

На правах рукописи

РАХМАНОВА Юлия Владиславовна

**РЕЗОНАНСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

Специальность: 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы

Автореферат

диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Уфа 2006

Работа выполнена на кафедре электромеханики
Уфимского государственного авиационного технического университета

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Рогинская Любовь Эммануиловна

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Гизатуллин Фарит Абдулганеевич
кандидат технических наук, доцент
Мухортова Елена Ивановна

Ведущая организация: **УНПП «Молния»**

Защита диссертации состоится 27 декабря 2006г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 в Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу:
450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «13» ноября 2006 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., проф

Г. Н. Утляков

РАХМАНОВА Юлия Владиславовна

**РЕЗОНАНСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОРНО-ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ
КОМПЛЕКС ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ**

Специальность: 05.09.03 Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ЛР № 020258 от 08.01.98

Подписано в печать 09.11.2006. Формат 60 84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр. – отт. 1,0. Уч. – изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ №564

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический
университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа – центр, ул. К. Маркса, 12

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Одним из перспективных направлений в области электротехнологии является разработка устройств и установок, в которых используется преобразование параметров электрической энергии. Мощность импульсов потребляемой электрической энергии достигает весьма больших значений, превышающих во много раз установленную мощность автономных источников. К такому направлению можно отнести зарядные устройства и установки, которые потребляют энергию в виде кратковременных импульсов, а так же установки для индукционного нагрева, использующие токи высокой частоты. Важнейшей составной частью таких электротехнологических комплексов является высокочастотный, высоковольтный индуктивный модуль совместно с полупроводниковым преобразователем частоты.

Главной задачей проектирования и эксплуатации, резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов повышенной частоты с высоковольтным выходом, является правильный выбор параметров каждого элемента схемы и оптимальное согласование режимов работы преобразователя и нелинейной нагрузки.

Отмечено, что в научно-технической литературе уровень технической проработки вопросов исследования резонансных высоковольтных высокочастотных источников питания с индуктивными модулями не достаточно широк. Хотя вопросы, связанные с проектированием такого рода устройств, глубоко рассмотрены в трудах, монографиях и статьях таких ученых, как В. А. Кныш, Д. А. Бут, О. Г. Булатов, А. С. Васильев, Ю. М. Гусев, Л. Э. Рогинская, Ю. И. Болотовский, а в НПП «Вихрь» (г. Уфа) и ВНИИ ТВЧ им. Вологодина (г. Санкт-Петербург) разрабатываются аналогичные комплексы.

Существует ряд задач, которые являются актуальными, это например: определение рациональной структуры высокочастотного преобразователя с повышенным коэффициентом трансформации по напряжению, регулирование и стабилизация напряжения в тиристорных преобразователях, проектирование и расчет специальных высоковольтных высокочастотных трансформаторов.

Специфика решения этих вопросов такова, что требует применения современной компьютерной техники, специально разработанных программных продуктов, позволяющих наиболее точно, быстро и эффективно моделировать и изучать процессы в резонансных полупроводниковых преобразователях.

Таким образом, разработка и проектирование резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов повышенной частоты для электротехнологии являются актуальными, особенно с расширением областей их применения.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов на основе

решения задач по их исследованию и моделирования их электромагнитных процессов.

Для реализации данной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследование возможных схем построения, определение наиболее рациональных структур применительно к резонансным трансформаторно-полупроводниковым комплексам, требующим согласования выходных параметров с параметрами нагрузки.

2. Разработка математических моделей для исследования резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов с каскадным повышением напряжения и учетом реальных электрических и магнитных параметров индуктивных модулей.

3. Исследование и оптимизация параметров высокочастотных источников питания.

4. Уточнение методики расчета специальных трансформаторов на основе учета дополнительных факторов и экспериментальное исследование резонансного трансформаторно-полупроводникового комплекса.

Методы исследований. Перечисленные задачи решены с помощью численно–аналитических и численных методов решения сложных нелинейных дифференциальных уравнений электрических систем, с помощью программирования на языках *Delphi 7* и *PSpice*, и имитационного моделирования в средах *OrCad 9.2* и *MatLab 6.5*.

На защиту выносятся:

1. Обоснование целесообразности применения различных структур электротехнологических комплексов повышенной частоты с коэффициентом усиления по напряжению до 10^4 .

2. Модели полупроводниковых преобразователей частоты для электротехнологии с согласующим трансформатором и измерительным индуктивным модулем с учетом нелинейного характера нагрузки.

3. Результаты, полученные в ходе имитационного моделирования резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов.

4. Методика расчета и проектирования индуктивных модулей для полупроводниковых преобразователей частоты с учетом реальных электрических и магнитных параметров.

Научная новизна:

1. Доказано, что для получения коэффициента усиления по напряжению до 10^4 , наиболее рационально произвести каскадное соединение резонансного инвертора и высоковольтного высокочастотного трансформатора.

2. Показана эффективность применения индуктивно-емкостных преобразователей в качестве реактивных блоков трансформаторных преобразователей частоты с высоковольтным выходом, обладающих, вследствие резонансных явлений, по сравнению с другими схемами максимального увеличения напряжения, минимальным значением

напряжения на транзисторах и возможностью уменьшения коэффициента трансформации трансформатора.

3. Создан оригинальный источник питания для индукционного нагрева со стабилизированным выходным напряжением, отличающийся от аналогичных устройств повышенными технико-экономическими показателями.

4. Разработана методика расчета и оптимизации индуктивных модулей резонансных источников питания, отличающаяся от других методик расчета уточненными значениями переменных, вследствие учета влияния реальных значений электрических и магнитных параметров.

Практическая ценность:

1. Рекомендации по применению наиболее рациональных схем источников питания для электротехнологических комплексов с коэффициентом усиления по напряжению до 10^4 , что позволяет расширить граничные значения выходного напряжения, при оптимальных параметрах высоковольтных трансформаторов, с 30кВ до 60кВ.

2. Исследование электромагнитных процессов в резонансных высоковольтных высокочастотных источниках питания для электротехнологии с применением индуктивно-емкостных преобразователей, что позволяет получить коэффициент усиления по напряжению источника питания до 10^2 , при этом напряжение на транзисторах остается равным напряжению источника питания.

3. Применение фильтрового дросселя в тиристорных преобразователях для стабилизации напряжения при изменении частоты в диапазоне $\pm 5\%$ от номинальной.

4. Уточненная методика расчета и проектирования высоковольтных высокочастотных индуктивных модулей, которая позволяет уменьшить погрешность расчета параметров в 2 раза.

Реализация результатов работы. В научном конструкторско-технологическом бюро «Вихрь» (г. Уфа), в учебном процессе на кафедре «Электромеханика» Уфимского государственного авиационного технического университета.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались: на 7 и 8 международных молодежных научно-технических конференциях «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», г. Уфа, 2001, 2002; на международной молодежной научно-технической конференции «Интеллектуальные системы управления и обработки информации», г. Уфа, 2001, 2003; в межвузовском научном сборнике «Электротехнические комплексы и системы», г. Уфа, 2001, 2005; в межвузовском научном сборнике «Электромеханика, электротехнические комплексы и системы», г. Уфа, 2002, 2003, 2006; в известиях Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова, г.г. Москва-Н.Новгород, 2005; в журнале «Техническая электродинамика», г. Киев, 2004; в журнале «Вестник УГАТУ», г. Уфа, 2006.

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 9 статей, 3 тезиса, патент на изобретение РФ и программа для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из 187 стр. В работе содержится 75 рисунков и 6 таблиц. Список литературы содержит 119 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные задачи исследования, показана практическая значимость работы, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, представлены сведения об апробации работы, описаны структура и объем работы, кратко раскрыто содержание разделов диссертации.

В первой главе представлен анализ устройств и установок, потребляющих электрическую энергию в виде кратковременных импульсов (емкостные накопители энергии) и установок для индукционного нагрева. Рассмотрены возможные схемы построения источников питания емкостных накопителей энергии. Приведен принцип работы и особенности схемы с индуктивно-емкостным преобразователем. Определена наиболее рациональная структура источника питания для термообработки металла с помощью индукционного нагрева. Выявлены особенности выбора параметров высоковольтных высокочастотных трансформаторов. Рассмотрена модель трансформатора, существующая в среде проектирования *OrCad 9.2*, и выявлены ее основные недостатки.

Во второй главе разработаны математические модели для исследования работы резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов.

Наиболее значимыми элементами ряда современных установок для электротехнологии, являются высоковольтные высокочастотные индуктивные модули. Характер нагрузки электротехнологических комплексов является важным фактом при расчете и выборе параметров высоковольтных высокочастотных трансформаторов (ВВТ), входящих в эти схемы.

Если при выходном напряжении $u_{\text{вых}} \leq 3 \text{ кВ}$ конструкция и изоляционные расстояния не отличаются от таковых для трансформаторов с напряжением $u_{\text{вых}} \leq 1 \text{ кВ}$, то при более высоких напряжениях необходимо учитывать следующие факторы: выбор сечения провода высоковольтной обмотки и сечения магнитопровода производится по технологическим соображениям, а не по условиям минимума целевой функции; увеличение собственной емкости высоковольтной обмотки, что ведет к возрастанию паразитного емкостного тока.

Рассмотрено влияние каждого из вышеприведенных факторов на параметры высоковольтного трансформатора. Если диаметр провода, выбранного по плотности тока, меньше предельно допустимого, то провод выбирается по технологическим соображениям ($\varnothing = \text{const}$). Обозначив предельное сечение провода через $q_{\text{пр}}$, определим предельную величину выходного напряжения, при котором сечение провода определяется рациональной плотностью тока

$$S_2 = U_2 I_2; \quad U_2 = S_2 / I_2 = S_2 / (j_{2\text{гр}} \cdot S_{2\text{р}}),$$

где S_2 , U_2 , I_2 – соответственно выходные мощность, напряжение и ток; $j_{2\text{гр}}$ – плотность тока характерная для заданных условий и мощности.

Таким образом, граничное напряжение, при котором сечение провода выбирается по плотности тока, пропорционально мощности.

Определено влияние напряжения на геометрические параметры высоковольтного трансформатора. Как известно, линейные размеры и соотношения между ними для силовых трансформаторов выбираются в зависимости от мощности, заданных ограничений и оптимума целевой функции. В зарядных устройствах целевой функцией выбрана масса активных материалов трансформаторного модуля. При высоких напряжениях, ограниченной мощности и выборе сечения стержня в соответствии с вышеуказанными принципами, число витков высоковольтной обмотки получается настолько большим, что их выбирают так же по технологическим соображениям.

При обычных упрощающих предположениях электромагнитная мощность равна:

$$P_{\text{эм}} \approx S_2 \approx \pi B_m f k_c k_{\text{ок}} S_{\text{ст}} S_{\text{ок}} / \sqrt{2}, \quad (1)$$

где B_m , f , k_c , $k_{\text{ок}}$, $S_{\text{ст}}$, $S_{\text{ок}}$ – соответственно индукция, частота, коэффициент заполнения магнитопровода и окна, сечения трансформатора

Если $N_2 = N_{2\text{max}}$, то сечение стержня равно

$$S_{\text{ст}} = U_2 / \pi \sqrt{2} f B_m N_{2\text{max}} \quad (2)$$

Из (2) определено граничное значение напряжения

$$U_{2\text{гр}} = N_{2\text{max}} \sqrt{\frac{P_{\text{эм}} \gamma_m k_{\text{ок}}}{\sqrt{2} \pi B_m f \cdot j \gamma_{\text{ст}} k_c}} \times \sqrt{\frac{(2 + \pi k_1 c / \vartheta)(2 + \pi c / k_1 a)}{(2k_1 + c / a)(c / \vartheta + a / \vartheta)}} = A_1 \sqrt{P_{\text{эм}} / j}. \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что $U_{2\text{гр}} \propto \sqrt{P_{\text{эм}} / j}$, в то время как первое условие соответствует прямой пропорциональности между этими величинами. Зависимости между $u_{2\text{р}}^{(1)}$, $u_{2\text{р}}^{(2)}$ и $P_{\text{эм}}$ для $B_m = 0,4 \text{ Тл}$, $f = 5 \cdot 10^3 \text{ Гц}$, $c/\vartheta = 1$, $c/a = 1$, $a/\vartheta = 0,5$ стали 3424, с толщиной листа $\delta = 0,08 \text{ мм}$ приведены на рисунке 1 (кривые 1,2). Из сравнения этих кривых видно, что при малых мощностях более жестким является первое условие, а затем второе.

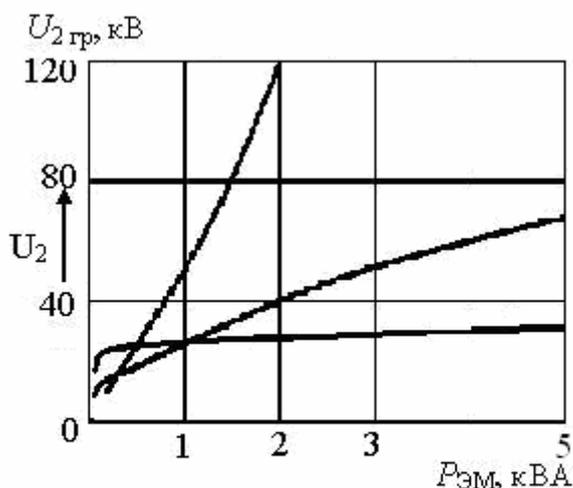


Рисунок 1. Зависимость граничного значения напряжения от электромагнитной мощности

вторичной обмотки. Линейные размеры, судя по (3) пропорциональны $(P_{эм}/j)^{1/4}$.

Емкостный ток и ток нагрузки соответственно равны

$$I_c = U_1 \omega C_{2m} = \frac{16\epsilon ph \cdot 10^{-10}}{10,8\pi} \cdot \frac{U_2^2}{U_1} \cdot \frac{\omega}{\Delta_2 m};$$

$$I_n = P_{эм} / u_1.$$

при этом граничное значение напряжения, при котором ток не превышает $I_{с гр}^*$ равно

$$u_{2 гр}^{(3)} = \sqrt{\frac{I_{с гр}^* \cdot 10,8\pi m \Delta_2 P_{эм}}{6\epsilon ph \omega \cdot 10^{-10}}} \approx (P_{эм})^{1/4}. \quad (4)$$

На рисунке 1 (кривая 3) приведена зависимость $u_{2 гр}^{(3)} = f(P_{эм})$ при тех же соотношениях, что и ранее. Отмечено, что если при выборе граничного значения напряжения по второму критерию, с ростом частоты величина $u_{2 гр}$ растет пропорционально \sqrt{f} , то граничное значение напряжения по третьему критерию падает пропорционально $f^{1/4}$.

Приведенные зависимости могут служить для определения удельных показателей высоковольтных трансформаторов. На рисунке 2 построена зависимость $(G_{об} + G_{ст}) / P_{эм} = f(P_{эм})$ для напряжения $u_2 = 1$ кВ. При напряжениях (10...100)кВ удельные показатели определяются следующим образом: при $U_2 < U_{2 гр}$ активное сечение стержня выбирается в соответствии с оптимальными соотношениями; при $U_2^{(1)} \geq U_2 \geq U_2^{(2)}$, $S_{ст}$ выбирается в

С увеличением выходного напряжения растет собственная емкость высоковольтного трансформатора, приведенная к первичной обмотке, вследствие чего увеличивается емкостный ток.

Пренебрегая величинами емкости первичной обмотки и межобмоточной емкости, получено значение приведенной емкости $C'_{2m} \approx \frac{4\epsilon ph}{10,8\pi} \cdot \frac{4N_2^2(m-1)}{N_1^2 \Delta_2 m^2} \approx \frac{16\epsilon ph}{10,8\pi} \cdot \frac{N_2^2}{N_1^2 \Delta_2 m}$,

где p , h , m , Δ_2 – средний полупериметр, высота, число слоев, толщина межслоевой изоляции

соответствии с рекомендациями; при $U_2 \geq U_2^{(1)}$ сечение провода вторичной обмотки выбирается по технологическим соображениям.

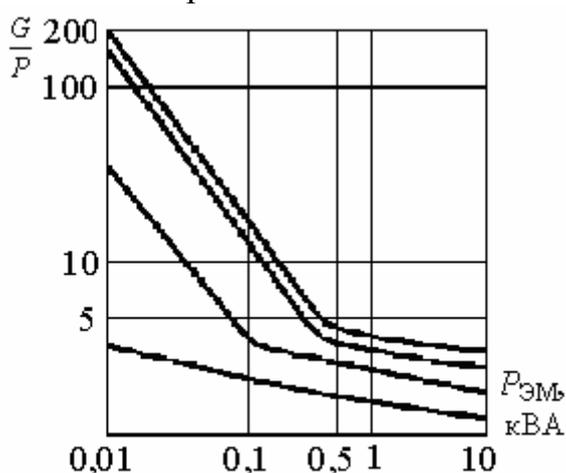


Рисунок 2. Удельные показатели высоковольтных трансформаторов

При $U_2 > U_2^{(1)}$ масса высоковольтного трансформатора не уменьшается, так как $G_{обм}, G_{ст} \approx const$ и $(G_{обм} + G_{ст})/P_{эм}$ – гипербола. На рисунке 2 (кривые 2,4) даны зависимости $M_{уд} = f(P_{эм})$ для $U_2 = 10, 20, 50, 100$ кВ.

Расчет параметров высоковольтных высокочастотных трансформаторов производился при помощи специально созданной программы на Delphi 7 – «Индуктивный модуль с учетом реальных магнитных и

электрических параметров». Программа обеспечивает выполнение следующих функций: расчет трансформаторов с сердечниками из различных марок электротехнической стали (включая аморфную), ферритов; расчет обмоток выполненных из ленты, одножильного и многожильного провода, медных трубок; расчет основных потерь в трансформаторе, индуктивности рассеяния и эквивалентной емкости.

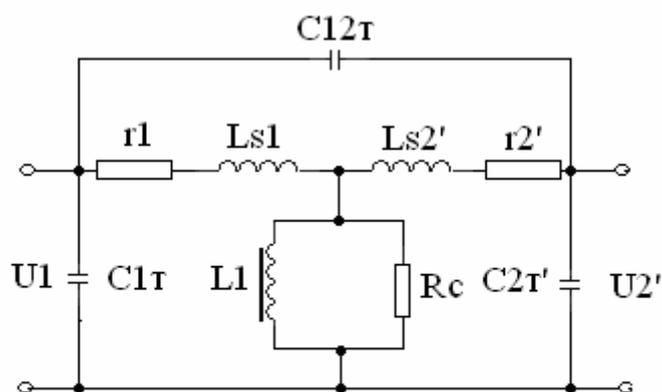


Рисунок 3. Эквивалентная схема замещения ВВТ

Для исследования выбрана эквивалентная схема ВВТ (рисунок 3), состоящая из: индуктивностей рассеяния L_{1s}, L'_{2s} ; активных сопротивлений r_1, r'_2 первичной и вторичной обмоток; L_1 индуктивности намагничивания; сопротивления, учитывающего потери в магнитопроводе R_c ; емкостей $C_{1Г}, C_{12Г}, C_{2Г}$, приближенно эквивалентных соответствующим

распределенным емкостям и приведенных к напряжению первичной обмотки. На основе выбранной схемы замещения предложена математическая модель ВВТ, учитывающая паразитные параметры и потери в сердечнике. Для ее исследования проведено моделирование по схеме на рисунке 4. Питание трансформатора осуществляется от синусоидального источника с частотой 20кГц, амплитудой 200В. Внутреннее сопротивление источника R_i равно 1Ом. Трансформатор нагружен активным сопротивлением $R_n = 2$ МОм.

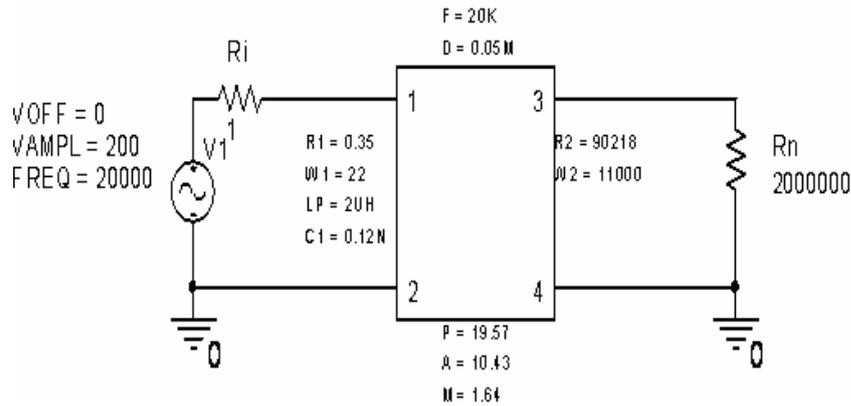


Рисунок 4. Схема для исследования ВВТ

Выявлено, что предложенная модель высоковольтного высокочастотного трансформатора достаточно хорошо отвечает требованиям, предъявляемым к модели, отражающей электромагнитные процессы в реальном трансформаторе, по форме и амплитуде полученных основных характеристик.

Индуктивные модули являются составной частью комплекса для питания ряда нелинейных нагрузок. Рассмотрены источники питания емкостных накопителей энергии. Наибольший интерес в этой области представляют высокочастотные преобразователи с повышенным коэффициентом трансформации по напряжению. Мощность исследуемых трансформаторно-полупроводниковых комплексов повышенной частоты относительно невелика, поэтому для получения максимального выходного напряжения и минимального времени заряда рационально использовать систему с предварительным повышением напряжения в звене постоянного тока, т.е. каскадное соединение резонансного инвертора и высоковольтного высокочастотного трансформатора. Для исследования выбран ряд схем, две из которых – мостовой последовательный резонансный инвертор (МС) и инвертор с индуктивно-емкостным преобразователем (МСИЭП), представлены на рисунках 5 и 6.

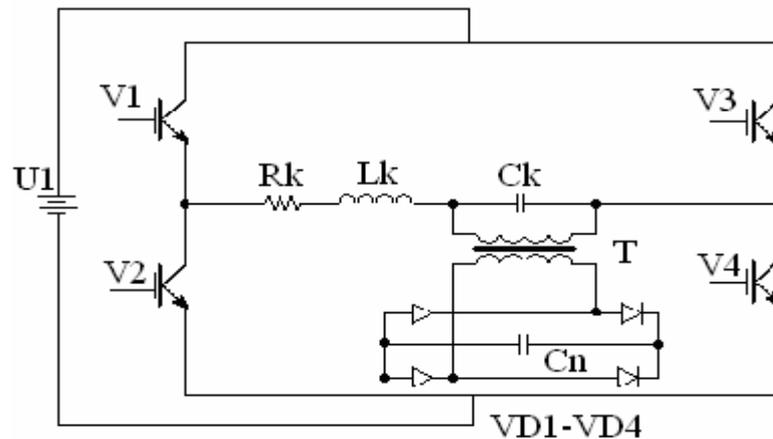


Рисунок 5. Схема последовательного мостового резонансного транзисторного инвертора

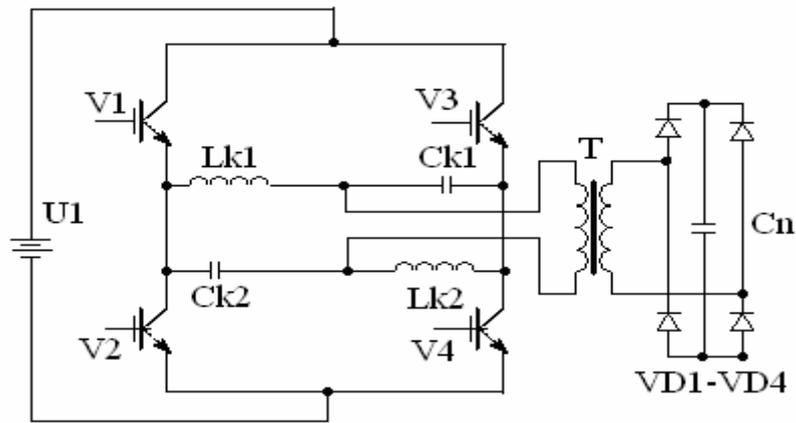


Рисунок 6. Схема мостового транзисторного инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем

На рисунке 7 приведена модель мостового транзисторного инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем, на рисунке 8 – кривая напряжения на емкостном накопителе этой модели, конденсатор полностью заряжается до значения 57,3кВ за 21,6 сек.

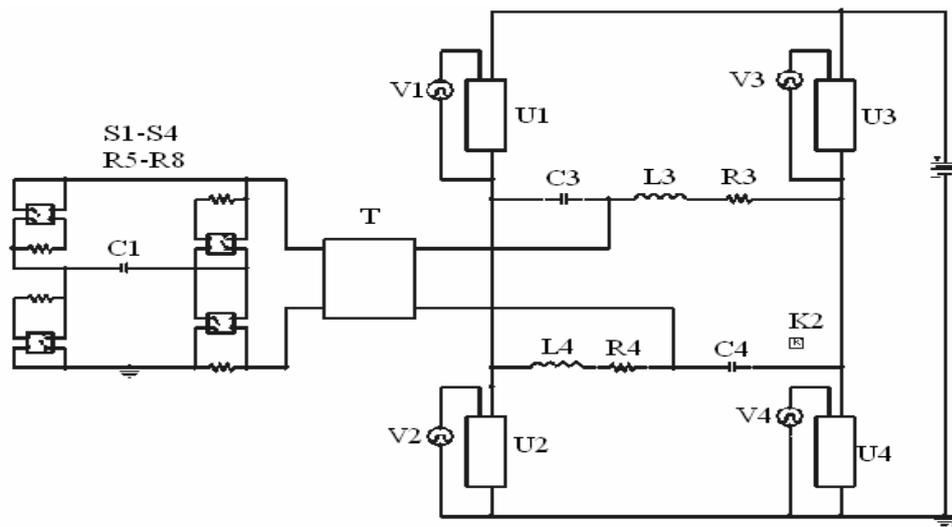


Рисунок 7. Модель мостового транзисторного инвертора с индуктивно-емкостным преобразователем

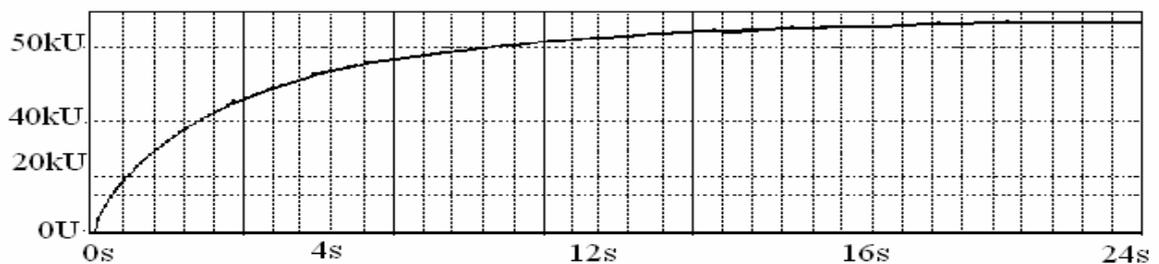


Рисунок 8. Напряжение на емкостном накопителе инвертора с ИЕП

Из зависимостей, полученных при моделировании мостового транзисторного инвертора с индуктивно–емкостным преобразователем, видно, что максимальное напряжение на транзисторах не превышает 23В, в то время как амплитуда напряжения на диагонали, равна 4кВ – в 200 раз превышает напряжение питания. Это объясняется тем, что напряжение транзисторов близко к арифметической разности напряжений u_{L1} , u_{L2} и u_{C1} , u_{C2} , а напряжение диагонали – к арифметической сумме. При этом форма напряжения на этих элементах близка к синусоидальной. Коммутирующий конденсатор $C3$ заряжается до максимального значения за 4,02мс. Напряжение на ЕНЭ (C_1) изменяется по закону близкому к экспоненциальному, а ток в конденсаторе C_3 имеет импульсную форму, то есть чередуются состояния открытого положения (U_1 , U_2 и U_3 , U_4) и полностью закрытого положения инверторного моста.

Данные, полученные в результате моделирования, сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Параметры схем при оптимизации по максимальному выходному напряжению

Схема	Параметры	U_3 , кВ	t_3 , мс	U_B , max, В	I_B , max, А	Е, Дж	t_3^* , с
МС	$L_k=38\text{мкГн}$ $C_k=1\text{мкФ}$	48	2,3	1200	70	0,105	43
МСИЕП	$L_k=27\text{мкГн}$ $C_k=0,25\text{мкФ}$	57,3	4,02	23	185	0,08	21,6
ОПН (однотактная схема)	$L_k=59\text{мкГн}$ $C_k=0,38\text{мкФ}$ $L_{вх}=5\text{мкГн}$	37,11	10	250	139	0,27	200
ДПН (двухтактная схема)	$L_k=190\text{мкГн}$ $C_k=0,22\text{мкФ}$	53	9,4	1200	163	0,938	188

Согласно данным таблицы 1, можно сделать вывод, что схема преобразователя напряжения с ИЕП является наиболее приемлемой при оптимизации по максимальному выходному напряжению и по времени заряда.

Время заряда ЕНЭ в схемах однотактного и двухтактного преобразователей на порядок выше аналогичного значения в мостовой схеме и схеме с ИЕП, хотя по величине напряжения на ЕНЭ двухтактная схема мало уступает мостовой схеме с ИЕП. При одинаковом источнике питания и транзисторах, напряжение на ЕНЭ в 1,2 раза больше напряжения на конденсаторе обычной мостовой схемы, а время, затраченное на заряд емкости, в 2 раз меньше. Напряжение на транзисторе в схеме с ИЕП почти в 50раз меньше, чем на аналогичном приборе в мостовой схеме. По времени заряда коммутирующего конденсатора и величине тока на транзисторе,

лучшей является схема мостового полупроводникового преобразователя. При исследовании схем коэффициент усиления по напряжению составил порядок до 10^4 .

Третья глава посвящена исследованию и выбору параметров электротехнологических комплексов для индукционного нагрева и источников питания озонаторов.

Почти каждая современная электротехнологическая установка рассматриваемых классов, включает в свою схему преобразователь повышенной частоты и индуктивные модули. Причем схемное решение большинства преобразователей является хорошо известным. Однако, применение взаимоиндуктивных модулей позволяет улучшить технико-экономические показатели подобных устройств. К таким установкам можно отнести источники питания для индукционного нагрева, использующие классическую схему с удвоением частоты и установки для генерирования озона со специальным трансформатором.

На рисунке 9 приведена схема оригинального автономного инвертора со стабилизированным выходным напряжением, защищенная патентом РФ № 2216090, обладающая по сравнению с аналогичными устройствами, улучшенными технико-экономическими показателями за счет уменьшения числа элементов и устранения влияния индуктивности измерительного трансформатора на работу преобразователя.

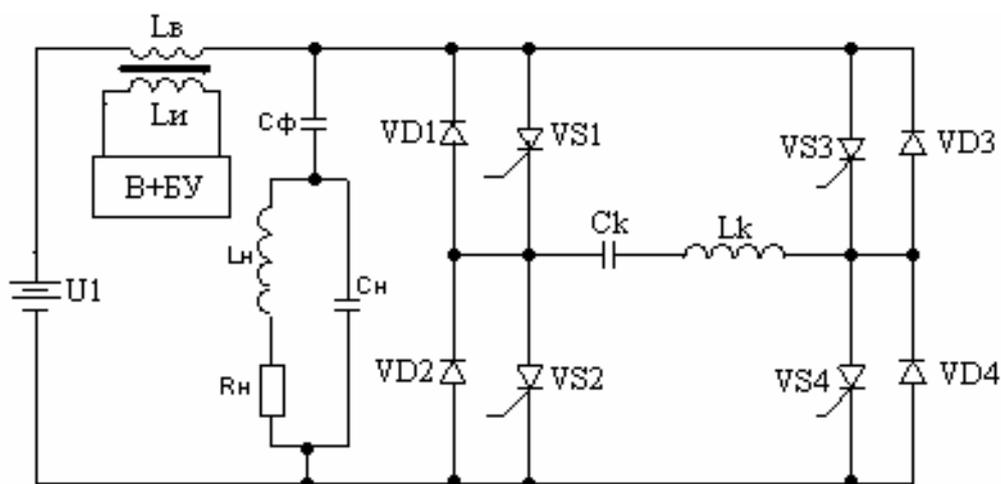


Рисунок 9. Автономный инвертор со стабилизированным выходным напряжением

Автономный инвертор со стабилизированным выходным напряжением состоит из резонансного мостового тиристорного инвертора и нагрузки, включенной в цепь фильтрового конденсатора, и отличается от аналогичных схем преобразователей частоты тем, что во входной дроссель введена измерительная катушка, индуктивно связанная с дросселем, последовательно соединенным с резонансным мостовым тиристорным инвертором,

параллельно которому подключена цепь, состоящая из фильтрового конденсатора и нагрузки, при этом измерительная катушка соединена с выпрямителем, который в свою очередь подключен к входу блока управления, выход которого подключен к управляющим электродам тиристор.

Для исследования работы автономного инвертора со стабилизированным выходным напряжением разработана модель в прикладном пакете *MatLab*. В результате моделирования получено, что мгновенное значение напряжения на нагрузочном контуре равно примерно 420В. Вследствие большой индуктивности практически все напряжение нагрузочного контура прикладывается к входному дросселю, трансформируется на измерительную катушку и составляет 630В.

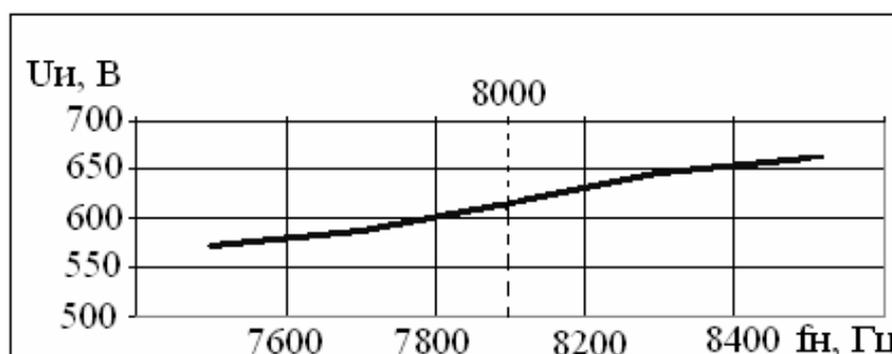


Рисунок 10. Зависимость напряжения на измерительной катушке от частоты управления

Для исследования возможности использования входного дросселя в качестве устройства регулирования и стабилизации напряжения, проведен ряд измерений зависимости напряжения на измерительной катушке от частоты нагрузочного контура. Данные отображены на рисунке 10, где показано, что экспериментальная зависимость имеет линейный характер в области регулирования частоты $\pm 5\%$ от расчетной (8кГц). Это доказывает возможность использования входного дросселя для регулирования и стабилизации напряжения.

Электромагнитные процессы в источниках питания озонаторов близки к электромагнитным процессам в емкостных накопителях энергии. Схема замещения источника питания емкостного накопителя представлена на рисунке 11а. Озонатор представляет собой, последовательно соединенные: емкость барьера, емкость газового промежутка, параллельно которой включен диодный выпрямитель, нагруженный на противо-ЭДС, равную приведенному напряжению пробоя (рисунок 11б).

В прикладном пакете *MatLab* 6.5 создана модель источника питания с нелинейной нагрузкой в виде генератора озона и получены основные характеристики, необходимые для расчета трансформатора.

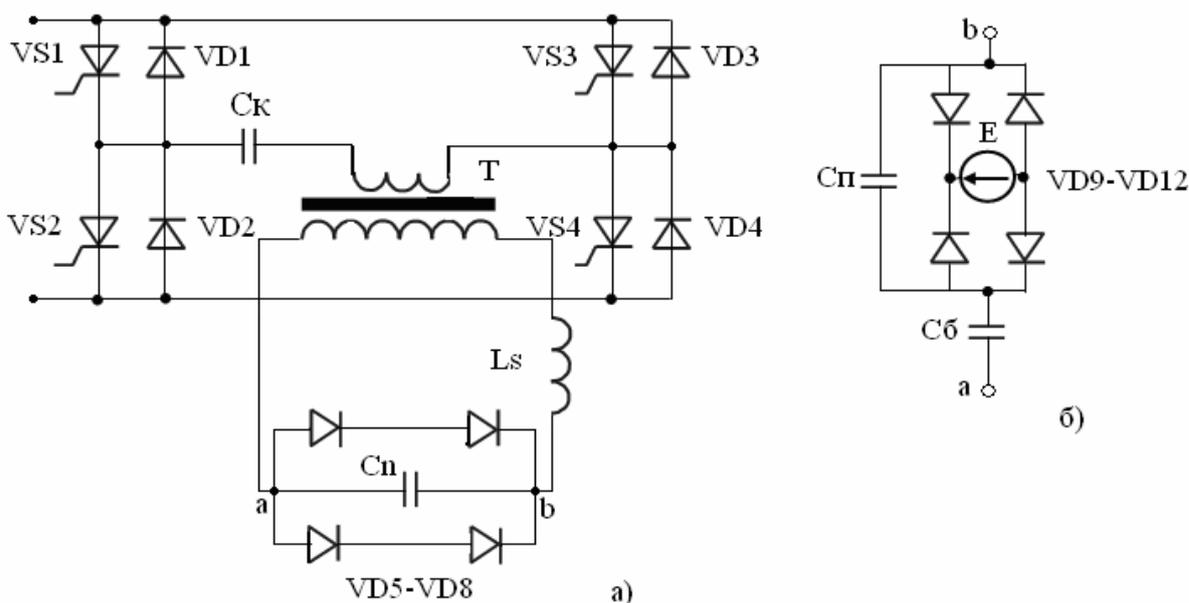


Рисунок 11. Схема замещения силовой части: а) емкостного накопителя, б) озонатора

Для решения проблемы согласования источника питания и нелинейной нагрузки, предложена методика оптимизации параметров трансформатора по заданной индуктивности рассеяния, которая является одновременно коммутирующей индуктивностью. Так же предложенная методика позволяет определить электромагнитные и геометрические параметры трансформатора.

Особенности работы трансформатора – наличие нелинейной нагрузки, несинусоидальное питающее напряжение и токи, совмещенные в одном устройстве идеализированного трансформатора с $U_1 \cong E_1$, $E_2 = E_1 n_{21}$, где E_1 , E_2 - ЭДС первичной и вторичной обмоток и линейного дросселя, индуктивность которого равная индуктивности рассеяния L_S .

В техническом задании на расчет трансформатора должны быть указаны: производительность озонатора, связанная с активной потребляемой мощностью, напряжение питающей сети, напряжение пробоя.

В **четвертой** главе предложен алгоритм методики расчета электромагнитных параметров резонансного инвертора со стабилизированным выходным напряжением на основе оригинальной схемы, рассмотренной в третьей главе, включающий в себя расчет и оптимизацию параметров взаимоиндуктивного модуля.

По предложенной методике расчета было изготовлено несколько высоковольтных высокочастотных трансформаторов различных мощностей и исследованы их характеристики, позволившие рассчитать дополнительные электромагнитные параметры необходимые для работы математической модели.

На рисунке 12 приведено сравнение зависимостей выходного напряжения от частоты, полученных для: модели ВВТ с учетом потерь и паразитных параметров, стандартной модели и реального трансформатора.

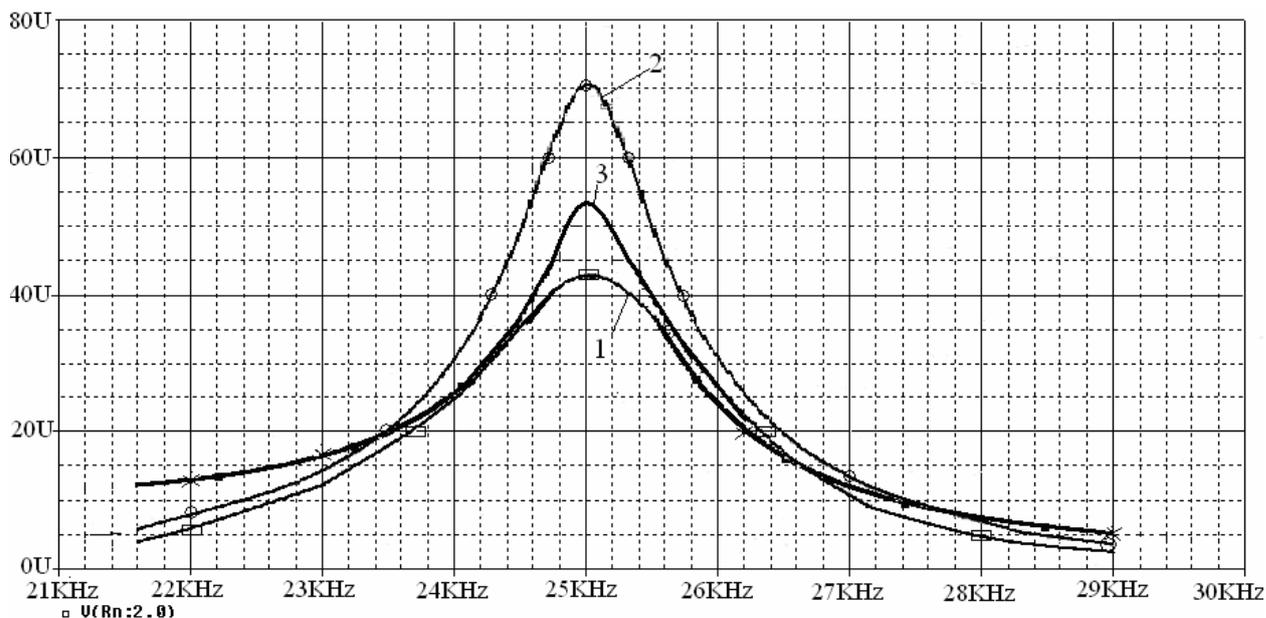


Рисунок 12. Зависимость выходного напряжения от частоты для: 1 – реальный трансформатор; 2 – стандартная модель; 3 – модель с учетом потерь.

Погрешность расчета на основе уточненной модели меньше погрешности расчета обычной модели в 2 раза. Таким образом, модель высоковольтного высокочастотного трансформатора с учетом потерь в сердечнике, наиболее полно отражает процессы, протекающие в реальном трансформаторе.

В **заключении** изложены основные результаты диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследованы возможные схемы построения и определены наиболее рациональные структуры резонансных трансформаторно-полупроводниковых комплексов для электротехнологии, требующих согласования выходных параметров с параметрами нагрузки.

2. Разработаны математические модели для исследования работы трансформаторно-полупроводниковых комплексов с каскадным повышением напряжения и учетом реальных электрических и магнитных параметров индуктивных модулей. Предложена математическая модель высоковольтного высокочастотного трансформатора, учитывающая паразитные параметры и потери в сердечнике и программа расчета высоковольтных индуктивных модулей №2005612797.

3. Проведено исследование и оптимизация по максимальному выходному напряжению ряда наиболее рациональных схем источников питания емкостных накопителей энергии. По результатам моделирования доказана эффективность использования схемы с индуктивно – емкостным

преобразователем в качестве реактивных блоков трансформаторных преобразователей частоты с высоковольтным выходом.

4. Разработан оригинальный источник питания для индукционного нагрева, на базе тиристорного преобразователя с удвоением частоты, защищенный патентом РФ №2216090. Доказана возможность использования входного индуктивного модуля для регулирования и стабилизации напряжения. Предложенная схема преобразователя с измерительной катушкой, обладает, по сравнению с аналогичными устройствами, улучшенными технико-экономическими показателями.

5. Предложена уточненная методика расчета специальных трансформаторов для электротехнологических комплексов с высоковольтным выходом, на основе учета эквивалентных нагрузочных емкостей и индуктивности рассеяния, при различном расположении обмоток на магнитопроводе, что позволяет сократить длительность этапа проектирования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Имитационная модель источника питания для электротехнологии в среде MatLab / Ю.В. Шуткова (Рахманова) // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Матер. междунар. молодежн. науч.-техн. конф. – Уфа, 2001. – С. 228.

2. Особенности электромагнитных процессов в согласующем трансформаторе, включенном в диагональ мостового транзисторного инвертора / Ю.В. Шуткова (Рахманова), А.А. Чепайкин, М.С. Фетисова // Электротехнические комплексы и системы: Межвузов. научн. сб. – Уфа, 2001. – С. 252-256.

3. Диагностика маслонаполненного трансформаторного оборудования / Ю.В. Шуткова (Рахманова), М.С. Фетисова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 7 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М., 2001. – С. 221-222.

4. Исследование с помощью компьютерной модели высокочастотного трансформаторно-индукторного комплекса для индукционного нагрева металла / Ю.В. Шуткова (Рахманова), М.С. Фетисова // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: 8 междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М., 2002. – С. 62-63.

5. Моделирование индуктивно связанных цепей в программе PSpice / Ю.В. Шуткова (Рахманова) // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузов. научн. сб. – Уфа, 2002. – С. 100-104.

6. Имитационная модель устройства заряда емкостного накопителя энергии / Ю.В. Шуткова (Рахманова) // Электротехнические комплексы и системы: Межвузов. научн. сб. – Уфа, 2003. – С. 109-113.

7. Компьютерная модель зарядного устройства с высоковольтным высокочастотным трансформатором / Ю.В. Шуткова (Рахманова) // Интеллектуальные системы управления и обработки информации: Матер. междунаро. молодежн. науч.-техн. конф. – Уфа, 2003. – С. 215.

8. Влияние выходных характеристик емкостных накопителей на параметры модулей, входящих в зарядное устройство / А.К. Белкин, Ю.М. Гусев, Ю.В. Рахманова, Л.Э. Рогинская, А.А. Шуляк // Технична электродинамика. – Киев, 2004. – Ч.2. – С. 30-34.

9. Особенности расчета высокочастотных трансформаторов для электротехнологии / Ю.В. Рахманова, Т.А. Гайнетдинов, Е.Н. Гуляев // Электротехнические комплексы и системы: Межвузов. научн. сб. – Уфа, 2005. – С. 252-256.

10. Исследование электромагнитных процессов в источниках питания для электротехнологических комплексов на основе компьютерных моделей / Ю.В. Рахманова, Н.В. Листова // Известия Академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. – М.–Н. Новгород, 2005. – Т. 15. – С. 121-124.

11. Модель согласующего высокочастотного трансформатора с учетом реальных магнитных и электрических параметров / Ю.В. Рахманова // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузов. научн. сб. – Уфа, 2006. – С. 259-264.

12. Пат. 2216090 Рос. Федерация. Автономный инвертор со стабилизированным выходным напряжением / Рогинская Л.Э., Шуткова (Рахманова) Ю.В., Фетисова М.С.; опубл. 10.11.03, Бюл. № 31.

13. Индуктивный модуль с учетом реальных магнитных и электрических параметров: программы / Рогинская Л.Э., Рахманова Ю.В. – № 2005612797; опубл. 10.01.06.

14. Выбор параметров полупроводниковых источников питания с высоковольтным выходом / Л.Э. Рогинская, Ю.В. Рахманова // Вестник УГАТУ. – Уфа, 2006. – Т. 7. – № 4 (17). – С. 23-26.