

**На правах рукописи**

**СОСНОВСКИЙ Денис Александрович**

**РЕЗОНАНСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ**

**Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы  
и системы**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа – 2008**

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  
**Куляпин Владислав Максимилианович**

кандидат технических наук, доцент  
**Гутин Леонид Ильич**

**Ведущая организация** ФГУП НКТБ «Вихрь», г. Уфа

Защита диссертации состоится «29» декабря 2008 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д-212.288.02 при Уфимском государственном авиационном техническом университете по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса,12

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Уфимского государственного авиационного университета

Автореферат разослан «    » ноября 2008 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д-р техн. наук, проф.

**Г.Н. Утляков**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Электротехнологии находят все более широкое применение в промышленности. Характерной их особенностью является то, что энергия электромагнитного поля непрерывно или импульсно подводится к технологическому объекту, где преобразуется в другие формы энергии, обуславливающие реализацию заданного технологического процесса. При этом регулирование длительности и интенсивности воздействия позволяет резко повысить плотность энергии, вводимой в объект, рационально управлять нестационарными неэлектрическими процессами и получить ряд уникальных эффектов свойственных конкретным технологическим процессам.

Процесс внедрения данных технологий с высококонцентрированным потоком энергии нередко сдерживается отсутствием специализированных источников питания, выполненных на современной элементной базе и обладающих требуемыми энергетическими и динамическими характеристиками. Применение известных устройств преобразовательной техники для целей электротехнологии не позволяет реализовать все преимущества новых технологических процессов, ограничивает их производительность. Только комплексное решение разработки технологической части и источников питания с учетом их взаимного влияния позволяет создавать электротехнологические установки повышенной производительности, надежности и улучшенными технико-экономическими показателями.

Кроме того, большинство разрядных и импульсных технологий выдвигает ряд аналогичных требований к характеристикам источника питания, что позволяет разработать серию источников питания со сходной силовой частью предназначенную для гаммы технологических процессов. Подобный подход значительно сократит затраты на проектирование электротехнологических комплексов.

Разработке и проектированием источников питания электротехнологических установок посвящено немало трудов и монографий таких ученых как В.А. Кныш, О.Г. Булатов, Д.А. Бут, В.И. Пантелеев, А.И. Царенко, А.С. Васильев, Ю.М. Гусев, Л.Э. Рогинская, Т.П. Костюкова. Большой вклад в разработку новых источников питания был сделан предприятиями НКТБ «Вихрь» (г.Уфа), «Институт Электротехнологи» (г. Екатеринбург), ЗАО ЭСТО (г. Зеленоград). Несмотря на это, ряд вопросов не получил достаточного освещения в литературе в том числе: особенности построения специализированных преобразователей энергии позволяющие ограничивать энергию воздействия на объект, способы регулирования мощности и возможности применения современных электронных компонентов при создании высокотехнологичных электротехнических комплексов (ЭТК).

**Целью** диссертационной работы является разработка резонансных преобразователей частоты для питания электротехнологических установок и исследование протекающих в них электромагнитных процессов.

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

1. Изучение особенностей электротехнологических комплексов и создание их схмотехнической модели.
2. Разработка и исследование источников питания с улучшенными характеристиками для установок ионно-вакуумной технологии.
3. Разработка и исследование преобразователей частоты для электротехнологий с конденсаторной составляющей нагрузки. Анализ и выбор способов регулирования и стабилизации выходных параметров технологических комплексов.
4. Выполнение экспериментальных исследований, подтверждающих адекватность теоретических положений и применимость разработанных преобразователей.

**Методы исследования.** Перечисленные задачи решены с помощью методов теории электромагнитного преобразования энергии, положений теории линейных и нелинейных электрических цепей. При анализе электромагнитных процессов использовались численно-аналитические и численные методы решения нелинейных и кусочно-линейных дифференциальных уравнений сложных электрических систем. Для получения статических и динамических характеристик использовались методы компьютерного моделирования на основе математического пакета MatLab/Simulink.

**На защиту выносятся:**

1. Разработанные источники питания с резонансным преобразователем частоты для установок ионно-вакуумной технологии и их характеристики, полученные в результате исследования.
2. Оригинальный способ стабилизации технологических процессов с емкостным характером нагрузки, основанный на параметрическом возбуждении согласующего трансформатора.
3. Характеристики разработанных преобразователей для электротехнологий с конденсаторной составляющей нагрузки.
4. Результаты экспериментальных исследований, подтверждающие адекватность полученных теоретических положений.

**Научная новизна:**

1. Предложен и обоснован новый подход к разработке структуры электротехнологического комплекса с резонансными преобразователями частоты, позволяющий, за счёт улучшенных характеристик объединить два источника ускоряющего напряжения вакуумной камеры.
2. Созданы алгоритмы и программы, позволяющие выбрать наиболее рациональные параметры преобразователей энергии электротехнических установок (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2008611353).
3. Предложен оригинальный способ стабилизации напряжения и защиты разрядно-импульсной установки, отличие которого заключается в использовании параметрического возбуждения согласующего трансформатора для преобразователя энергии (положительное решение от 18.09.08. по заявке № 2008103415 от 29.01.08).
4. Создана методика, позволяющая выбрать электромагнитные и

геометрические параметры согласующего трансформатора с параметрической связью.

### **Практическую ценность имеют**

1. Предложенные источники питания с преобразователем частоты для электротехнологий ионно-вакуумного модифицирования поверхности, производства озона и др.

2. Полученные в результате аналитических и экспериментальных исследований, а также при имитационном моделировании наиболее рациональные параметры преобразователя и способы регулирования технологического процесса.

3. Способ и устройство стабилизации параметров электротехнологической установки.

4. Создание программного обеспечения по расчету переходных процессов в озоногенирующей установке с трансформаторным параметрическим модулем.

**Реализация результатов работы.** Материалы диссертационной работы используются для проектирования электротехнических комплексов в НПП «Уралавиаспецтехнология». Результаты работы используются в учебном процессе УГАТУ при подготовке при подготовке магистров по направлению 140600 «Электротехника электромеханика и электротехнологии».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных, всероссийских, республиканских научно-технических конференциях: на международной научно-молодежной конференции «Гагаринские чтения», г. Москва, 2003, 2008; на международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» г. Томск, 2007; на всероссийской научной конференции «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2007» г. Астрахань, 2007; в межвузовском научном сборнике «Электротехнические комплексы и системы», г. Уфа, 2006, 2007, 2008; на международном семинаре «Физико-математическое моделирование систем», г. Воронеж, 2007; в научном журнале «Вестник УГАТУ» г. Уфа, 2008; на семинаре аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике» г. Уфа, 2008 г.

**Результаты диссертационной работы** непосредственно отражены в 12 печатных работах, включая 1 статью в издании из перечня ВАК, 9 статей и тезисов докладов, 1 свидетельство об официальной регистрации программ для ЭВМ в РосАПО, 1 заявка в ФИПС о выдаче патента РФ на изобретение.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 145 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунка и 1 таблицу. Библиографический список включает 102 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность работы. Сформулированы цель и задачи исследования, раскрываются научная новизна, практическая значимость и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен анализ научно-технической литературы, посвященной вопросам создания источников питания технологических комплексов. На примере ряда технологических установок рассмотрены характерные особенности разрядных процессов, к которым можно отнести нелинейность нагрузки и изменение ее в широких пределах. Приведены вольт-амперные характеристики и анализ эквивалентных схем замещения нагрузки рассмотренных установок. Последние состоят из источника противо-ЭДС, сопротивлений различного характера и ключевых элементов. Сформулированы общие требования к источникам питания разрядных установок, к которым можно отнести наличие внешних характеристик близких к характеристикам источника тока, высокого быстродействия, возможность стабилизации и регулирования в широких пределах.

В результате анализа предложено, что для удовлетворения поставленных требований электротехнический комплекс следует выполнять с явно выраженным звеном постоянного тока, т.е. по схеме: сетевой выпрямитель, резонансный инвертор, трансформаторно-согласующий блок, нагрузка. При этом в зависимости от конкретной технологии функция регулирования возлагается либо на инвертор, либо на регулятор в звене постоянного тока. Для анализа электромагнитных процессов в обобщенном ЭТК предложена его схемотехническая модель (рис. 1) состоящая из выпрямительного, инвертирующего и нагрузочно-согласующего блоков.

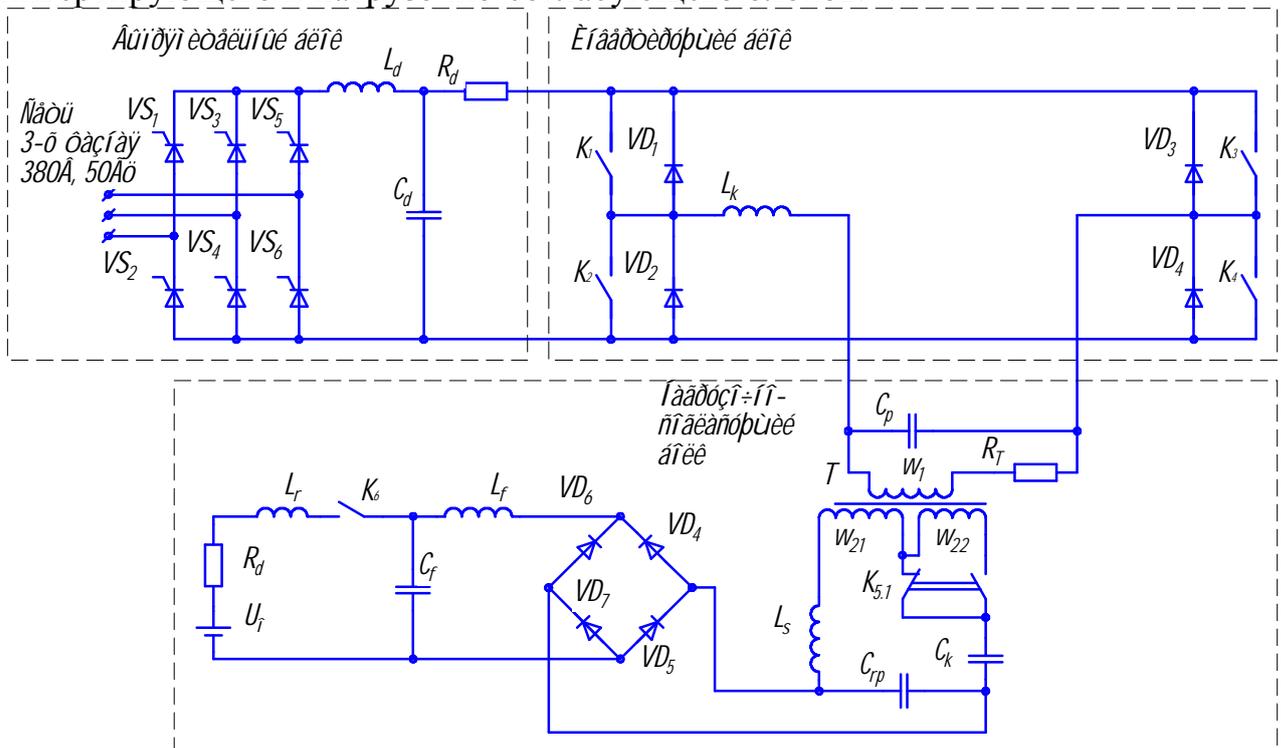


Рисунок 1 – Схемотехническая модель ЭТК

Получение расчетных схем электроустановок для конкретных технологических процессов осуществляется подбором параметров соответствующих элементов.

**Вторая глава** посвящена разработке электротехнического комплекса для ионно-вакуумной технологии. Последний состоит из источника питания электродугового испарителя вакуумной камеры и источника ускоряющего напряжения. К ИП дугового испарителя предъявляются следующие требования: наличие выходных характеристик, близких к характеристикам источника тока в статических и динамических режимах; стабилизация тока с погрешностью в 2-3% при регулировании его в пределах от 40 до 180 А; обеспечение автоматического зажигания дуги. Источник ускоряющего напряжения должен предусматривать два режима работы: импульсный и режим стабилизации напряжения. В первом режиме требуется плавное регулирование напряжения в пределах  $500 \div 1500$  В, при номинальном токе до 10 А; ограничение энергии передаваемой в нагрузку, быстрое устранение процессов дугообразования, при предельной энергии короткого замыкания 300 Дж. Во втором режиме требуется стабилизация напряжения с погрешностью 1-2% при плавном регулировании в пределах  $50 \div 300$  В и коэффициенте пульсации не более 5%.

На рис. 2 приведена электрическая принципиальная схема разработанного источника ускоряющего напряжения с электрической схемой замещения вакуумной камеры. Схема состоит из неуправляемого выпрямителя  $VD_{11}-VD_{16}$ ; широтно-импульсного регулятора  $VT_5$ ,  $VD_9$ ,  $VD_{10}$ ,  $L_d$  и  $C_d$ ; резонансного инвертора  $VT_1-VT_4$  с обратными диодами  $VD_1-VD_4$  и коммутирующей емкостью  $C_k$ ; согласующего трансформатора  $T$  с повышенной индуктивностью рассеяния, высоковольтного выпрямителя  $VD_5-VD_6$  и сглаживающего фильтра  $C_f$ ,  $L_f$ . Смена режимов работы осуществляется переключением  $K_1$ . Схема замещения нагрузки состоит из последовательно включенных  $R_{df}$  и  $U_0$ .

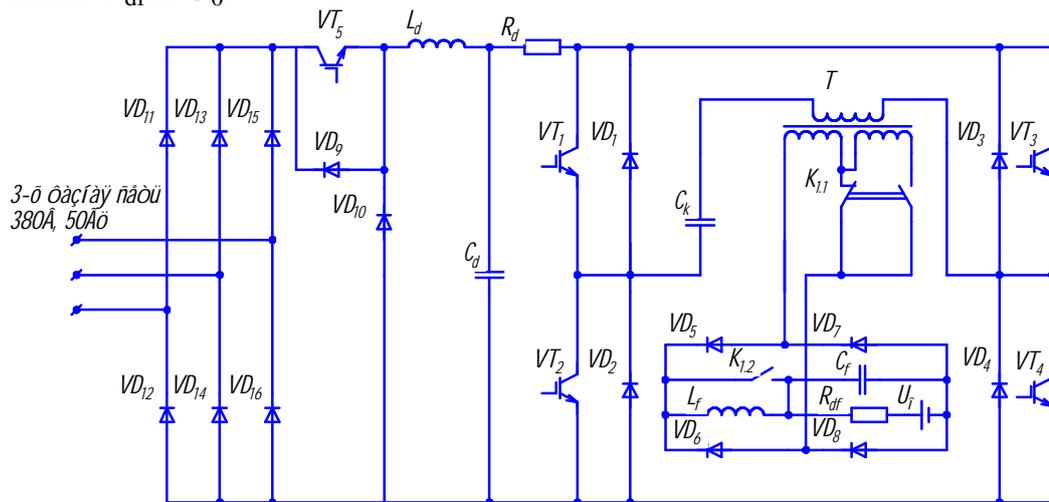


Рисунок 2 – Электрическая принципиальная схема силовой части источника ускоряющего напряжения с нагрузкой

Для данной схемы на основе принятых допущений была составлена математическая модель представляющая собой систему дифференциальных

уравнении для различных интервалов коммутации. Вследствие высокого порядка полученной системы исследование электромагнитных процессов было решено проводить с использованием имитационной модели представленной на рис. 3.

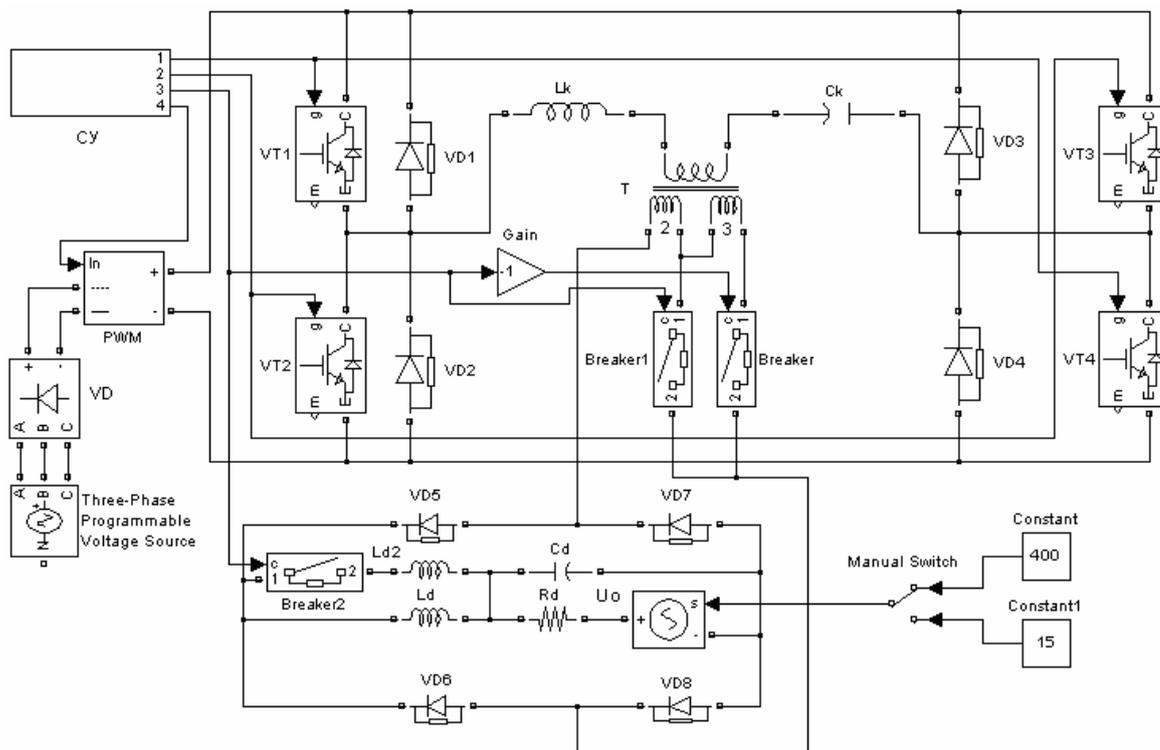


Рисунок 3 – Структурная схема имитационной модели источника ускоряющего напряжения с нагрузкой

Модель выполнена в пакете Matlab/Simulink с использованием элементов библиотеки Powersystem. Индуктивность рассеяния представлена отдельным блоком  $L_k$ , а процессы дугообразования моделируются резким изменением параметров схемы замещения нагрузки. В результате исследования были получены статические регулировочные характеристики для обоих режимов работы ИП, а так же установлено, что энергия короткого замыкания не превышает требуемой.

Разработанный ИП электродугового испарителя построен по схеме силовой части аналогичной той, что представлена на рис. 1. Отличие заключается в применении в качестве ключевых элементов инвертора тиристоров и отсутствии широтно-импульсного регулятора. Регулирование осуществляется изменением частоты работы инвертора. При допущении равенства мощностей потребленной преобразователем  $P_{пот}$  и переданной в нагрузку  $P_H$  выведены аналитические выражения для внешней динамической характеристики

$$P_{пот} = U_d I_d = 4U_d^2 \sqrt{\frac{C_k}{L_k}} = U_H I_H = P_H, \quad (1)$$

где  $I_d = 4U_d \sqrt{\frac{C_k}{L_k}}$  – выражение для нахождения величины тока в звене

постоянного тока;  $U_d$  – напряжение в звене постоянного тока.

$$U_H = \frac{4U_d^2}{I_H} \sqrt{\frac{C_k}{L_k}}, \quad (2)$$

где  $I_H, U_H$  – ток и напряжение нагрузки.

Таким образом, данная схема параметрически, вследствие естественной падающей характеристики, близка по свойствам к источнику тока и может обеспечить устойчивый режим системы источник питания – нагрузка. Динамическое сопротивление источника равно

$$R_{д.ист} = \frac{\partial U_H}{\partial I_H} = -\frac{4U_d^2}{I_H^2} \sqrt{\frac{C_k}{L_k}}. \quad (3)$$

Статические регулировочные характеристики выведены для ЭТК со следящей системой управления. Так как  $L_f \gg L_k$ , можно принять, что перезаряд дозирующего конденсатора осуществляется идеально сглаженным током. Это соответствует линейному изменению напряжения на выходе трансформатора. Тогда справедливо следующее уравнение

$$L'_f \frac{di'_H}{dt} = U'_T(t) - U'_H, \quad (4)$$

где  $U'_T(t) = 2U_d - \frac{2U_d}{t_{\Pi}} t$  – текущее значение выходного напряжения трансформатора приведенное к первичной цепи;  $t_{\Pi} = \frac{2U_d C_k}{I'_H}$  – время перезаряда коммутирующего конденсатора.

Интегрируя (4) и подставляя в полученное выражение значение времени соответствующие максимуму тока

$$t_m = \frac{(2U_d - U'_H)}{2U_d} t_{\Pi}, \quad (5)$$

получаем следующее выражение, пульсации тока в нагрузке

$$\Delta I'_H = \frac{C_k}{2L'_f} \frac{(2U_d - U'_H)^2}{I'_H}. \quad (6)$$

В установившемся режиме начальный ток нагрузки равен заданному току  $I'_H(0) = I'_3$ . Предполагая, что среднее и начальное значения тока нагрузки связаны между собой приближенным соотношением

$$I'_H = I'_H(0) + \Delta I'_H/2 = I'_3 + \Delta I'_H/2. \quad (7)$$

С учетом того, что пульсации тока определяются выражением (6), получаем следующие формулы для внешней характеристики и статической погрешности регулирования  $\Delta_{СТ}$  тока

$$I'_H = \frac{1}{2} \left( I'_3 + \sqrt{I_3^2 + \frac{C_k}{L'_f} (2U_d - U'_H)^2} \right); \quad (8)$$

$$\Delta'_{CT} = |I'_3 - I'_H| = \frac{1}{4} \frac{C_k}{L'_f} \frac{(2U_d - U'_H)^2}{I'_H}. \quad (9)$$

С целью подтверждения полученных закономерностей и более полного учета параметров реальных элементов была разработана имитационная модель системы ИП – ионный источник на основе дугового испарителя. Модель позволяет исследовать электромагнитные процессы в ИП с замкнутой системой регулирования. Полученные с ее помощью результаты позволяют подобрать оптимальные параметры элементов силовой схемы ИП.

На рис. 4 представлены полученные в ходе моделирования внешняя и регулировочная характеристики ИП с резонансным инвертором. Внешнюю характеристику можно условно разделить на три участка. На первом участке (а-б), ИП ведет себя подобно источнику напряжения. На втором участке (б-с) характеристика ИП резко падающая и сходна с характеристикой источника тока. На третьем участке (с-д) характеристики ИП подобны характеристике источника постоянной мощности. Таким образом, начиная со второго участка ИП присуще относительно большое отрицательное дифференциальное сопротивление, что позволяет говорить об устойчивой его работе в динамических режимах на разрядную нагрузку. Так же присутствие максимума на графике  $P_H$  подразумевает наличие оптимального режима ИП по энерговыделению и установленной мощности элементов.

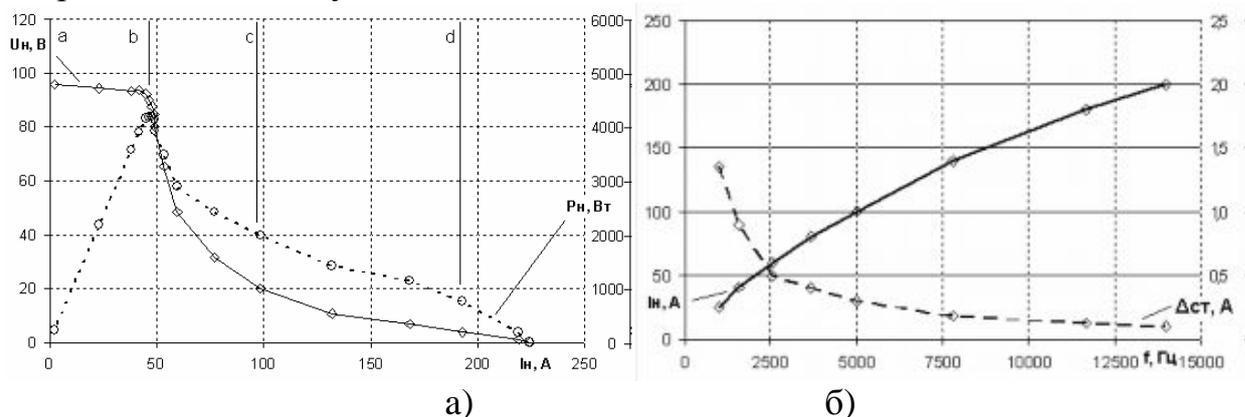


Рисунок 4 – Характеристики ИП электродугового испарителя. а) внешняя; б) регулировочная

Из регулировочных характеристик следует, что с уменьшением частоты следования импульсов ток нагрузки практически линейно падает. Это в свою очередь ведет к гиперболическому росту статической погрешности регулирования, что подтверждает (9). В заданном диапазоне регулирования (40 – 180 А) погрешность не превышает 3%.

**В третьей главе** исследуются электротехнологические комплексы, эквивалентная схема замещения нагрузки которых содержит конденсатор. К ним можно отнести ЭТК производства озона. Для исследования переходных процессов в комплексе была составлена расчетная схема (рис. 5) состоящая из звена постоянного тока  $U_d$  и  $R_d$ , резонансного инвертора  $VS_1 - VS_4$ ,  $VD_1 - VD_4$  и  $L_k$ , схем замещения трансформатора  $C_p$ ,  $L_M$ ,  $R_T$ ,  $L_S$  и нагрузки  $C_k$ ,  $C_{гр}$ ,  $VD_5 - VD_8$  и  $U_{г}$ .

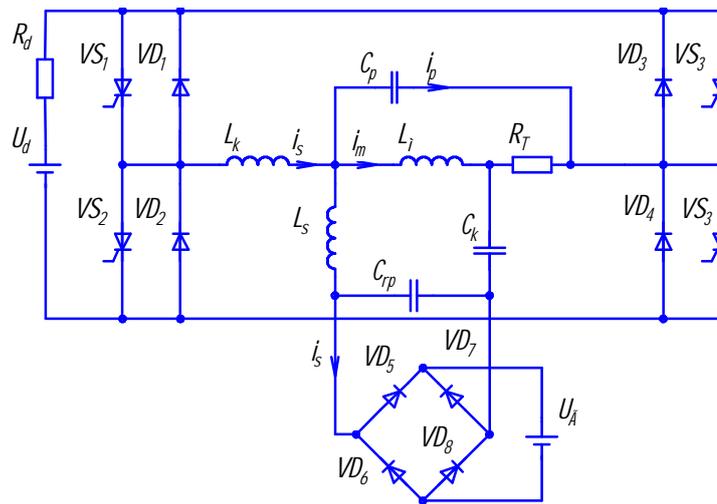


Рисунок 5 – Расчетная электрическая схема ЭТК производства озона

На основе уравнений составленных по расчетной схеме и допущений изложенных в диссертации получены выражения для параметров резонансного контура

$$C_k = \frac{P_H}{16\pi U'_r U_d f}; \quad (15)$$

$$L_k = \frac{U'_r U_d}{\pi f P_H}. \quad (16)$$

Для более подробного учета влияния параметров элементов ЭТК на протекающие в нем электромагнитные процессы была создана имитационная модель комплекса. Полученные в результате моделирования данные позволяют построить и сравнить регулировочные характеристики амплитудного и частотного регулирования (рис. 6).

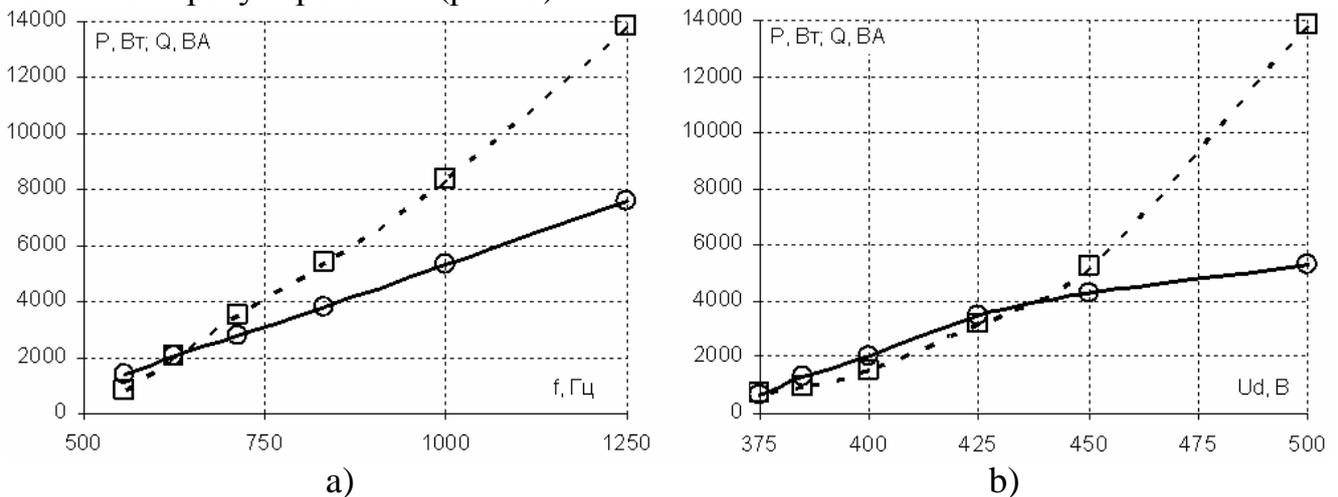


Рисунок 6 – Регулировочные характеристики

○ – активная мощность; □ – реактивная мощность.

Как видно из характеристик, с ростом частоты и напряжения увеличивается активная и реактивная мощности. При частотном регулировании обе величины изменяться практически линейно. При амплитудном регулировании увеличение активной мощности носит затухающий характер, а

реактивной ускоряющейся. Большое значение реактивной мощности приводит к увеличению токовой нагрузки полупроводниковых элементов, а нелинейный характер зависимостей усложняет управление. К тому же фазное регулирование управляемого выпрямителя неблагоприятно сказывается на электромагнитную совместимость с питающей сетью. Таким образом, частотное регулирование производительности генератора озона более рационально.

Для стабилизации выходного напряжения ЭТК и защиты установки от перегрузок разработан способ, основанный на применении свойств параметрического резонанса. ЭТК производства озона реализующий данный способ (рис. 7), состоит из последовательно соединенных выпрямителя 1, фильтра 2, резонансного инвертора напряжения со встречно включенными диодами 3, согласующего трансформатора с параметрическим возбуждением 4 и разрядной камеры 5.

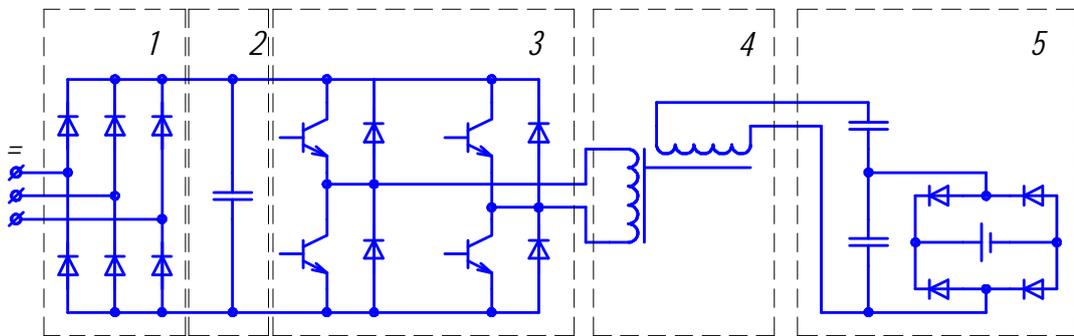


Рисунок 7 – ЭТК производства озона на основе трансформатора с параметрическим возбуждением

Преобразование энергии в примененном трансформаторе осуществляется за счет периодического изменения индуктивности обмоток, и для его работы необходимо наличие ёмкости, подключенной параллельно к его выходной цепи. В случае ЭТК производства озона роль этой ёмкости выполняет сам озонатор, что позволяет не использовать дополнительный конденсатор.

Для исследования электромагнитных процессов в комплексе и его электромагнитных свойств была составлена имитационная модель в пакете Matlab/Simulink представленная на рис. 8.

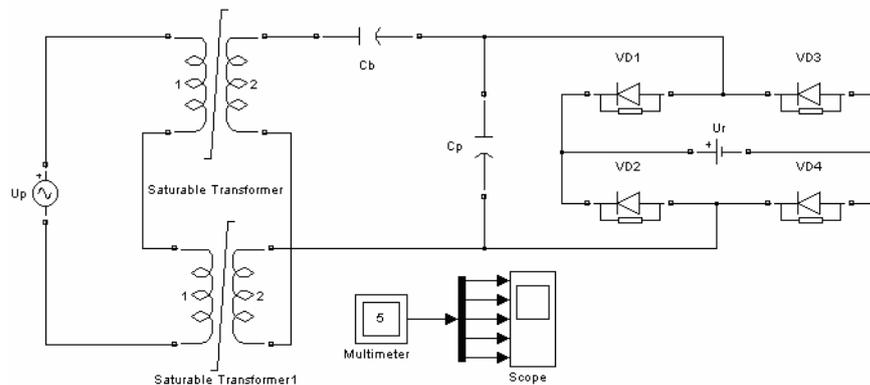


Рисунок 8 – Структурная схема имитационной модели ЭТК производства озона с применением трансформатора с параметрическим возбуждением

В модели преобразователь частоты представлен источником синусоидального напряжения частотой 1000 Гц; трансформатор с параметрическим возбуждением балансно-раздельного типа выполнен на основе двух стандартных моделей насыщающихся трансформаторов библиотеки Powersystem, первичные обмотки которых соединены последовательно, а вторичные встречно. Генератор озона в модели представлен схемой замещения.

На рис. 9 представлены результаты моделирования, позволяющие определить, что по мере возбуждения потоки в магнитопроводах смещаются относительно друг друга на  $\pi/2$ . Вследствие этого смещаются напряжения выходных обмоток, разность которых прикладывается к емкостям озонатора. Так как  $C_p \ll C_b$ , то вначале «быстро» перезаряжается емкость  $C_p$ . Когда заряд на ней достигает величины  $U_T$ , возникает разряд, и напряжения на зарядном промежутке перестает расти. Далее увеличение напряжения на озонаторе происходит за счет заряда емкости барьера.

На основе данной модели были также исследованы аварийные режимы работы комплекса и определен электромагнитный режим трансформатора с параметрическим возбуждением.

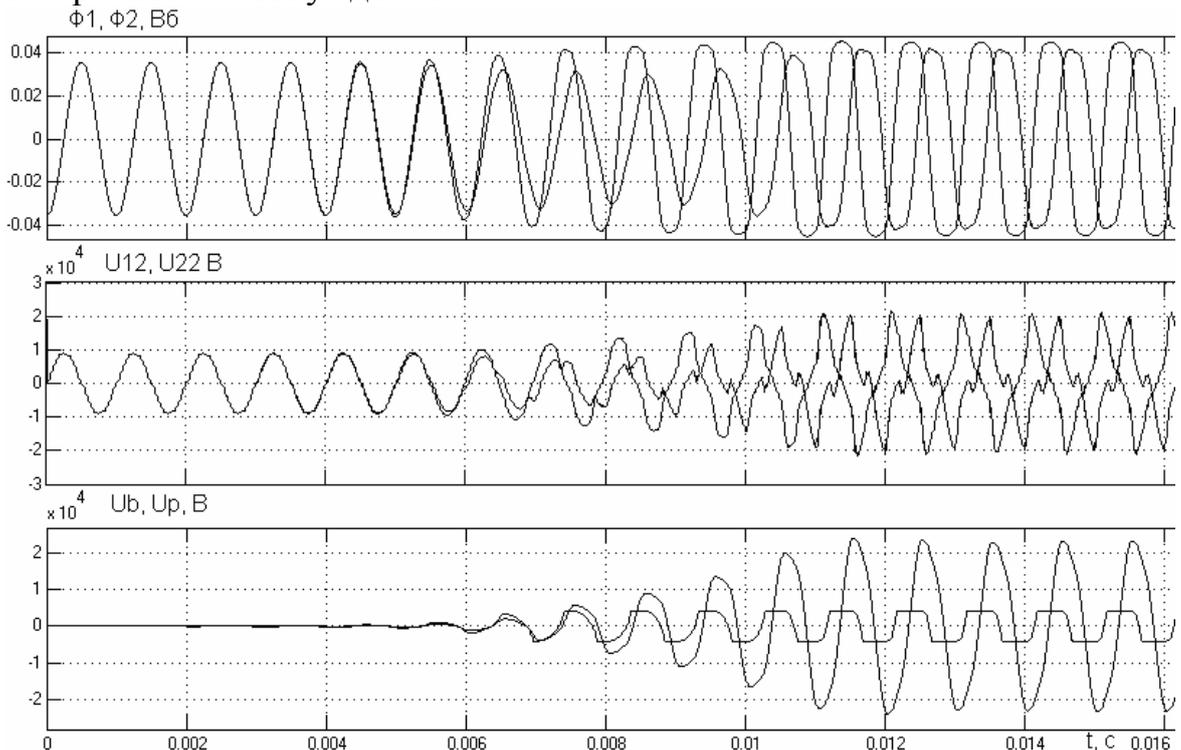


Рисунок 9 – Временные диаграммы магнитных потоков и напряжений в ЭТК производства озона в процессе с параметрического возбуждения

Для ряда импульсных технологий разработано зарядное устройство для ЭТК с емкостным накопителем энергии. Для данного комплекса построена расчетная схема аналогичная представленной на рис. 4, с тем отличием, что вместо ЭДС разряда  $U_T$  установлена емкость накопителя  $C'_N$ , и отсутствует  $C_{Гр}$ . На основе расчетной схемы составлена математическая модель.

Процесс увеличения напряжения на конденсаторе за половину периода

изменения тока при идеальном трансформаторе можно записать следующим образом:

$$\Delta U_{cn} \cdot \left( \int_0^{\pi} (U_d + U'_{cn}) \sin \omega t d\omega + \int_0^{\pi} (U_d + U'_{cn}) \sin \omega t d\omega \right) / (C'_n \cdot \rho \omega); \quad (17)$$

$$\Delta U'_{cn} = 4U_d C_k / C'_n,$$

Таким образом, приращение напряжения на накопительном конденсаторе не зависит от номера периода. Следовательно, напряжение линейно зависит от времени, и заряд происходит при постоянном токе. Среднее за период значение которого равно

$$I_{CP} = 4U_d / \pi \rho. \quad (18)$$

Действующее значение тока растет с увеличением времени

$$I_I = I_k \quad U_d \sqrt{1 + (8NC'_n / C_k)^2} / (\rho \sqrt{2}), \quad (19)$$

где N - номер периода.

В конце заряда

$$I_I = I_k = U_d / \rho. \quad (20)$$

При наличии трансформатора амплитуда тока заряда плавно растет, затем плавно убывает и при  $1,1U_d$  резко уменьшается и все диоды высоковольтного моста перестают открываться.

Увеличение напряжения на  $C'_N$  свыше  $U_d$  объясняется наличием параллельного контура  $L_m, C_p$ . Таким образом, присутствие трансформатора приводит к разделению процесса заряда на два этапа: первый проходит при несколько возрастающем токе, что в начале заряда является благоприятным. Второй этап соответствует убыванию амплитуды и при соответствующем выборе параметров трансформатора обеспечивается практическое постоянство потребляемой мощности. При этом увеличение напряжения  $\Delta U'_{cn}$  за цикл равно:

$$\Delta U'_{cn} = \sqrt{U'^2_{cn} + 2PT / C'_n} - U'_{cn} \quad U'_{c(n+1)} - U'_{cn}, \quad (21)$$

т.е. с ростом  $U'_{cn}$ ,  $\Delta U'_{cn}$  уменьшается и, следовательно, уменьшается амплитуда тока  $i_k$ .

Увеличение напряжения в течение второго этапа определяется из условия

$$U'^2_{c(n+1)} - U'^2_{cn} = 2PT / C'_n = const. \quad (22)$$

Таким образом, отсчитывая N от начала второго этапа

$$U'_{cn} = \sqrt{U'^2_{cn} + 2PT / C'_n}. \quad (23)$$

Как видим, рост напряжения  $U'_{cn}$  замедляется с ростом N.

Для подтверждения аналитических выражений и исследования частотного регулирования процесса заряда выполнено имитационное моделирование ЭТК с емкостным накопителем. В результате были получены временные зависимости заряда при различных  $\rho$ . Разработан рациональный закон регулирования заряда емкостного накопителя при котором, вначале заряд

производиться при постоянном среднем токе, а в конце при постоянном среднем напряжении, что позволяет добиться наибольших значений КПД и коэффициента использования установленной мощности установки.

**В четвертой главе** для проверки теоретических положений, изложенных в диссертации, проведено экспериментальное исследование на действующей ионно-вакуумной установке. В результате была подтверждена адекватность использованных в работе схем замещения нагрузки технологической установки, и сделан вывод о значительного снижении коэффициента пульсации при применении разработанных преобразователей, что позволяет повысить качество напыляемого покрытия.

Так же разработана методика расчета трансформатора с параметрическим возбуждением, позволяющая выбрать оптимальные электромагнитные и геометрические параметры согласующего параметрического трансформатора.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Создана схемотехническая модель источника питания с разрядно-импульсной нагрузкой позволяющая исследовать электромагнитные процессы в комплексе ряда электротехнологий путем подбора соответствующих элементов.

2. Разработаны ИП электродугового испарителя и источник укоряющего напряжения электротехнического комплекса для ионно-вакуумных технологий. Исследование с помощью имитационной модели источника ускоряющего напряжения показало: энергия короткого замыкания при образовании микродуг не превышает нескольких джоулей и значительно ниже порога повреждения изделия, коэффициент пульсаций укоряющего напряжения не превышает 3 %, что позволяет повысить качество наносимого покрытия.

3. Установлено: наличие у разработанного ИП дуговых испарителей вакуумной камеры естественной круто падающей внешней характеристики, способствует стабилизации дугового разряда; в заданном диапазоне регулирования 40 – 180 А статическая погрешность регулирования не превышает 3%, что повышает технологичность нанесения покрытия.

4. Предложен и исследован ИП ЭТК производства озона с согласующим трансформатором с параметрическим возбуждением, что позволяет стабилизировать выходные параметры установки и осуществить защиту от аварийных режимов. Выяснено, что для преобразования электроэнергии в энергию барьерного разряда рационально использовать резонансные явления в преобразователе частоты. Обоснован выбор частотного регулирования выходных параметров ЭТК.

5. Создано и зарегистрировано в РосАПО программное обеспечение по расчету переходных процессов в озонотенерирующей установке с трансформаторным параметрическим модулем, позволяющее исследовать электромагнитные режимы установки и выбрать параметры преобразователя и

трансформатора с параметрическим возбуждением (свидетельство о регистрации программ для ЭВМ №2008611353).

6. Предложен оригинальный способ стабилизации напряжения и защиты разрядно-импульсной установки (положительное решение от 18.09.08. по заявке № 2008103415 от 29.01.08). Разработанная методика расчета и проектирования модулей ИП генератора озона позволяет выбрать их оптимальные электромагнитные и геометрические параметры.

7. Проведены экспериментальные исследования, которые подтвердили адекватность применяемых схем замещения разрядно-импульсной нагрузки и выявили, что применение разработанных ИП для ЭТК ионно-вакуумной технологии позволяет объединить два источника ускоряющего напряжения и повысить качество напыляемого покрытия.

## **ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **В рецензируемом журнале из списка ВАК**

1. Исследование характеристик источников питания озонаторов на основе математических моделей / И.В. Блинов, К.Ю. Кузнецов, Д.А. Сосновский. // Вестник УГАТУ №1(26) Т. 10. Серия – Энергетика, 2008. – С. 161–165.

### **В других изданиях**

1. Особенности применения импульсного источника питания в составе АСУ ТП электролитно-плазменной обработкой / Е.В. Парфенов, Д.А. Сосновский // Гагаринские чтения: Материалы международной научно-молодежной конференции – М.: Изд. МАТИ, 2003. – С. 120.

2. Особенности электролитно-плазменного процесса и его вольт-амперные характеристики / Д.А. Сосновский // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник – Уфа. Изд УГАТУ, 2006. – С. 216-220.

3. Зарядное устройство емкостного накопителя энергии / Д.А. Сосновский, М.Р. Сулейманов // Современные техника и технологии: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых / Сборник трудов в 3-х томах. Т. 1. – Томск: Изд. ТПУ, 2007. – С.112-114

4. Выбор параметров источника питания повышенной частоты для генератора озона / Д.А. Сосновский // АСТИНТЕХ-2007: Материалы всероссийской научной конференции «Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности – Астрахань: Изд. «Астраханский университет», 2007. – Ч. 1.– С. 242-245.

5. Режимы работы источника питания для разрядно-импульсных технологий / Д.А. Сосновский // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник – Уфа. 2007. – С.43–47.

6. Математическая модель озоногенирующей установки с взаимно индуктивным параметрическим модулем / Д.А. Сосновский // Физико-математическое моделирование систем: Материалы международного семинара – Воронеж: 2007. Ч. 2. – С. 65 – 70.

7. Программа расчета переходных процессов в озоногенирующей установке с трансформаторным параметрическим модулем / Л.Э. Рогинская, Д.А. Сосновский / Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2008611353. – М.: РосАПО, 2008.

8. Источник ускоряющего напряжения для установок ионно-вакуумного напыления / Д.А. Сосновский // Гагаринские чтения: Материалы международной научно-молодежной конференции – М.: Изд. МАТИ, 2008. Т. 3. – С. 169-170.

9. Система стабилизации параметров барьерного разряда с помощью параметрического трансформатора / Д.А. Сосновский // Актуальные проблемы в науке и технике: Сборник статей всероссийской зимней школы-семинара аспирантов и молодых ученых – Уфа: «Издательство «Диалог», 2008. Т. 2.– 117-123.

10. Решение от 18.09.08 о выдаче патента на изобретение по заявке №2008103415 от 29.01.08. Парарезонансный способ стабилизации напряжения и защиты разрядно-импульсной установки и устройство для его реализации.

11. Электромагнитные процессы в источнике питания для ионно-плазменных вакуумных технологий / Д.А. Сосновский // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы: Межвузовский научный сборник Уфа: Изд. УГАТУ, 2008. – С. 220–225.

Соискатель

Сосновский Д.А.

Сосновский Денис Александрович

РЕЗОНАНСНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ  
ДЛЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЙ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 26.11.2008 г. Формат 60x84 1/16.  
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.  
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.- отт. 1,0. Уч.- изд. л. 0,9.  
Тираж 100 экз. Заказ № 569.

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