

На правах рукописи

Лаас Александр Рихардтович

**МНОГОДИСКОВЫЙ ИНДУКТОРНО-КОМПРЕССИОННЫЙ  
ГЕНЕРАТОР**

Специальность 05.09.01 – Электромеханика

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Томск – 2002

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Чучалин А.И.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Лукутин Б.В.  
кандидат технических наук, доцент  
Орлов Ю.А.

Ведущее предприятие: научно-производственный центр  
“Полус”, г. Томск

Защита состоится “ 19 ” июня 2002 года в 15 часов на заседании диссертационного совета К 063. 80. 01 Томского политехнического университета в актовом зале главного корпуса (634034, г. Томск, пр. Ленина, 30, ТПУ).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан “ \_\_\_ ” мая 2002 г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент \_\_\_\_\_ А.Е. Алехин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В связи с интенсивным развитием новых промышленных технологий, проведением научных исследований и электрофизических экспериментов увеличивается количество потребителей электроэнергии больших мощностей ( $10^4 - 10^{11}$  Вт), которые необходимо питать высоким переменным напряжением (порядка  $10^4$  В). К таким потребителям относятся озонаторные устройства для очистки воды и воздуха, лампы-вспышки для накачки лазеров, ускорители заряженных частиц, генераторы высокотемпературной плазмы, оборудование для электроэрозионной обработки металлов и другие устройства. Традиционно питание указанных потребителей осуществляется за счет преобразования напряжения первичных источников электроэнергии, таких как промышленная сеть или автономный электромашинный генератор.

Для преобразования параметров сетевого напряжения с помощью электромеханических устройств широкое применение в промышленности получили электромашинные преобразователи – двигатель-генераторные установки. Они могут быть выполнены в одном корпусе (двигатель и генератор в одном модуле), либо содержать отдельные машины (двигатель и генератор как отдельные модули). При одномодульной конструкции установка имеет меньшие массу и габариты и, следовательно, большие удельные энергетические показатели и более высокий КПД. Двухмодульная конструкция позволяет менять типы генераторов, получать различное сочетание характеристик выходной электроэнергии. Источник с такой схемой преобразования является наиболее простым с точки зрения технического исполнения, управления и обслуживания в период эксплуатации. Однако, возможность получения необходимых параметров электроэнергии на выходе двигатель-генераторных установок ограничена характеристиками известных генераторов. Иногда для получения необходимых параметров импульсов электрической энергии используют совместную работу электромашинного генератора и конденсаторной батареи.

Сравнивая источники в их стоимостном отношении по основным материалам (полупроводниковые приборы, электротехническая сталь, медь) можно отметить, что стоимость полупроводниковых приборов применяемых в схеме преобразователя выше стоимости активных частей генератора и двигателя. Для автономных источников электропитания мобильных установок существуют жесткие требования по массогабаритным характеристикам и надежности. В этом случае желательно исключить дополнительные элементы преобразования электроэнергии.

Потребители импульсной электроэнергии постоянно предъявляют возрастающие требования к импульсным источникам питания. Это определяет основные направления по исследованию и разработке нетрадиционных конструкций электромашинных импульсных генераторов и

усовершенствованию существующих. К таким направлениям можно отнести следующие:

- повышение абсолютных и удельных значений энергии и мощности электромашинных импульсных генераторов;
- обеспечение способности генерирования стабильных импульсов электроэнергии в частотном режиме работы;
- повышение частоты следования импульсов;
- программирование формы импульсов;
- повышение надежности электромашинных систем импульсного питания.

Проблема заключается в отсутствии в настоящее время автономных электромашинных источников электроэнергии эффективно работающих на активно-емкостную высоковольтную нагрузку.

Решение этой проблемы возможно путем совершенствования существующих или создания новых типов автономных электромашинных генераторов, способных удовлетворять возрастающие требования современных потребителей. Из электрических машин, пригодных к использованию в качестве высоковольтных высокочастотных источников энергии, наиболее приемлемыми являются бесконтактные синхронные и специальные электромеханические преобразователи – индукторно-компрессионные генераторы. Для питания потребителей с активно-емкостным характером нагрузки более предпочтительным являются многодисковые индукторно-компрессионные генераторы.

Возникает необходимость исследования и разработки новых конструкций электромашинных индукторных генераторов, способных обеспечить питание потребителей с активно-емкостным характером нагрузки высоким напряжением при высокой частоте. Их актуальность подтверждается включением темы: “Исследование принципов создания нетрадиционных электромеханических преобразователей энергии” в перечень научно-исследовательских работ Томского политехнического университета, финансируемых из государственного бюджета России в 1999–2003 гг. (тема № 7.21). Непосредственным исполнителем научных исследований и разработок является кафедра электрических машин и аппаратов, где выполнена настоящая диссертационная работа.

Целью настоящей работы является разработка и исследование многодискового индукторно-компрессионного генератора для питания потребителей импульсами электрической энергии при напряжениях порядка  $10^4$  В и частоте порядка  $10^2$  Гц.

В связи с этим решаются следующие задачи:

- обоснование возможности создания и эффективного использования многодискового индукторно-компрессионного генератора для питания потребителей в указанных режимах;
- разработка конструкции многодискового индукторно-компрессионного генератора;

- выбор соотношений основных размеров, конструктивных параметров и электромагнитных нагрузок генератора;
- расчет электромагнитных параметров многодискового индукторно-компрессионного генератора;
- разработка математической модели для расчета переходных процессов, рабочих режимов и основных характеристик генератора;
- проведение комплекса теоретических исследований для определения оптимальных соотношений параметров генератора и нагрузки, энергетических характеристик с учетом тепловых ограничений;
- проектирование и изготовление опытного образца многодискового индукторно-компрессионного генератора для экспериментальной проверки результатов теоретических исследований;
- испытания и проведение комплекса экспериментальных исследований параметров и характеристик генератора.

#### Методы исследования.

1. Сравнительный анализ существующих электромашинных генераторов дискового типа по основным энергетическим характеристикам.
2. Расчет параметров многодискового индукторно-компрессионного генератора на основе схемы замещения для магнитной цепи.
3. Расчет электромагнитных переходных процессов и рабочих режимов на основе численного решения системы дифференциальных уравнений.
4. Тепловой расчет генератора на основе эквивалентных схем замещения с сосредоточенными параметрами. Расчет переходного процесса нагрева генератора на основе численного решения системы дифференциальных уравнений.
5. Оценка достоверности результатов теоретических исследований путем сравнения их с результатами экспериментальных исследований опытного образца генератора.

#### Научная новизна работы.

1. Теоретически обоснована возможность создания и эффективного использования многодискового индукторно-компрессионного генератора для импульсного питания потребителей при напряжениях порядка  $10^4$  В и частоте порядка  $10^2$  Гц.
2. Разработана новая конструкция многодискового индукторно-компрессионного генератора. Новое техническое решение подтверждено авторским свидетельством № 1307855, кл. H02K 25/00.
3. Разработана математическая модель для расчета переходных процессов, рабочих режимов и основных характеристик генератора с учетом тепловых ограничений.
4. Получены новые результаты теоретических и экспериментальных исследований генератора.

### Практическая ценность.

1. Сформулированы рекомендации по проектированию многодискового индукторно-компрессионного генератора.

2. Определены оптимальные соотношения параметров генератора и нагрузки активно-емкостного характера, обеспечивающие максимальные энергетические характеристики.

3. Разработаны алгоритмы и компьютерные программы для расчета параметров, переходных процессов и рабочих режимов многодискового индукторно-компрессионного генератора, которые могут быть использованы для проведения широкого круга научных исследований и решения задач проектирования генераторов.

### Реализация результатов работы.

Результаты исследований многодискового индукторно-компрессионного генератора были использованы при разработке и создании опытного образца генератора (НПО "Сибэлектромотор", НИИ АЭМ, ЭПМ ТПУ - г. Томск, АП "ЭЛСИБ" - г. Новосибирск) для частотной зарядки емкостного накопителя в системе питания технологического ускорителя по заданию НИИ ВН при ТПУ.

### Апробация.

Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались, обсуждались и получили одобрение на следующих конференциях:

- VIII научно-техническая конференция НПО «Полюс», Томск, 1987;
- II научно-техническая конференция «Устройства и системы автоматики автономных объектов», Красноярск, 1990.;
- XIV научно-техническая конференция, Томск, НИИЭМ, 1990;
- Международный симпозиум по электромеханике, Екатеринбург, 1991;
- VII международной научно-практической конференции молодежи и студентов «Современные техника и технология» (г. Томск, 2001г.);
- Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, Россия, 2001;
- The 5<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS'01), Tomsk, TPU, Russia, 2001;
- научных семинарах кафедры «Электрических машин и аппаратов» Томского политехнического университета (г. Томск, 1990–2002 гг.);

### Публикации.

По результатам проведенных теоретических исследований опубликовано в научно-технических изданиях 12 научных работ.

### Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, четырех глав и заключения, содержащих 155 страниц машинописного текста, 2 таблицы и 71 рисунка, списка литературы из 82 наименований и приложения.

Во введении обоснована актуальность проводимых исследований, сформулирована цель диссертационной работы, основные задачи, научная новизна и практическая ценность исследований, приведена краткая аннотация диссертации по разделам.

В первой главе рассматриваются вопросы создания высоковольтного электромашиного источника питания, обладающего высокой удельной мощностью. Проведен анализ различных конструктивных решений дисковых электрических машин. Определены основные области применения, проанализированы достоинства и недостатки различных генераторов. Описана конструкция и принцип действия многодискового индукторно-компрессионного генератора, которая наиболее полно отвечает требованиям питания высоковольтных потребителей электроэнергии.

Определены основные области применения, проанализированы достоинства и недостатки отдельных генераторов, на основании которых установлено следующее:

1) для получения высокого напряжения целесообразно использовать машину индукторного типа, в которой можно обеспечить качественную электрическую изоляцию высоковольтных обмоток за счет использования сосредоточенных катушечных групп;

2) вращающиеся части генератора предпочтительно выполнить пассивными, что повышает механическую прочность и технологичность изготовления машины, и как следствие возможность работы генератора на повышенных частотах вращения, что необходимо для получения требуемого диапазона частоты напряжения;

3) для получения напряжения высокой частоты и повышения мощности источника энергии целесообразно использовать многоазорную машину дисковой конструкции с аксиальным магнитным полем. При этом обеспечивается возможность изготовления машины с большим количеством полюсов при сохранении высокой кратности изменения индуктивностей обмоток.

Основываясь на этих выводах представляется возможным разработать индукторный генератор дискового типа для питания потребителей электроэнергией при высоких напряжениях и частоте.

Упрощенная компоновка генератора представлена на рис.1. Генератор состоит из двух идентичных дисков с системой возбуждения (1), расположенных по торцам и служащих одновременно подшипниковыми щитами, шести идентичных дисков ротора (2), напрессованных на вал (4) и пяти идентичных дисков статора (3). Диски статора и ротора расположены соосно поочередно. Вся система дисковых элементов базируется на монтажной плите (5).

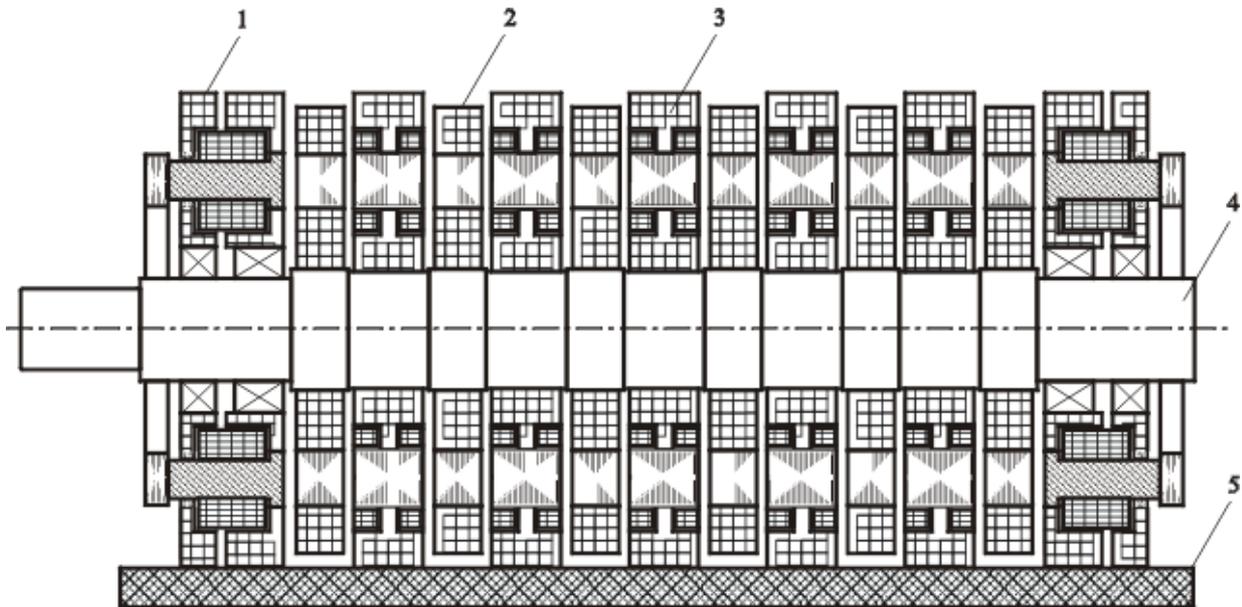


Рис. 1. Общая компоновка генератора.

Диск статора в целях технологичности сборки генератора разделен по линии разреза "А–А" на две части и представляет собой диск, изготовленный из высокопрочного изоляционного материала (стеклотекстолита), в котором расположены шихтованные ферромагнитные полюса с размещенными вокруг них с обеих сторон диска катушками рабочей статорной обмотки. Дисковый элемент ротора также изготовлен из высокопрочного изоляционного материала. На нем размещены шихтованные ферромагнитные полюса, аналогичные статорным. Между полюсами для обеспечения максимального вытеснения основного магнитного потока в воздушный зазор и уменьшения проводимости рабочего зазора при вращении ротора, расположены токопроводящие вставки, работающие по принципу демпферной обмотки.

Полюса обмотки возбуждения выполнены и установлены таким образом, что совместно с полюсами якоря и роторных дисков, в случае соосного расположения, обеспечивают высокую проводимость магнитному потоку при его прохождении в аксиальном направлении и образуют непрерывную магнитную систему.

Принцип действия генератора основан на сочетании индукторного принципа создания ЭДС в рабочей обмотке статора с изменением магнитного потока за счет различных магнитных проводимостей воздушного зазора, встречающихся на пути этого потока и индуктивностей обмоток машины.

Магнитный поток в воздушном зазоре образуется обмоткой возбуждения, обтекаемой постоянным током. Направление магнитного потока показано на рис.2. Переменная ЭДС рабочей обмотки на холостом ходу создается в результате изменения ее потокосцепления  $\Psi_a$  за счет переменной взаимной индуктивности  $M_{ab}$  с обмоткой возбуждения, запитанной постоянным током

$$e_a = -\frac{d\Psi_a}{dt} = -i_b \frac{dM_{ab}}{dt},$$

где  $\frac{d\Psi_a}{dt}$  - скорость изменения потокосцепления относительно рабочей обмотки при вращении ротора.

Следует отметить, что изменение  $M_{ab}$  в широких пределах обусловлено значительной разницей проводимостей основному магнитному потоку, созданному МДС обмотки возбуждения. При равномерном вращении ротора магнитная проводимость воздушного зазора периодически меняется, в связи с неоднородностью магнитных участков ротора.

Магнитный поток в воздушном зазоре периодически изменяет свою величину от  $\Phi_{\max}$  (максимум  $M_{ab}$ ) при совпадении осей полюсов статора и ротора (рис.2а), до  $\Phi_{\min}$  (минимум  $M_{ab}$ ), когда оси полюсов статора и вставки между полюсами ротора совмещены (рис.2б). В этом случае магнитный поток, в основном, замыкается по путям потоков рассеяния обмоток  $\Phi_{\sigma}$ . Обмотка якоря пронизывается потоком, который периодически изменяет свою величину с изменением проводимости воздушного зазора. Следовательно, в ней наводится переменная ЭДС. Поток в воздушном зазоре машины состоит из постоянной и переменной составляющих. Переменная составляющая создает ЭДС в рабочей обмотке. Постоянная составляющая магнитного потока возбуждения не принимает участия в основных процессах электромагнитного преобразования энергии, что является одним из главных недостатков индукторных машин.

Генератор работает на активно-реактивную нагрузку. Принципиальная схема генератора (рис.3.) включает Др.-дрессель, в-обмотку возбуждения, П-явновыраженные ферромагнитные полюса ротора, Э- токопроводящие вставки (демпферы). а-рабочую обмотку генератора, К-коммутирующий аппарат, Нагр.-нагрузку.

В отличие от классических синхронных машин в индукторных машинах магнитная индукция в любой точке воздушного зазора (активная зона) изменяется только по значению, не меняя знака. Соотношение между частотой ЭДС рабочей обмотки  $f = 1/T$ , где  $T$  - период ЭДС, частотой вращения статора  $n$  (об/мин) и числом пар полюсов  $p$  имеет вид  $f = \frac{2pn}{60}$  (Гц).

Генератор эффективно работает на активно-емкостную нагрузку, что подтверждает правильность выбора его конструкции и принципа действия при решении поставленных задач. Далее выполнен комплекс исследований генератора при работе на активно-емкостную нагрузку.

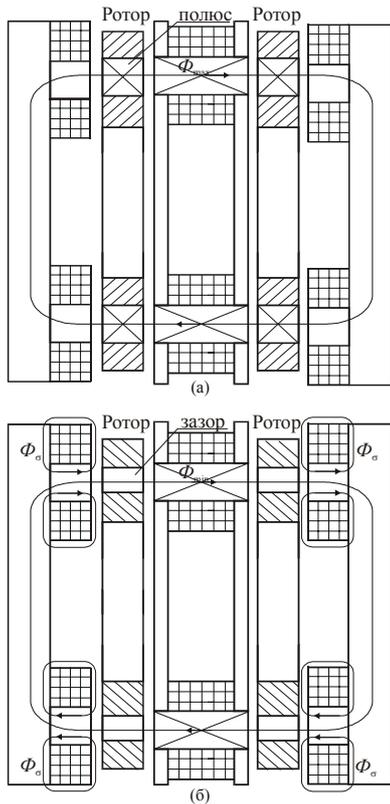


Рис.2. Направление магнитного потока.

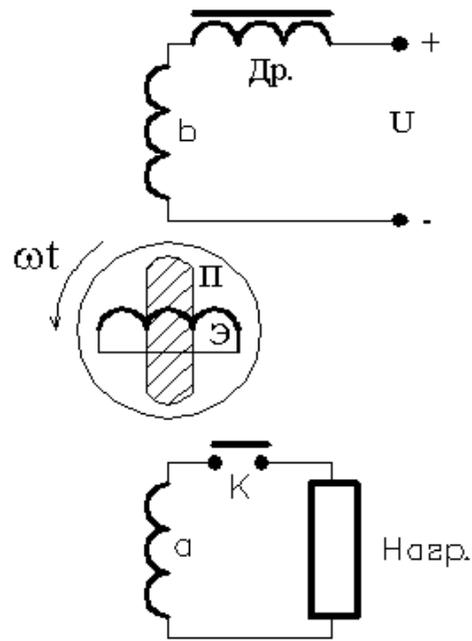


Рис.3. Электрическая схема

Во второй главе использован метод математического моделирования переходных и установившихся процессов. На основе математической модели проведено качественное и количественное сравнение характеристик генератора при работе на активную, емкостную и активно-емкостную нагрузки. Показано, что индукторно-компрессионный генератор предложенной конструкции можно эффективно использовать при работе на нагрузку с емкостным и активно-емкостным характером.

Разработана методика расчета параметров генератора на основе схем замещения для магнитной цепи. Создана математическая модель для расчета переходных процессов и рабочих режимов на основе электрической схемы замещения генератора с сосредоточенными параметрами путем численного решения системы дифференциальных уравнений. На основе полученных данных рассчитаны основные энергетические характеристики генератора при работе на активную, емкостную и активно-емкостную нагрузку с постоянной частотой вращения.

С использованием математической модели выполнен комплекс исследований генератора при работе на активную, емкостную и активно-емкостную нагрузку с постоянной частотой вращения ротора  $n = 3000$  об/мин,  $f = 400$  Гц. В качестве примера приводится расчет генератора с диаметром активной зоны  $D = 0,33$  м, числом полюсов  $2p = 8$ , напряжением возбуждения  $U_b = 60$  В,

определенном из расчета магнитной цепи и обеспечивающем номинальную индукцию в воздушном зазоре  $B\delta=0,8 \text{ Тл}$ . Соотношение чисел витков рабочей обмотки и обмотки возбуждения выбраны из условия размещения катушек на заданном диаметре  $D_e$  при минимальном значении линейной нагрузки. Ограничение при расчете соответствуют плотности тока  $J = 5 - 6 \text{ А/мм}^2$  и напряжению на рабочей обмотке  $U_\phi = 40 - 50 \text{ кВ}$ , которые приняты исходя из класса нагревостойкости  $F$  и электрической прочности изоляции. Следует отметить, что обеспечение максимальных энергетических характеристик индукторного генератора зависит в большей степени от полного внутреннего сопротивления и сопротивления внешних цепей генератора, которые должны быть оптимальным образом согласованы.

В качестве критерия для определения согласованной нагрузки выберем максимум средней активной мощности нагрузки. На основании полученных результатов определена согласованная нагрузка, которая при средней активной мощности  $P_n=26 \text{ кВт}$  составляет  $R_n=5 \text{ кОм}$  при напряжении на нагрузке  $32 \text{ кВ}$ . Ток в нагрузке составляет  $2,25 \text{ А}$ . Коэффициент полезного действия при продолжительном режиме составляет  $KПД=0.7$ . Генератор обеспечивает импульсную мощность  $205 \text{ кВт}$  при энергии импульса  $65 \text{ Дж}$ .

Проведен комплекс вычислительных экспериментов индукторно-компрессионного генератора при работе на емкостную нагрузку. В качестве критерия для определения согласованной нагрузки выберем максимум средней реактивной мощности нагрузки. Значение максимальной средней реактивной мощности, выделившейся в нагрузку составляет  $34 \text{ кВт}$  при согласованной емкостной нагрузке  $60 \text{ нФ}$ . Напряжение на согласованной емкости составляет  $52 \text{ кВ}$ . За один импульс в согласованную нагрузку передается  $82 \text{ Дж}$  электрической энергии. Ток заряда конденсатора составляет  $2,25 \text{ А}$ .

Следует отметить повышение эффективности работы индукторно-компрессионного генератора на емкостную нагрузку по сравнению с работой генератора на активную нагрузку. Средняя мощность генератора, выделившаяся в нагрузку емкостного характера составляет  $34 \text{ кВт}$ , на активной нагрузке  $26 \text{ кВт}$ . Коэффициент полезного действия при работе генератора на емкость увеличился до  $75\%$ . Энергия, переданная в емкостную нагрузку за один импульс составляет  $82 \text{ Дж}$ , в активную нагрузку –  $65 \text{ Дж}$ . Повышение энергетических характеристик генератора связано с возникновением эффектов резонанса в системе индукторно-компрессионный генератор-нагрузка.

Принимая во внимание, что чисто активная и чисто емкостная нагрузки встречаются редко необходимо провести вычислительные эксперименты при работе индукторно-компрессионного генератора на активно-емкостную нагрузку.

Следует отметить, что обеспечение максимальных энергетических характеристик индукторного генератора зависит от соотношения полного внутренне-

го сопротивления и сопротивления внешних цепей генератора, которые должны быть оптимальным образом согласованы.

Из графиков (рис.4–9) следует, что максимальное значение мощности  $P_{n\max} = 17,0 \text{ кВт}$  достигается при активном сопротивлении  $R_n = 3 \text{ кОм}$  для  $\cos \varphi = 0,8$ , которому соответствуют коэффициент полезного действия  $\eta = 0,73$  и напряжение на рабочей обмотке  $U_\phi = 55 \text{ кВ}$ .

Индукторно-компрессионный генератор с селективно-пассивным экранированием генерирует высокое напряжения при высокой частоте. Потребителями такой энергии могут быть промышленные озонаторы коэффициент загрузки которых составляет  $\cos \varphi = 0,4 - 0,6$ .

Анализ энергетических характеристик генератора показал, что при работе на активно-емкостную нагрузку в диапазоне изменения коэффициента мощности  $\cos \varphi = 0,2 - 0,8$  согласованное сопротивление активной нагрузки составляет  $2-3 \text{ кОм}$  (рис.6.), ток нагрузки  $2-2,5 \text{ А}$  (рис.7.). В диапазоне  $\cos \varphi = 0,4 - 0,6$ , характерном для промышленных озонаторов, средняя активная мощность составляет  $8-13 \text{ кВт}$  (рис.6.) при напряжении на активной составляющей  $15-20 \text{ кВ}$  (рис.5.). Коэффициент полезного действия при этом достигает  $60\%$  (рис.8.), а импульсная энергия, выделяющаяся в активной нагрузке составляет  $35-50 \text{ Дж}$  (рис.9.).

В третьей главе разработана методика расчета переходных и установившихся процессов нагрева обмоток и конструктивных элементов индукторно-компрессионного генератора дискового типа на основании которой проведены исследования по допустимому времени работы генератора в продолжительном режиме с учетом тепловых ограничений при постоянной частоте вращения ротора. Выполнено математическое моделирование электромагнитных процессов и определены удельные энергетические характеристики генератора при работе на активно-емкостную нагрузку в различных режимах с учетом тепловых ограничений. Установлены оптимальные соотношения параметров генератора и нагрузки, при которых электромашинный индукторный генератор работает наиболее эффективно.

Исследования показали, что с учетом тепловых ограничений максимальная средняя мощность генератора при работе на активную нагрузку в установившемся режиме составляет  $P_n \approx 16,0 \text{ кВт}$  и на емкостную нагрузку в установившемся режиме составляет  $P_n \approx 19,0 \text{ кВт}$ .

При работе генератора в кратковременном режиме на активную нагрузку при активной мощности генератора  $P_n = 26,0 \text{ кВт}$ , максимально допустимая температура  $Q_m = Q_{дон} = 130 \text{ }^\circ\text{C}$  (класс изоляции В) достигается за время  $t_{нагр} = 45 \text{ сек.}$  и остывает до температуры окружающей среды за время  $t_{охл} = 17 \text{ мин.}$  Проведя ряд расчетов на полученной математической модели были определены

необходимые условия работы генератора в кратковременном режиме с учетом тепловых ограничений в соответствии с требованиями заказчика.

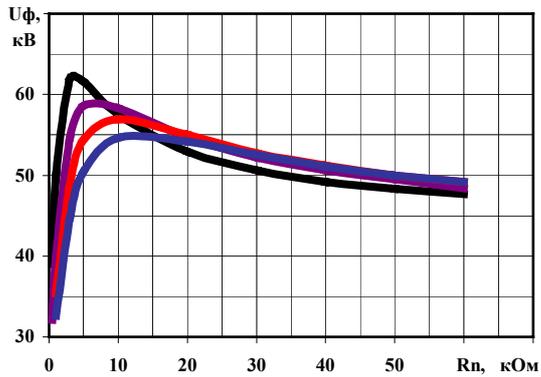


Рис.4. Активно-емкостная нагрузка,  $U_{\phi}=f(R_n)$

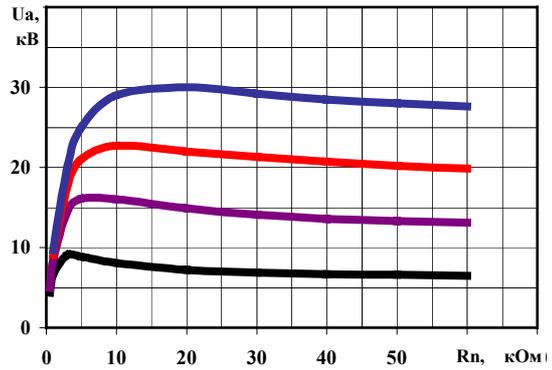


Рис.5. Активно-емкостная нагрузка,  $U_a=f(R_n)$

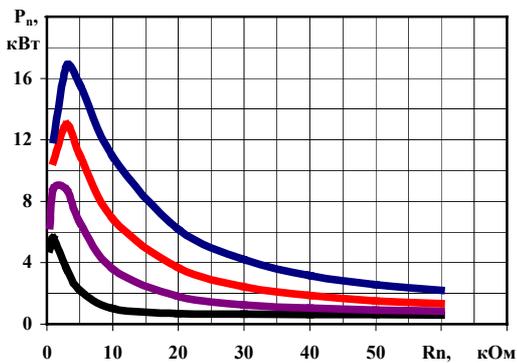


Рис.6. Активно-емкостная нагрузка,  $P_n=f(R_n)$

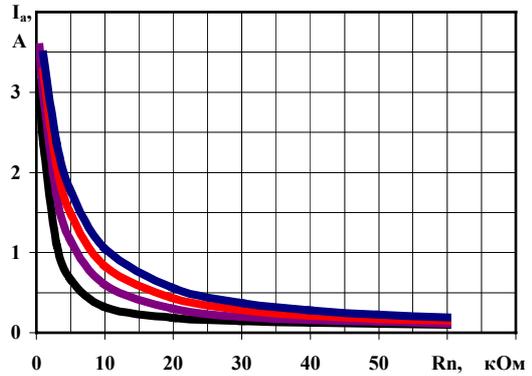


Рис.7. Активно-емкостная нагрузка,  $I_a=f(R_n)$

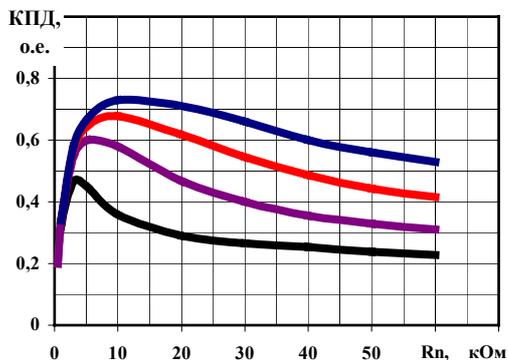


Рис.8. Активно-емкостная нагрузка,  $\eta=f(R_n)$

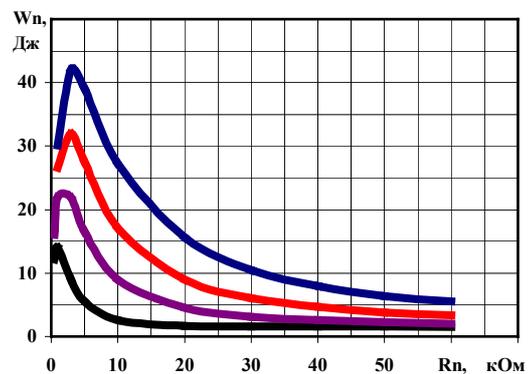


Рис.9. Активно-емкостная нагрузка,  $W_n=f(R_n)$

При повторно-кратковременном режиме работы на активную нагрузку значение активной мощности генератора составляет  $P_n = 26,0$  кВт при этом максимально допустимая температура  $130$  °С достигается примерно через 20 минут с временем работы  $t_{нагр} = 10$  сек. и паузы  $t_{охл} = 35$  сек.

В четвертой главе описана конструкция экспериментального образца индукторно-компрессионного генератора дискового типа, разработанного и изготовленного на основе теоретических исследований. Приведены результаты экспериментальных исследований генератора: определены параметры генератора (активные и индуктивные сопротивления генератора), генератор испытан при стационарном возбуждении для различных сопротивлений нагрузки. Получены экспериментальные кривые изменения токов и напряжений во времени при различных видах нагрузки. Определены энергетические характеристики при работе генератора на согласованную нагрузку. Проведено сравнение полученных теоретических и экспериментальных характеристик генератора.

Фрагменты статора и ротора экспериментального образца генератора показан на рис.10.



Рис.10. Фрагмент активной зоны модуля ротора и статора

Измерение активного сопротивления статорной обмотки генератора осуществлялось измерительным мостом постоянного тока. Омическое сопротивление генератора составило  $r_a = 1,57$  кОм. Определение кривой изменения индуктивности обмоток проводилось измерительным прибором  $\Phi 4320$ , который осуществляет измерения на переменном токе частотой  $f = 1000$  Гц, вырабатываемой встроенным в прибор генератором. Минимальное измеренное значение индуктивности обмотки статора, соответствующее полному экранированию рабочей обмотки демпферной системой ротора, составляет  $L_{a\min} \approx 2$  Гн (расчетное значение  $L_{a\min} = 2,1$  Гн). Максимальная индуктивность определялась с помощью дополнительно изготовленной модели. При максимальной индуктивности рабочей обмотки при совпадении магнитных осей полюсов роторных и статорных

дисков составляет  $L_{amax} \approx 21 \text{ Гн}$  (расчетное значение  $L_{amax} = 21,75 \text{ Гн}$ ). Кратность изменения индуктивности рабочей обмотки  $K_L = 10,5$ .

На рис. 11. показан характер изменения индуктивности в зависимости от углового положения ротора.

Испытания импульсного генератора в динамике проводились при работе генератора в частотном режиме на нагрузку различного характера. Результаты получены при номинальной частоте вращения ротора генератора  $n = 3000$  об/мин. Для регистрации характера изменения токов в обмотке возбуждения и рабочей обмотке, также выходного напряжения генератора используется электронно-лучевой осциллограф СІ-74. В лабораторных условиях были определены статические параметры генератора и получены качественные осциллограммы переходных процессов. Энергетические характеристики получены в условиях лабораторий НИИ ВН, где и испытывался данный генератор.

На рисунке 12 показаны экспериментальные осциллограммы тока возбуждения  $i_b$  и ЭДС рабочей обмотки  $e_a$  при работе генератора на холостом ходу.

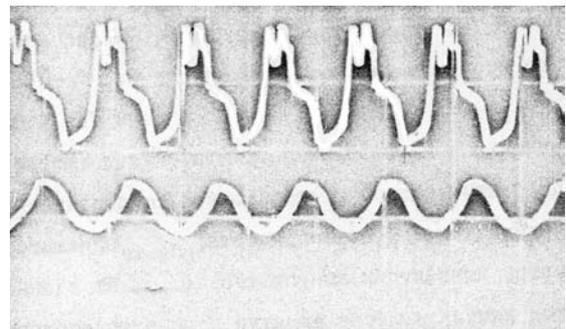
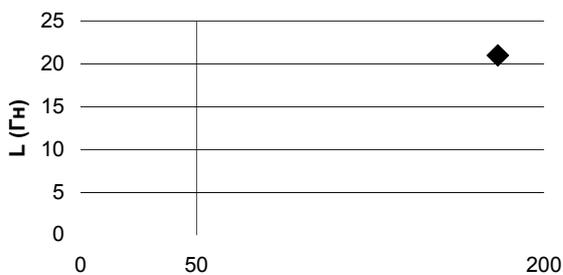


Рис.11. Экспериментальная кривая изменения индуктивности генератора

Рис.12. Осциллограммы ЭДС обмотки статора и тока возбуждения генератора на холостом ходу

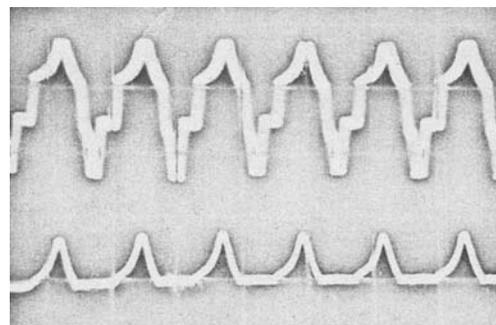
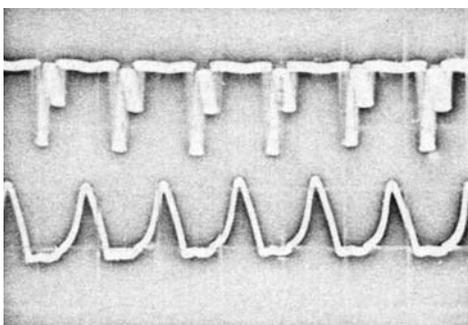


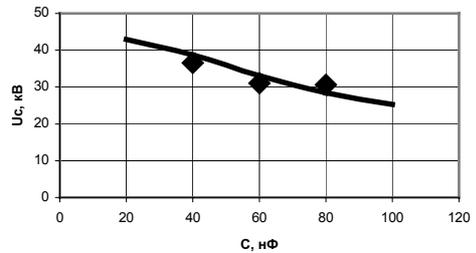
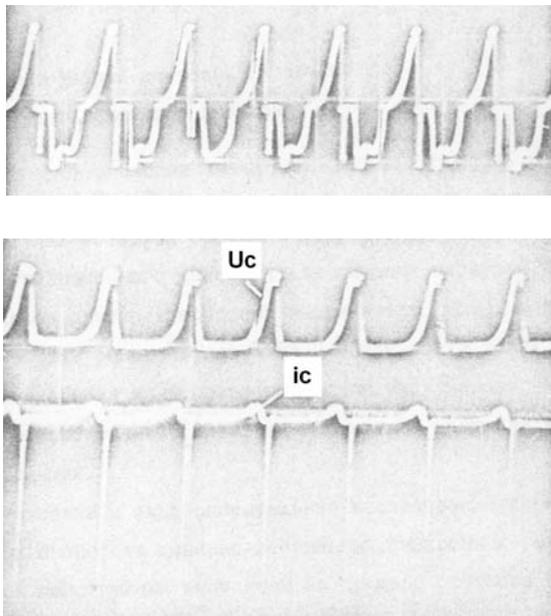
Рис.13. Осциллограммы переходных процессов при работе генератора в режиме короткого замыкания

Рис.14. Осциллограммы переходных процессов при работе генератора на согласованную нагрузку

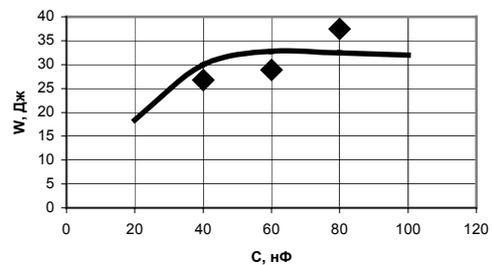
На рис. 13 представлены экспериментальные осциллограммы напряжения

нагрузки  $U_n$  (верхний луч) и тока генератора  $I_g$  (нижний луч) в режиме короткого замыкания. Как видно из осциллограммы, импульсный генератор с селективно-пассивным экранированием осуществляет генерирование стабильных импульсов импульсов тока.

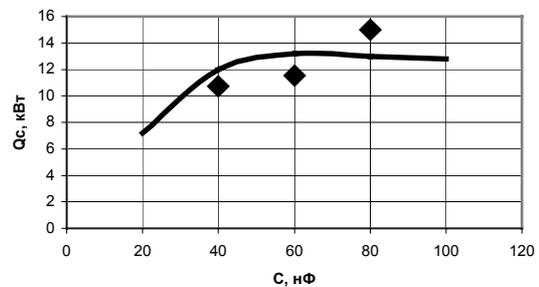
Характер изменения напряжения  $U_n$  (верхний луч) и тока нагрузки  $I_n$  (нижний луч) при работа генератора на согласованную активную нагрузку показан на рис. 14.



$$U_c = f(C)$$



$$W = f(C)$$



$$c = f(C)$$

Q

Рис.15. Осциллограммы переходных процессов

Рис.16. Энергетические характеристики индукторно-компрессионного генератора

На рисунке 15 представлены осциллограммы ЭДС рабочей обмотки  $e_a$ , напряжения  $U_c$  и тока  $i_c$  при работе генератора в периодическом режиме с зарядом емкостного накопителя и последующим его разрядом на каждом периоде с частотой 400 Гц.

Испытания индукторного генератора в динамике проводились при работе генератора в продолжительном режиме на нагрузку активного и активно-емкостного характера. Результаты получены при номинальной частоте вращения ротора генератора  $n = 3000$  об/мин.

На рисунке 16 представлены результаты расчета и экспериментальных исследований характеристик высоковольтного индукторно-компрессионного генератора при частоте вращения ротора  $3000$  об/мин и индукции возбуждения  $B_{\delta 0} = 0.5$  Тл. Графики показывают результаты, полученные расчетным путем, а точки – результаты экспериментов.

Результаты показывают, что при согласованной нагрузке  $C = 60$  нф,  $X_c \approx 2 * Z_{amin}$ , где  $X_c = 1/\omega C \approx 6,63$  кОм,  $Z_{amin} = \sqrt{(\omega L_A^{min})^2 + r_A^2} \approx 5$  кОм при  $\omega = 2\pi f = 2512$  с<sup>-1</sup>,  $f = 400$  Гц достигается максимальная энергия  $W$ , передаваемая в нагрузку за один импульс. Средняя мощность нагрузки  $P_{ncp} = W/T$  при работе генератора в периодическом режиме с максимальной частотой следования зарядных импульсов  $f$  ( $T = f^{-1} = 2,5$  мс).

Расчетная средняя мощность генератора при работе в длительном режиме составляет  $P_{ncp} \approx 10$  кВт. При массе генератора  $m_{г} \approx 150$  кг удельная средняя мощность составляет  $P_{ncp}/m_{г} \approx 0,066$  кВт/кг.

Результаты экспериментальных исследований в целом согласуются с данными расчетов в пределах допустимой погрешности и подтверждают способность эффективной работы электромашинных импульсных генераторов дискового типа с селективно-пассивным экранированием. Это доказывает адекватность математической модели и перспективы использования высоковольтного электромашинного индукторного генератора дискового типа для питания активно-емкостной нагрузки.

Заключение. В соответствии с целью и задачами диссертационной работы проведены теоретические и экспериментальные исследования многодискового индукторно-компрессионного генератора, предназначенного для работы в продолжительных режимах на активно-емкостную нагрузку. Основными результатами научных исследований, выполненных автором, являются:

1. На основе сравнительного анализа конструктивных и схемных решений определены достоинства и недостатки электромашинных импульсных генераторов с различными принципами экранирования.

Генераторы с селективно-пассивным экранированием способны обеспечить в частотном режиме питание потребителей стабильными импульсами мощности. При селективно-пассивном экранировании имеет место удвоение частоты и возможности программирования формы генерируемых импульсов тока в нагрузке. Скользящие контакты в силовой цепи отсутствуют, что дает возможность получать высокое напряжение.

2. Разработана конструкция многодискового индукторно-компрессионного генератора средней мощности с селективно-пассивным экранированием для использования в качестве источника питания потребителей с активно-емкостной нагрузкой стабильными импульсами напряжением  $10^4$  кВ частотой  $10^2$  Гц.

3. Разработана методика расчета параметров индукторно-компрессионного генератора дискового типа. Создана математическая модель для расчета электромагнитных процессов и энергетических характеристик генератора в продолжительном режиме на основе совместного численного решения дифференциальных уравнений электрического равновесия и электромагнитных связей обмоток.

4. На математической модели проведены исследования восьмиполюсного электромашинного индукторно-компрессионного генератора дискового типа с диаметром активной зоны 0,33 м при частоте вращения ротора 3000 об/мин. Определено согласованное сопротивление активной нагрузки 5 кОм, при котором достигается максимальное значение средней мощности 26 кВт при напряжении 32 кВ, КПД - 70%. Генератор обеспечивает импульсную мощность 205 кВт при энергии импульса 65 Дж. При работе на емкостную нагрузку в импульсном режиме средняя мощность при согласованной емкости нагрузки 60 нФ достигает 34 кВт при напряжении 52 кВ, КПД - 75%. За один импульс в емкостную нагрузку передается 82 Дж электрической энергии. При работе на активно-емкостную нагрузку в диапазоне изменения коэффициента мощности  $\cos \varphi = 0,4 - 0,6$ , характерном для промышленных озонаторов, согласованное сопротивление активной нагрузки составляет 2-3 кОм. При этом в диапазоне средняя активная мощность составляет 8-13 кВт при напряжении на активной составляющей 15-20 кВ, КПД - 60%, а импульсная энергия, выделяющаяся в активной нагрузке составляет 35-50 Дж.

5. Разработана методика и математическая модель для расчета переходных тепловых процессов и температур активных частей электромашинного индукторно-компрессионного генератора при работе в установившемся и нестационарных режимах.

6. С учетом тепловых ограничений максимальная средняя мощность генератора при работе на активную нагрузку в установившемся режиме составляет 16 кВт. При этом в согласованной активной нагрузке 20 кОм выделяется импульсная энергия 35 Дж при коэффициенте полезного действия 0,8. Средняя мощность генератора при работе на емкостную нагрузку составляет 19 кВт. Энергия в согласованной емкостной нагрузке 20 нф составляет 45 Дж при КПД - 0,85. При активно-емкостной нагрузке с  $\cos \varphi = 0,4 - 0,6$  максимальная средняя активная мощность с учетом тепловых ограничений в установившемся режиме составит, соответственно 6-8 кВт.

7. В результате математического моделирования получены соответствующие зависимости, позволяющие определять условия работы генератора в

кратковременном и повторно-кратковременном режимах работы при различном характере и параметрах нагрузки, которые могут быть использованы при разработке и эксплуатации индукторно-компрессионных генераторов дискового типа.

8. На основе рекомендаций автора, полученных в результате теоретических исследований, спроектирован и изготовлен опытный образец электромашиного индукторного-компрессионного генератора дискового типа с внешним диаметром активной зоны 0,33 м.

9. Для экспериментальных исследований генератора изготовлен стенд с управляющей и регистрирующей аппаратурой, обеспечивающий проведение испытаний генератора в статическом и динамическом режимах при частоте вращения ротора до 3000 об/мин.

10. В результате измерения получены экспериментальные значения параметров генератора: минимальная индуктивность рабочей обмотки генератора 2,0 Гн, максимальная индуктивность рабочей обмотки генератора 21,0 Гн. Расчетные значения минимальной и максимальной индуктивности составляют 2,1 Гн и 21,75 Гн соответственно. Несовпадение теоретических и экспериментальных данных составляет 3,5%, что является вполне допустимым для лабораторных условий.

11. В лабораторных условиях проведены испытания генератора при работе на активную и емкостную нагрузку с напряжением до 1000 В. Получены экспериментальные осциллограммы токов и напряжений генератора, подтверждающие результаты теоретических исследований.

12. Испытание генератора в составе установки импульсного питания технологического ускорителя подтвердили высокую эффективность его работы на емкостную нагрузку. При питании промежуточного емкостного накопителя энергия в импульсе составила 35 Дж при напряжении 34 кВ и средней мощности 14 кВт. Отклонения от соответствующих расчетных значений по импульсной энергии составили 12,3 %, а по напряжению 6,9 %.

13. Сравнение экспериментальных данных и теоретических результатов подтверждает адекватность разработанной математической модели и перспективы ее использования при проектировании электромашиных индукторно-компрессионных генераторов дискового типа.

14. При массе генератора 150 кг и средней мощности 14 кВт удельная средняя мощность по данным эксперимента составляет 10 Вт/кг, что свидетельствует о достаточно эффективной работе генератора в длительном режиме.

Основные положения диссертации отражены в следующих публикациях:

1. Сипайлов Г.А., Кассиров В.М., Лаас А.Р. Кратковременные режимы работы машинно-вентильных генераторов при активной нагрузке (статья) Труды 8 научно-технической конференции НПО «Полюс», Томск, 1987.

2. Чучалин А.И., Кассиров В.М., Муравлев И.О., Лаас А.Р. Электромашинный генератор импульсов А.С. № 1422921, 1988

3. Сипайлов Г.А., Чучалин А.И., Бендерский В.В., Лаас А.Р. Система импульсного питания высоковольтной нагрузки на основе электромашинных генераторов. Устройства и системы автоматики автономных объектов: Тез. Докл. 2-й научн.-техн. Конф., Красноярск, 1990.-с. 169

4. Чучалин А.И., Бендерский В.В., Лаас А.Р. Многодисковый высоковольтный импульсный генератор индукторно-компрессионного типа. Тез. Доклада XIV научно-техн. Конф., Томск, НИИЭМ, 1990, с. 91-93

5. Чучалин А.И., Бендерский В.В., Горисев С.А., Лаас А.Р. Расчет переходных процессов в индукторно-компрессионном генераторе с пассивным экранированием. Новосибирск, 1991

6. Сипайлов Г.А., Чучалин А.И., Бендерский В.В., Шариков Ю.И., Лаас А.Р. Электромашинный импульсный генератор для систем питания технологических ускорителей. Тез. Международного симпозиума по электромеханике, Екатеринбург, 1991

7. Бендерский В.В., Лаас А.Р. Многодисковый импульсный генератор индукторно-компрессионного типа. Сб. «Системы автономного электроснабжения и электромеханические устройства», Томск, 1992

8. Горисев С.А., Бендерский В.В., Лаас А.Р. Расчет переходных процессов в индукторно-компрессионном генераторе с пассивным экранированием. Автоматизированные электромеханические системы, Межвузовский сборник научных трудов, НГТУ, Новосибирск, 1993

9. Чучалин А.И., Сафьянников И.А., Муравлев И.О. Power sources for technological systems. The 5<sup>th</sup> Korea-Russia International Symposium on Science and Technology (KORUS'01), Tomsk, TPU, стр 228-231

10. Лаас А.Р., Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Высоковольтный генератор периодических импульсов. VII международной научно-практической конференции молодежи и студентов “Современные техника и технология” (г. Томск, 2001г.), стр 72-74

11. Лаас А.Р., Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. High-voltage recurrent pulse generator MTT'2001, The seventh International Scientific and Practical Conference of Students, Post-graduates, and Young Scientists, Modern techniques and technology, February 26- March 2, 2001, Tomsk, Russia, p.95-97

12. Лаас А.Р., Чучалин А.И., Муравлев И.О., Сафьянников И.А. Индукторно-компрессионный генератор. Международная научно-техническая конференция «Электромеханические преобразователи энергии», Томск, Россия, 2001

Автор выражает благодарность за оказанную помощь и поддержку при работе над диссертацией кандидату технических наук Муравлеву И.О. и кандидату технических наук Сафьянникову И.А.