &= \begin{bmatrix} 2R_{SHA} & -R_{SHB} & -R_{SHA} \\ -R_{SHB} & 2R_{SHB} & -R_{SHC} \\ -R_{SHA} & -R_{SHC} & 2R_{SHC} \end{bmatrix}, \quad [L_{S2H}] = \begin{bmatrix} 2L_{SHA} & -L_{SHB} & -L_{SHA} \\ -L_{SHB} & 2L_{SHB} & -L_{SHC} \\ -L_{SHA} & -L_{SHC} & 2L_{SHC} \end{bmatrix}, \quad [i] = \begin{bmatrix} [i_{S1}] \\ [i_{S2}] \\ [i_R] \end{bmatrix}, \\
[u] &= \begin{bmatrix} [u_{s1}] \\ [0]_{1 \times 3} \\ [0]_{1 \times 3} \end{bmatrix}, \quad [i_{S1}] = \begin{bmatrix} i_{s11} \\ i_{s12} \\ i_{s13} \end{bmatrix}, \quad [i_{S2}] = \begin{bmatrix} i_{s21} \\ i_{s22} \\ i_{s23} \end{bmatrix}, \quad [i_R] = \begin{bmatrix} i_{r1} \\ i_{r2} \\ i_{r3} \end{bmatrix}, \quad [u_{S1}] = \begin{bmatrix} u_{AB} \\ u_{BC} \\ u_{CA} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_{S1}] = \begin{bmatrix} \Psi_{s11} \\ \Psi_{s12} \\ \Psi_{s13} \end{bmatrix}, \\
[\Psi_{S2}] &= \begin{bmatrix} \Psi_{s21} \\ \Psi_{s22} \\ \Psi_{s23} \end{bmatrix}, \quad [\Psi_R] = \begin{bmatrix} \Psi_{r1} \\ \Psi_{r2} \\ \Psi_{r3} \end{bmatrix}.
\end{aligned}$$

где $[0]$ – матрица с нулевыми элементами; $l_{s1}, l_{r1}, l_{s2}, l_{r2}$ – собственные индуктивности фазы статора и фазы ротора первой и второй машины соответственно; R_{s1}, R_{r1} – сопротивления фаз симметричной обмотки статора и ротора первой машины; R_{HA}, R_{HB}, R_{HC} – активные сопротивления фаз нагрузки генератора; $L_{ms1}, L_{mr1}, L_{ms2}, L_{mr2}$ – взаимные индуктивности между фазами статора и ротора соответственно, Δ – электрический угол между осями симметрии фазных обмоток; L_{HA}, L_{HB}, L_{HC} – индуктивности фаз нагрузки генератора, R_{s2}, R_{r2} – сопротивления фаз симметричной обмотки статора и ротора второй машины; θ – электрический угол поворота ротора: $\theta = \theta_0 + p \int_0^t \omega(t) dt$; θ_0 – начальный угол между осями обмоток, при расчетах принят равным нулю; p – количество пар полюсов электрической машины; $\omega(t)$ – функция угловой скорости ротора от времени, для установившегося режима $\omega(t) = \omega = \text{const}$ и $\theta = \theta_0 + p\omega t$.

Система дифференциальных уравнений (1) приведена к нормальному виду Коши. Для матрицы $[L]$ найдена обратная матрица $[L]^{-1}$. После преобразований получена система дифференциальных уравнений электромагнитных контуров СДМГ в нормальной форме Коши:

$$\frac{d}{dt}[i] = [L]^{-1}[u] - [L]^{-1}[Z][i] \quad (2)$$

Выражение, описывающее движение ротора:

$$J \frac{d\omega}{dt} - M_c = 3 \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}_T \begin{bmatrix} [0] & [0] & -p_1 L_{m1} [Q'_1(\theta_1, \Delta_1)] \\ [0] & [0] & p_2 L_{m2} [Q'_1(\theta_2, \Delta_2)] \\ -p_1 L_{m1} [Q'_2(\theta_1, \Delta_1)] & p_2 L_{m2} [Q'_2(\theta_2, \Delta_2)] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_{s1}] \\ [i_{s2}] \\ [i_r] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где J – момент инерции ротора, M_c – момент приводного двигателя.

Учет особенностей конструктивного исполнения обмоток в теоретическом описании с помощью рассматриваемой общей модели СДМГ осуществлен изменением знака перед константой Δ , которая

обозначает угловое расстояние между фазными осями одной обмотки. В табл. 1 приведены соответствия значений углов Δ_1 и Δ_2 для первой и второй машины выражениям частот токов ротора и нагрузки. Модель СДМГ реализована в Simulink – подсистеме моделирования динамических процессов среды MatLAB.

Таблица 1

Частотные зависимости СДМГ различных типов

Тип СДМГ	Углы между осями фаз		Частота основной гармоники	
	Δ_1	Δ_2	Ротор	Нагрузка
1	$2\pi/3$	$2\pi/3$	$f_r=f_o+p_1n$	$f_H=(p_2-p_1)n-f_o$
2	$2\pi/3$	$-2\pi/3$	$f_r=f_o+p_1n$	$f_H=(p_2+p_1)n+f_o$
3	$-2\pi/3$	$-2\pi/3$	$f_r=f_o-p_1n$	$f_H=(p_2-p_1)n+f_o$
4	$-2\pi/3$	$2\pi/3$	$f_r=f_o-p_1n$	$f_H=(p_2+p_1)n-f_o$

Определены способы поддержания постоянной частоты на выходе СДМГ:

– уменьшение (увеличение) частоты на обмотке возбуждения вслед за увеличением (уменьшением) частоты вращения ротора. Применяется для СДМГ: первого типа при $p_1 > p_2$, второго и третьего типа при $p_1 < p_2$;

– увеличение (уменьшение) частоты на обмотке возбуждения при увеличении (уменьшении) частоты вращения ротора. Применяется для СДМГ: первого типа при $p_1 < p_2$, третьего типа при $p_1 > p_2$; четвертого типа.

С использованием указанных выше способов регулирования, при поддержании стабильной частоты на нагрузке, проведены исследования происходящих в СДМГ процессов с использованием Simulink-модели. На рис. 3 представлены процессы на выходе СДМГ при увеличении нагрузки.

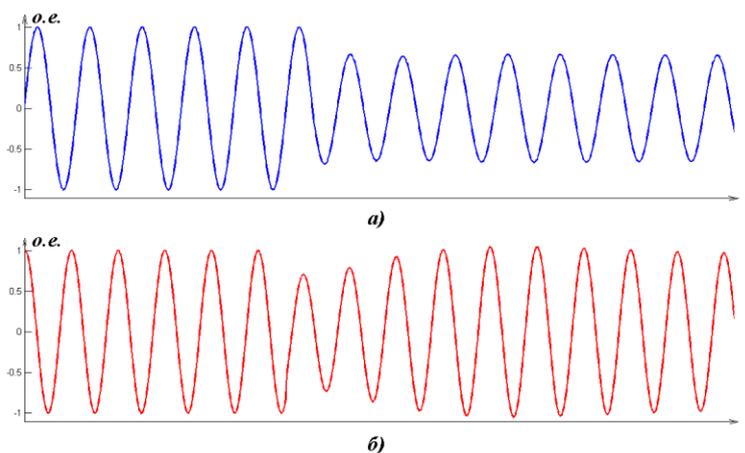


Рис.3. Процессы на выходе СДМГ: а) без регулирования, б) с регулированием

На рис.4 пунктирной линией представлены характеристики, полученные при исследовании модели:

– Внешняя характеристика (рис. 4,а) – зависимость выходного на-

пряжения от тока нагрузки при неизменном напряжении возбуждения, фиксированной частоте выходного напряжения и постоянном коэффициенте мощности;

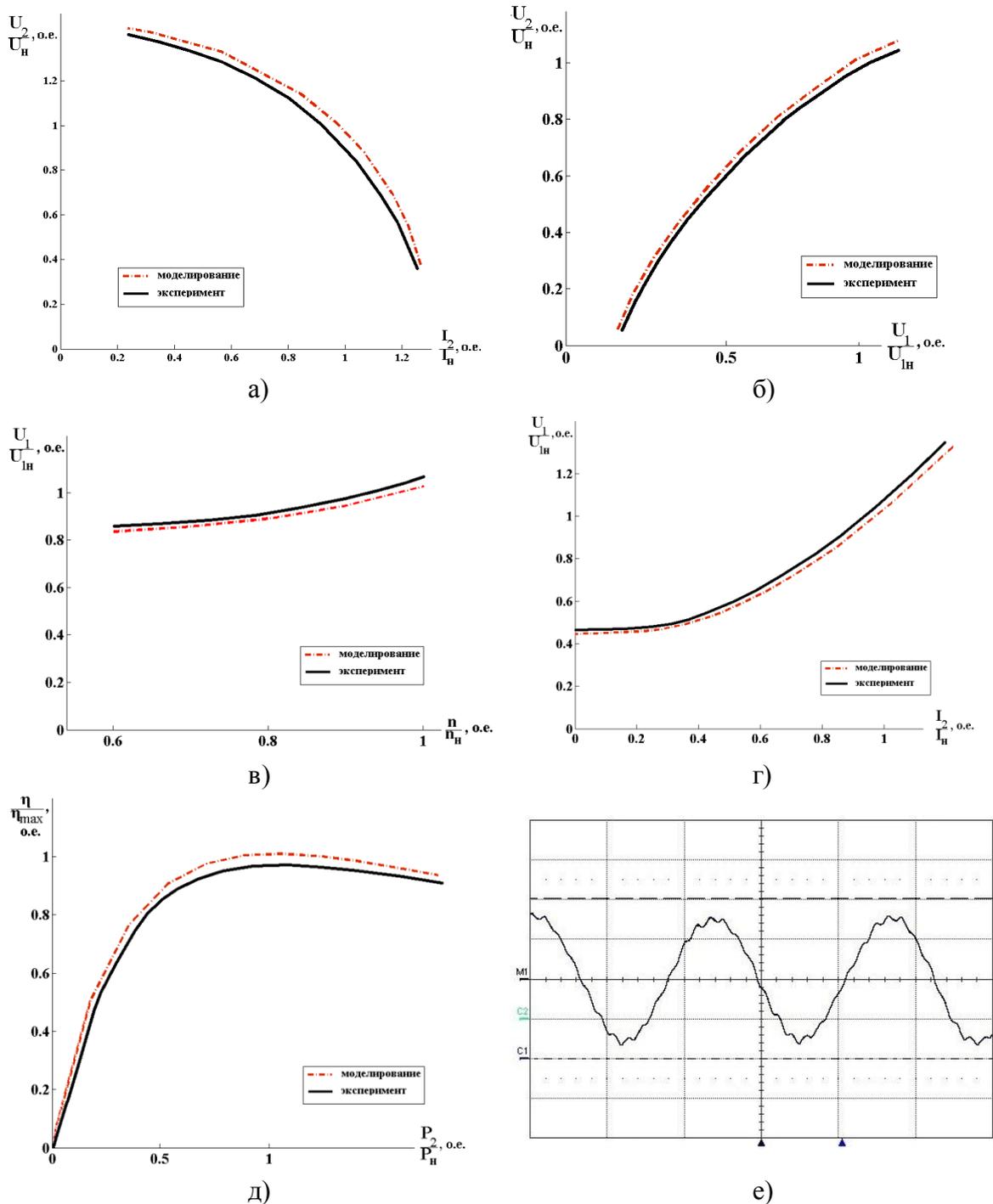


Рис.4. Результаты моделирования и исследования опытного образца:

а) внешняя характеристика (при $U_1=\text{const}$, $f_H=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$), б) нагрузочная характеристика (при $I_H=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$), в) регулировочная характеристика по частоте (при $U_2=\text{const}$, $f_H=\text{const}$, $\cos \varphi =\text{const}$), г) регулировочная характеристика (при $U_2=\text{const}$, $f_H=\text{const}$), д) зависимость КПД от мощности, е) график напряжения на нагрузке с экрана цифрового осциллографа LeCroy WS 432

– Нагрузочная характеристика (рис. 4,б) – зависимость напряжения генератора от напряжения возбуждения при условии постоянства тока нагрузки и коэффициента мощности;

– Регулировочная характеристика (рис. 4,в) – зависимость напряжения возбуждения от нагрузки при неизменном выходном напряжении;

– Регулировочная характеристика по частоте (рис. 4,г) – зависимость напряжения возбуждения генератора от частоты вращения ротора напряжение при неизменном выходном напряжении, постоянном коэффициенте мощности и фиксированной выходной частоте.

Кроме того, получена зависимость коэффициента полезного действия системы от мощности нагрузки (рис. 4,д).

В третьей главе исследовано влияние параметров обмоток электрических машин на энергетические соотношения в СДМГ для установившегося режима.

Энергетические соотношения в СДМГ исследованы с помощью программы, составленной в Matlab. Программа в процессе своей работы последовательно перебирает количество витков в катушках обмоток входящих в состав СДМГ электрических машин, изменяя их значения от минимального до максимально выбранного с установленным шагом. При этом для иллюстрации промежуточного результата работы предусмотрено построение поверхности выходной мощности, как функции от количества витков двух обмоток при фиксированных остальных. Максимум поверхности указывает на наилучшее сочетание параметров обмоток.

Для расширения возможностей исследования влияния параметров электрических машин на энергетические соотношения выведены аналитические зависимости фазных токов. Для получения аналитических выражений использовалась система (2). В матрицы токов и напряжений подставлены выражения, определяющие их изменения во времени. Принято, что нагрузка на выходе электротехнического комплекса симметричная. Система (2) приведена к виду:

$$[U] = \sqrt{3} \begin{bmatrix} R_{s1} & 2\pi f_0 L_{s1} & 0 & 0 & 0 & 3\pi f_0 L_{m1} \\ 2\pi f_0 L_{s1} & -R_{s1} & 0 & 0 & 3\pi f_0 L_{m1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{2H} & 2\pi f_H L_{2H} & 0 & -3\pi f_H L_{m2} \\ 0 & 0 & 2\pi f_H L_{2H} & -R_{2H} & -3\pi f_H L_{m2} & 0 \\ 0 & 3\pi f_r L_{m1} & 0 & -3\pi f_r L_{m2} & R_r & 2\pi f_r L_r \\ 3\pi f_r L_{m1} & 0 & -3\pi f_r L_{m2} & 0 & 2\pi f_r L_r & -R_r \end{bmatrix} [I_p],$$

где f_0 , f_H , f_r – частота тока в обмотках статора первой машины, статора второй машины и ротора, соответственно.

$$[U] = [U1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]_r, \quad [I_p] = [I_{1c} \ I_{1s} \ I_{2c} \ I_{2s} \ I_{rc} \ I_{rs}]_r, \quad I_{1c} = I_1 \cos(\varphi_1), \quad (4)$$

$$I_{2c} = I_2 \cos(\varphi_2), \quad I_{rc} = I_r \cos(\varphi_r), \quad I_{1s} = I_1 \sin(\varphi_1), \quad I_{2s} = I_2 \sin(\varphi_2), \quad I_{rs} = I_r \sin(\varphi_r).$$

Результатом решения является матрица-столбец I_p , в которой содержатся элементы в соответствии с (4). Для нахождения амплитуд

ТОКОВ И ФАЗОВЫХ СДВИГОВ ИСПОЛЬЗОВАЛИСЬ ВЫРАЖЕНИЯ:

$$I_1 = \sqrt{I_{1C}^2 + I_{1S}^2} = \sqrt{I_1^2 \cos^2(\varphi_1) + I_1^2 \sin^2(\varphi_1)} = I_1 \sqrt{\cos^2(\varphi_1) + \sin^2(\varphi_1)} = I_1, \quad I_2 = \sqrt{I_{2C}^2 + I_{2S}^2}, \quad I_r = \sqrt{I_{rC}^2 + I_{rS}^2},$$

$$\varphi_1 = \arctg\left(\frac{I_{1S}}{I_{1C}}\right) = \arctg\left(\frac{I_1 \sin(\varphi_1)}{I_1 \cos(\varphi_1)}\right) = \arctg(\operatorname{tg}(\varphi_1)) = \varphi_1, \quad \varphi_2 = \arctg\left(\frac{I_{2S}}{I_{2C}}\right), \quad \varphi_r = \arctg\left(\frac{I_{rS}}{I_{rC}}\right).$$

Аналитическое выражение для электромагнитного момента системы:

$$M_{em} = \frac{3}{2} (L_{m2} p_2 (I_{2S} I_{rC} - I_{2C} I_{rS}) - L_{m1} p_1 (I_{1C} I_{rS} - I_{1S} I_{rC})).$$

После выполнения преобразований получены выражения:

$$I_1 = \frac{U_1}{\sqrt{3}\Lambda} \sqrt{\left((9\pi^2 f_r f_H L_{m2}^2 + R_{2H} R_r)^2 + 4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 R_r^2 + 4\pi^2 f_r^2 L_r^2 R_{2H}^2 + 8\pi^4 f_H^2 f_r^2 (2L_{2H}^2 L_r^2 - 9L_{m2}^2 L_{2H} L_r) \right)},$$

$$I_H = 3U_1 \pi^2 f_H f_r L_{m1} L_{m2} \sqrt{\frac{3}{\Lambda}}, \quad I_r = U_1 \pi f_r L_{m1} \sqrt{\frac{3}{\Lambda}} \sqrt{4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2},$$

$$\Lambda = (4\pi^2 L_{s1}^2 f_o^2 + R_{s1}^2) \left(\pi^4 f_H^2 f_r^2 (9L_{m2}^2 - 4L_{2H} L_r)^2 + 4\pi^2 f_r^2 L_r^2 R_{2H}^2 + 18\pi^2 f_r f_H L_{m2}^2 R_{2H} R_r \right) +$$

$$+ (4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2) \left((9\pi^2 f_r f_o L_{m1}^2 + R_{s1} R_r)^2 + 4\pi^2 f_o^2 (L_{s1}^2 R_r^2 - 18\pi^2 f_r^2 L_{m1}^2 L_{s1} L_r) \right) +$$

$$+ 162 L_{m1}^2 L_{m2}^2 \pi^4 f_H f_o f_r^2 (R_{2H} R_{s1} + 4\pi^2 f_o f_H L_{2H} L_{s1}),$$

$$\varphi_1 = \arctg \frac{\left((4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2) (4\pi^2 f_r^2 L_r^2 R_{s1} + R_r^2 R_{s1} + 9\pi^2 f_o f_r R_r L_{m1}^2) - \right.}{\left. - 9\pi^2 f_H f_r L_{m2} R_{s1} (3\pi (f_o R_{2H} L_{m1}^2 + f_H R_{s1} L_{m2}^2) - 2L_{m2} (R_{2H} R_r - 4\pi^2 f_H f_r L_{2H} L_r)) \right)}{2\pi f_o \left((4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2) (4\pi^2 f_r^2 L_r^2 L_{s1} + R_r^2 L_{s1} - 9\pi^2 f_r^2 L_r L_{m1}^2) + \right.},$$

$$\left. + 9\pi^2 f_H f_r L_{m2}^2 (9\pi^2 f_H f_r (L_{2H} L_{m1}^2 + L_{s1} L_{m2}^2) - 2L_{s1} (R_{2H} R_r + 4\pi^2 f_H f_r L_{2H} L_r)) \right)},$$

$$\varphi_H = \arctg \frac{\pi^2 f_H f_r R_{s1} (9L_{m2}^2 - 4L_{2H} L_r) + \pi^2 f_o f_r R_{2H} (9L_{m1}^2 - 4L_{s1} L_r) - 4\pi^2 f_o f_H L_{2H} L_{s1} R_r + R_{2H} R_{s1} R_r}{2\pi (\pi^2 f_o f_r f_H (9L_{2H} L_{m1}^2 + 9L_{s1} L_{m2}^2 - 4L_{2H} L_{s1} L_r) + f_o L_{s1} R_{2H} R_r + f_r L_r R_{2H} R_{s1} + f_H L_{2H} R_{s1} R_r)},$$

$$\varphi_r = \arctg \frac{18\pi^3 f_H f_r L_{m2}^2 (f_H L_{2H} R_{s1} - f_o L_{s1} R_{2H}) - 2\pi (4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2) (f_o L_{s1} R_r + f_r L_r R_{s1})}{9\pi^2 f_H f_r L_{m2}^2 (R_{2H} R_{s1} + 4\pi^2 f_H f_o L_{2H} L_{s1}) + (4\pi^2 f_H^2 L_{2H}^2 + R_{2H}^2) (\pi^2 f_o f_r (9L_{m1}^2 - 4L_{s1} L_r) + R_{s1} R_r)},$$

$$M = \frac{3U_1^2 L_{m1}^2 (9\pi^3 f_r^2 f_H L_{m2}^2 R_{2H} (p_2 - p_1) - p_1 \pi f_r R_r (4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2))}{\left(\begin{aligned} & 9\pi^2 f_r f_H L_{m2}^2 (4\pi^2 L_{s1}^2 f_o^2 + R_{s1}^2) (36\pi^2 f_r f_H L_{m2}^2 - 32\pi^2 f_r f_H L_{2H} L_r + 8R_{2H} R_r) + \\ & + (4\pi^2 L_{2H}^2 f_H^2 + R_{2H}^2) \left((18\pi^2 f_r f_o L_{m1}^2 + 2R_{s1} R_r - 8\pi^2 f_r f_o L_{s1} L_r)^2 + (4\pi f_o L_{s1} R_r + 4\pi f_r L_r R_{s1})^2 \right) + \\ & + 648\pi^4 f_r^2 f_o f_H L_{m2}^2 L_{m1}^2 (R_{2H} R_{s1} + 4\pi^2 f_o f_H L_{2H} L_{s1}) \end{aligned} \right)},$$

где $L_{2H} = L_{SHA} = L_{SHB} = L_{SHC} = l_{s2} + 1.5L_{ms2} + L_H$, $R_{2H} = R_{SHA} = R_{SHB} = R_{SHC} = R_{s2} + R_H$.

Результаты исследования энергетических соотношений аналитическими выражениями и результаты, полученные с помощью модели в Simulink, приведены на рис. 5. Сравнение результатов (рис. 5, а и 5, б) позволило сделать вывод о том, что поверхности, приведенные на них, являются в пределах допустимых погрешностей одинаковыми. Следовательно, исследование процессов в установившемся режиме возможно не только при помощи модели системы, но и при помощи аналитических выражений.

При этом отмечается, что при использовании аналитического метода время выполнения заданного объема вычислений значительно меньше, чем при использовании для вычислений представленной выше модели.

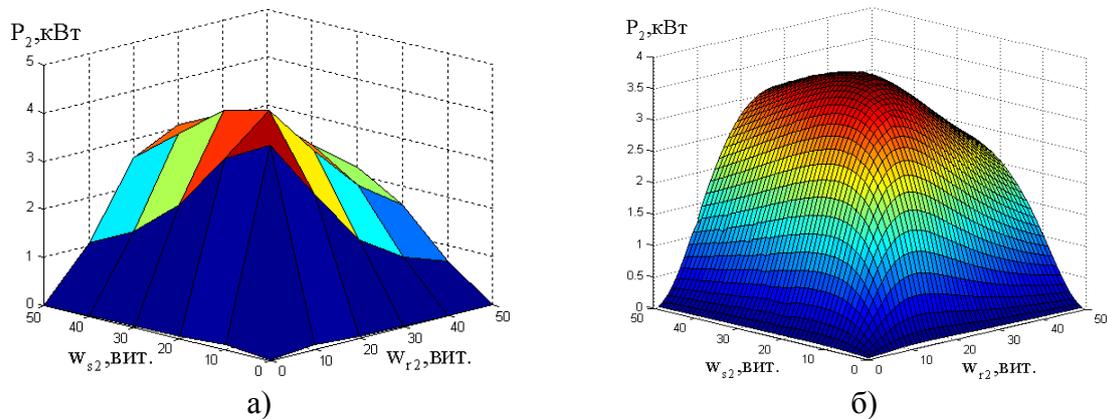


Рис.5. Исследование энергетических соотношений: а) результаты, полученные с помощью модели, б) результаты, полученные с помощью аналитических выражений.

В четвёртой главе приведены рекомендации по формированию обмоток, совмещенных в общем магнитопроводе, описаны опытный образец СДМГ, экспериментальная установка (рис.6), представлены результаты экспериментальных исследований.



Рис.6. Экспериментальная установка: а) СДМГ на платформе с приводным двигателем, б) универсальный стенд с измерительными приборами.

Измерения, полученные в процессе экспериментов, подтвердили правильность теоретических расчетов. Величина расхождений менее 5 %. Для удобства сопоставления результатов, в общих нормированных координатных осях (см. рис.4) приведены графики теоретических (пунктирной линией) и экспериментальных аппроксимированных зависимостей (сплошной линией). В результате исследований подтверждено, что на нагрузке получается напряжение синусоидальной формы (рис. 4, е), частота которого зависит от частоты напряжения возбуждения и частоты вращения вала.

Основные выводы и рекомендации.

1. В результате анализа известных технических решений установлено, что автономные источники переменного тока стабильной частоты на базе СДМГ свободны от многих недостатков, присущих известным в настоящее время схемам построения автономных источников электроснабжения переменного тока. Достоинствами нового технического решения автономного источника на базе СДМГ являются: отсутствие дополнительных устройств между генератором и нагрузкой; возможность изменения частоты и амплитуды выходного напряжения в широких пределах; простота конструкции, отсутствие скользящих контактов.

2. Разработана математическая модель СДМГ в дифференциальных уравнениях. Определены особенности математического описания различных типов СДМГ, классификация которых основывается на схеме подключения обмоток и направлениях вращения магнитного поля и ротора. На основании полученных выражений, в пакете Simulink реализована модель СДМГ.

3. Проведены теоретические исследования разработанной математической модели, в результате которых определены характеристики: внешняя, нагрузочная, регулировочная, регулировочная по частоте; получена зависимость КПД от мощности. Изучены режимы, особенности работы и энергетические соотношения генератора.

4. Выведены аналитические зависимости для амплитуд и фаз токов обмоток и электромагнитного момента СДМГ в установившемся режиме работы от параметров электрической машины, напряжения и частоты возбуждения, частоты вращения ротора и параметров нагрузки. Полученные выражения позволяют исследовать процессы в СДМГ методами математического анализа.

5. Выработаны рекомендации по совмещению обмоток в магнитопроводе электротехнического комплекса, с использованием которых создан опытный образец СДМГ.

6. Для проведения экспериментов с опытным образцом СДМГ создан универсальный стенд, исследованы процессы, происходящие в электротехническом комплексе, определены его основные характеристики.

7. Проведены экспериментальные исследования процессов в СДМГ. Характеристики, построенные по итогам исследования опытного образца, подтверждают результаты моделирования. Погрешности полученных экспериментальным путем характеристик имеют отклонения от теоретических не более 5%, что позволяет сделать вывод о согласованности результатов экспериментальных исследований с теоретическими положениями; а это, в свою очередь, свидетельствует об адекватности разработанной математической модели СДМГ.

Список основных работ, опубликованных по теме диссертации

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК

1 Петухов, А.М. Расчет параметров совмещенного электромашинного генератора автономного источника электропитания переменного тока / А.М. Петухов, В.М. Кузьмин, И.Н. Дубровский // Ученые записки КнАГТУ. – 2011. – №III-1(7). – С.21.

2 Петухов, А.М. Особенности формирования магнитного поля воздушного зазора и ЭДС фаз совмещенного электромашинного генератора/ А.М. Петухов, В.М. Кузьмин, И.Н. Дубровский // Ученые записки КнАГТУ. – 2013. – №1(13). – С.12.

3 Петухов, А.М. Математическая модель совмещенного электромашинного генератора/ А.М. Петухов, В.М. Кузьмин, Кузьмин, Р.В., И.Н. Дубровский // Электротехника. – 2013. – №5. – С.45.

Статьи в российских изданиях; материалы международных и региональных конференций

4 Петухов, А.М. Автономный источник электропитания переменного тока стабильной частоты/ А.М. Петухов// Материалы международной НТК «Электротехнические комплексы и системы». – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КнАГТУ». – 2010. – С.229.

5 Петухов, А.М. Определение зависимости амплитуды и частоты ЭДС фаз выходных обмоток совмещенного электромашинного генератора от частот возбуждения и вращения ротора/ А.М. Петухов, В.М. Кузьмин// Сборник докладов V международной научно – практической заочной конференции «Электротехника и энергоэффективные технологии». – Липецк: «ЛГТУ», 2012. – С.70.

6 Петухов, А.М. Режимы работы электрических машин в совмещенном генераторе/ А.М. Петухов, А.В. Сериков// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – С.208.

7 Петухов, А.М. Возможности совмещения электрических машин в общем магнитопроводе/ А.М. Петухов, А.В. Сериков// Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: часть 2. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – С.211.

8 Петухов, А.М. Использование магнитного совмещения электрических машин для генерации электрической энергии/ А.М. Петухов, А.В. Сериков// Электропривод на транспорте и в промышленности: труды Всероссийской научно – практической конференции. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2013. – С.128.

9 Патент на полезную модель № 129719 (Россия). Совмещенный электромашинный генератор /Петухов А.М. – Оpubл. в Б. И., 27.06.2013.