

На правах рукописи

Юдинцев Антон Геннадьевич

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО
НАГРУЗОЧНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ СИСТЕМ
ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность: 05.09.03 – “Электротехнические комплексы и системы”

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2010

Работа выполнена в Энергетическом институте Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Дементьев Ю. Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Иванчура В. И.

кандидат технических наук, доцент
Семёнов В. Д.

Ведущая организация: Открытое Акционерное Общество
«Научно-производственный центр
«Полус», г. Томск.

Защита состоится « 23 » декабря 2010 года в 15:00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.11 при ГОУ ВПО НИТПУ в ауд. 217 8 учебного корпуса НИТПУ по адресу 634050, г. Томск, ул. Усова 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО НИТПУ, по адресу: 634034, ул. Белинского 55.

Автореферат разослан « 23 » ноября 2010 г.

Учёный секретарь совета
к.т.н., доцент

Ю. Н. Дементьев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важных жизнеобеспечивающих систем космического аппарата (КА) является система электропитания (СЭП). Степень надежности СЭП должна быть максимальной, т.к. все служебные и полезные устройства КА нуждаются в бесперебойном и качественном электропитании.

Этап разработки и создания бортовой СЭП характеризуется высокой стоимостью и сложностью ввиду применения дорогих материалов и участия большого числа разработчиков различного профиля. Самым ответственным этапом создания СЭП являются наземные испытания, в ходе которых отрабатываются все возможные режимы функционирования СЭП в условиях близких к полетным. Оборудование, применяемое при этом, должно обладать не меньшей надежностью и скоростью обработки информации, отвечать современным требованиям по электромагнитной совместимости и соответствовать установленной мощности СЭП.

Среднесуточная мощность СЭП сегодня составляет 4÷10 кВт, при этом характер нагрузки может быть активным, реактивным и смешанным. Очевидно, что подключение реальных устройств – солнечных и аккумуляторных батарей, бортовой полезной и служебной нагрузок в полном объеме при проведении наземных испытаний затруднено из-за их дефицитности, стоимости и громоздкости.

Решением этой проблемы является создание специализированных имитирующих комплексов, обладающих вольт-амперными характеристиками (ВАХ) реальных солнечной и аккумуляторной батарей и имитационного нагрузочного комплекса (НК), который необходим для отработки сеансного расписания нагрузок в автоматическом и ручном режимах, для формирования нагрузочных токов в динамическом и статическом режимах, а также для исследования быстродействия и надежности регуляторов СЭП, измерения выходного полного сопротивления СЭП и оценки качества стабилизации выходного напряжения. НК является испытательной системой, содержащей различные виды имитационных нагрузок: постоянная (активная) нагрузка, импульсная (скачкообразная), комплексная (активно-емкостная), переменная с синусоидальной формой тока. Кроме того, так как мощности современных СЭП КА постоянно растут (максимальная мощность может достигать 10 кВт), важной задачей при проведении длительных (несколько суток) наземных испытаний НК с СЭП КА является энергосберегающий режим, позволяющий направить зависимым инвертором нагрузочный ток, протекающий по выходным шинам СЭП в питающую трехфазную сеть, а не на активные ступени сопротивлений, как при традиционных наземных испытаниях СЭП КА, проводимых в настоящее время.

Исходя из вышеизложенного следует отметить, что разработка и создание эффективных, высоконадежных СЭП, готовых к эксплуатации в КА в

значительной мере зависит от проведенных наземных испытаний на имитационных и нагрузочных комплексах. Таким образом, разработка и теоретические исследования НК для наземных испытаний СЭП КА, а также вопросы их проектирования чрезвычайно актуальны и имеют практическую ценность.

Целью настоящей работы является разработка многофункционального энергосберегающего нагрузочного комплекса для проведения наземно-технических испытаний систем электропитания космических аппаратов.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

1. Анализ современного схмотехнического построения СЭП КА;
2. Анализ принципов построения нагрузочных устройств для систем электропитания;
3. Разработка энергосберегающей структуры комплекса имитации нагрузки, а также функциональных устройств дополнительных модулей;
4. Составление схем замещения и математического описания основного нагрузочного канала и дополнительных модулей;
5. Получение расчётных соотношений и экспериментальные исследования электромагнитных процессов.

Методы исследования. Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методы расчётов, с использованием классических методов расчёта электрических и магнитных цепей, метода алгебраизации дифференциальных уравнений, классических методов решения дифференциальных уравнений, методов численного и математического моделирования.

Научная новизна работы заключается в теоретических и практических исследованиях, сущность которых состоит в следующем:

1. Разработана энергосберегающая структура нагрузочного комплекса, с автоматизированным управлением, обеспечивающая минимальные потери мощности при испытаниях СЭП КА, за счёт передачи энергии в сеть;
2. Предложен способ формирования фронтов тока, позволяющий получать заданное быстродействие нагрузочного комплекса во время переходных процессов – наброса (сброса) тока нагрузки;
3. Получены аналитические расчётные соотношения для токов и напряжений основного канала и нагрузочных блоков в отдельности, позволяющие обоснованно подойти к проектированию комплекса имитации нагрузки.

Новизна предложенных технических решений частично подтверждена патентами на полезную модель РФ «Комплекс имитации нагрузки для испытания систем электроснабжения космических аппаратов» (№50317), «Имитатор нагрузок для испытания систем электроснабжения космических аппаратов» (№75755), «Имитатор аккумуляторной батареи для испытания систем электроснабжения космических аппаратов» (№73102), «Преобразователь напряжения с защитой от перегрузки» (№77730).

Практическая ценность работы:

1. Создан и внедрён энергосберегающий комплекс имитации нагрузок (КИН) для наземно-технических испытаний СЭП КА с напряжениями на выходных шинах 27,40, 100 В мощностью до 7 кВт с автоматизированным управлением и протоколированием испытаний с помощью ПЭВМ.
2. Разработаны алгоритмы наброса и сброса нагрузки системы формирования фронтов, позволяющие получать заданное быстродействие нагрузочного комплекса.
3. Разработано устройство формирования гармонической нагрузки, обеспечивающее испытание СЭП КА в широком диапазоне токов ($0 \div 20$ А) и частот (20 Гц \div 150 кГц).
4. Предложены расчётные выражения для токов и напряжений основного канала и блоков нагрузочного комплекса имитации нагрузок в отдельности, позволяющие обоснованно подойти к проектированию и выбору элементной базы силовых преобразователей нагрузочного комплекса.

Основные защищаемые положения:

1. Энергосберегающая структура нагрузочного комплекса, позволяющая существенно сократить потери мощности при наземных испытаниях СЭП КА;
2. Способ формирования фронтов тока обеспечивающий заданное быстродействие системы нагрузочного комплекса во время переходных процессов – наброса (сброса) тока нагрузки;
3. Аналитические расчётные выражения для токов основного канала и нагрузочных блоков, позволяющие рационально проектировать энергосберегающие нагрузочные комплексы и проводить инженерные расчёты;

Реализация результатов работы диссертации.

Результаты диссертационной работы использованы при выполнении ряда научно-исследовательских тем, а также в проектно-конструкторской деятельности НИИ Автоматики и электромеханики ТУСУР при разработке комплексов имитации нагрузок, таких как БИН-27, БИН-40, БИН-100. Разработанные и изготовленные комплексы внедрены в производственный процесс предприятия ОАО ИСС им. М. Ф. Решетнёва. Материалы диссертации внедрены в учебный процесс кафедры ЭПЭО ТПУ при изучении дисциплин «Силовые преобразователи электрической энергии», «Физические основы электроники», а также использованы в дипломном проектировании студентов ТУСУР. Подтверждением реализации результатов диссертационной работы является наличие актов о внедрении.

Апробация работы. Основные научные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и получили одобрения на Международных научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых учёных «СТТ», Томск, 2003-2006 гг.; VIII Всероссийской научной конференции с международным участием «Решетнёвские чтения», Красноярск, 2004 г.; Международной научно-практической конференции «Элек-

тронные средства и системы управления», Томск, 2004., научных семинарах кафедр электропривода и электрооборудования ЭНИН ТПУ.

Публикации.

По результатам выполненных исследований и теме диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 2 в центральных изданиях рекомендованных ВАК РФ, сделано 5 докладов, получено 4 патента на полезную модель.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения, изложенных на 178 страницах машинописного текста; содержит 78 рисунков, 2 таблицы, список использованных источников включающих 109 наименований и приложения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе проведен анализ схмотехнического построения СЭП КА. В целях формирования четких правильных требований к испытательным нагрузочным комплексам, постановки решаемой задачи и формулирования интегрального понятия о системе питания, как об объекте, который подвергается тщательным электротехническим испытаниям, проанализирован состав электрооборудования и каналы электропотребления СЭП КА. На основе проведенного анализа выявлены основные требования, предъявляемые к испытательным нагрузочным устройствам.

В течение последних 12 лет производства КА явно прослеживается тенденция увеличения мощности бортового электрического оборудования и требуемого срока активного существования (САС) КА (Табл. 1), что ведет к повышению требований, предъявляемых к СЭП. Требуются качественные изменения в подходах к проектированию, изготовлению и испытаниям СЭП, позволяющие успешно соответствовать предъявляемым требованиям.

Таблица 1

Тип КА	Мощность СЭП [Вт]	Срок активного существования САС, [лет]	Начало лётных испытаний
Гонец – М	100	5	2005
Глонасс – М	1400	7	2003
Молния – 3К	1470	5	2001
Галс	2400	5	1994
Экспресс	2400	5	1994
Экспресс – А	2540	7	2000
SESAT	5300	10	2000
Экспресс – АМ	6300	12	2003
Экспресс – АМ33	6770	12	2008
Экспресс – АМ44	6770	12	2009

Важным этапом создания СЭП являются наземные испытания. Очевидно, что подключение реальных устройств – солнечных батарей, аккумуляторных батарей, различной нагрузки при проведении испытаний СЭП – невозможно, ввиду отсутствия эквивалентной энергии солнечного излучения в открытом космосе и подключения всего объема полезной нагрузки (приёмопередающих устройств, электрических машин и т.д.). Данная проблема в настоящее время решается выполнением специализированных, под конкретную СЭП КА, имитаторов солнечных и аккумуляторных батарей, а также комплексов имитации (КИН) нагрузки. Поскольку при согласовании первичного источника энергии с аккумуляторной батареей и для стабилизации напряжения на нагрузке применяются импульсные преобразователи напряжения, то независимо от конкретной структуры СЭП её энергобалансная модель может быть представлена схемой, изображенной на рис. 1.

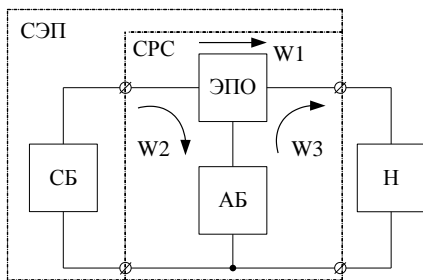


Рис. 1. Энергобалансная модель СЭП.

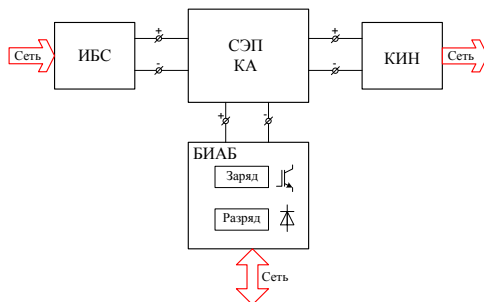


Рис. 2. Блок-схема энергетических связей испытательного комплекса.

Как следует из рис. 1 энергобалансная модель содержит солнечную батарею (СБ), энергопреобразовательное оборудование (ЭПО), согласующе-рекуперативную часть (СРС), аккумуляторную батарею (АБ), нагрузку (Н). На схеме также обозначены: W_1 – поток энергии, передаваемой от СБ непосредственно или через последовательный регулятор-стабилизатор напряжения нагрузке; W_2 – поток энергии от СБ к АБ; W_3 – поток энергии от АБ к нагрузке. Энергобалансная модель отражает реальное взаимодействие основных устройств СЭП, распределение энергии между составными частями СЭП и нагрузкой, и является базовой для построения блок-схемы энергетических связей испытательного комплекса СЭП рис. 2, где КИН – комплекс имитации нагрузки, ИБС – имитатор батареи солнечной, БИАБ – блок имитации аккумуляторных батарей.

Таким образом, блок-схема представленная на рис. 2, является основой для построения нагрузочного комплекса, с автоматизированным управлением, общая схема которого представлена на рис. 3, где КПА – контрольно-

проверочная аппаратура; АСФК – автоматизированная система функционального контроля; ПЭВМ – персональный компьютер АСФК; К – контроллер; НК – нагрузочный комплекс.

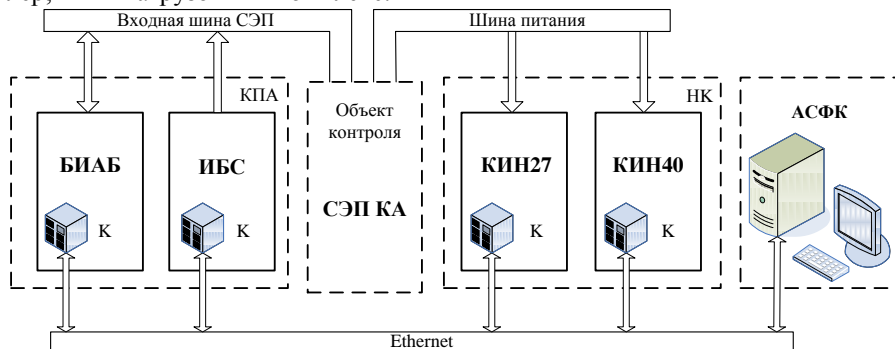


Рис. 3. Структурная схема автоматизированного испытательного комплекса.

Для обеспечения аппаратной и программной стыковки имитационных блоков с АСФК, каждый КИН содержит контроллер промышленного образца на базе процессорной платы.

Основными задачами выполняемыми контроллером К являются: диагностический контроль, измерений и управления силовыми каналами собственных блоков имитации, обслуживание интерфейса RS-485, обеспечивающего полудуплексный прием информации и передачу команд на блоки и устройства, поддержка протокола обмена с внешней управляющей ПЭВМ с использованием интерфейса Ethernet, обслуживание как автономного (с передней панели), так и дистанционного (от ПЭВМ) режимов управления основными силовыми каналами, причем при наличии команды «Управление ЭВМ» от ПЭВМ автономное управление блокируется.

Используя специализированное программное обеспечение (ПО), задаётся программа исследования, по которой система будет работать в течение необходимого времени, с непрерывным ведением протокола результатов испытаний, управляя отдельно каждым комплексом имитации нагрузки в реальном времени, задавая необходимые режимы работы.

Автоматизация в сфере производства и испытаний СЭП КА является первостепенной задачей, обеспечивающей устранение человеческого фактора и случайных ошибок.

Согласно сформулированным требованиям к СЭП, полученным в результате анализа состава электрооборудования КА и энергообменных процессов в системе СЭП – нагрузка, сформулирован ряд основных требований предъявляемых при создании современных нагрузочных комплексов.

Комплекс имитации нагрузки должен содержать:

1. Блок имитации постоянных и плавно изменяющихся нагрузок, формирующий несколько (зависит от напряжения шины питания) ступеней постоянной нагрузки по $5 \div 10$ А, а также плавно изменяющуюся нагрузку $0 \div 15$ А с дискретностью 1 А (грубо) и 0.01 А (точно). Должен быть предусмотрен останов регулирования плавной нагрузки в любой точке диапазона по заданному уровню регулирования.
2. Блок имитации комплексной нагрузки (подключение параллельно шине питания емкости и активного сопротивления).
3. Блок разовой коммутации тока, обеспечивающий имитацию пускового тока двигательной нагрузки.
4. Блок имитации переменной нагрузки, обеспечивающий плавное увеличение или уменьшение размаха синусоидального тока нагрузки в диапазоне частот 20 Гц \div 150 кГц. С дискретностью изменения тока не больше 0.5 А и коэффициентом нелинейных искажений синусоидального тока нагрузки не более 5%.
5. Блок имитации скачкообразного (импульсного) изменения нагрузки.
6. Контроллер, обеспечивающий дистанционное управление от ПЭВМ всеми режимами и командами.

Таким образом, для проведения качественных наземно-технических испытаний современных СЭП КА необходимо использовать автоматизированные испытательные площадки содержащие комплексы имитации нагрузки шины питания. Ввиду большой выходной мощности СЭП, а также в результате выявленной тенденции её роста, при производстве КА нового поколения целесообразно нахождение энергосберегающего решения построения устройств имитации нагрузки. Для проведения имитации нагрузочных токов общей шины, необходимо чтобы проектируемые комплексы нагрузок содержали блоки имитации импульсной, комплексной, постоянной, гармонической и плавно изменяющейся нагрузки.

Вторая глава посвящена разработке энергосберегающего комплекса имитации нагрузок, структур и блок-схем отдельных модулей, системам управления нагрузочных каналов, способам построения импульсной нагрузки и формирователям фронтов, а также разработке необходимых алгоритмов для работы системы и отдельных её частей.

Проведение настройки и проверки работоспособности любой системы электропитания, сопровождается подключением к СЭП КА нагрузки, с целью имитации нагрузочных токов реальных СЭП. В подавляющем большинстве случаев в качестве такой нагрузки применяют систему последовательно-параллельного соединения резисторов. Основными достоинствами таких схем нагрузочных устройств является их надёжность и простота. Одним из главных недостатков является низкий КПД близкий нулю. Практически вся энергия, потребляемая от исследуемого источника питания, превращается в тепло, не совершая при этом никакой полезной работы. Более того, нагрузочные устройства такого класса, крайне затруднительно применять при мощно-

стях СЭП более 1 кВт, потому что резко возрастает их стоимость и массогабаритные показатели. Поэтому в настоящее время перспективным способом построения нагрузочных устройств является энергосберегающая структура, обеспечивающая возможность передачи потребляемой энергии в промышленную сеть переменного тока, посредством топологий зависимых инверторов.

При наземных испытаниях СЭП целесообразно применить энергосберегающий способ задания нагрузочных токов, обеспечивая при этом передачу энергии в силовую трёхфазную сеть. На рис. 4 показана упрощённая структура такой топологии. Здесь КИН – комплекс имитации нагрузки, потребляет от СЭП энергию, обеспечивая постоянно и заданную точность нагрузочного тока I_n .

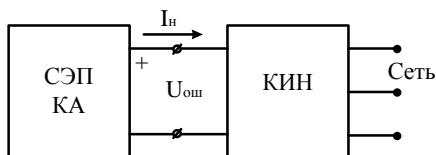


Рис. 4. Упрощённая блок-схема передачи энергии в сеть.

Передача энергии от источника постоянного напряжения в сеть переменного тока, предполагает наличие в структуре НК следующих устройств:

1. Внутренний канал стабилизации тока нагрузки I_n , чтобы СЭП «воспринимала» НК как двухполюсник реального устройства полезной нагрузки;
2. Устройство повышения напряжения для согласования уровней напряжений шин питания (27 В, 40 В, 100 В) с значением напряжения сети.

Блок-схема канала передачи энергии в сеть энергосберегающего НК представлена на рис. 5, где БПН – блок повышения напряжения, ФВЧ_{вх}, ФВЧ_{вых} – высокочастотные помехоподавляющие фильтры на входе и выходе БПН; ФВ, ФВИ – соответственно низкочастотные фильтр входа и фильтр ведомого инвертора; ВИ – ведомый трехфазный инвертор.

Полная блок-схема комплекса имитации нагрузки для шин 27 В, 40 В и 100 В СЭП КА представлена на рис. 6, где Ф_{вх} – фильтр входа, ПП – повышающий преобразователь, Ф_{вых} – фильтр выхода, МКС – модуль конвертора сброса, ФВИ – фильтр ведомого инвертора, ВИ – ведомый инвертор, БУВИ – блок управления ведомым инвертором, КН – комплексная нагрузка, ИН – импульсная нагрузка, БРК – блок разовой коммутации, СН – синусоидальная нагрузка, БУСН – блок управления синусоидальной нагрузкой, БУ – блок управления, БТр – блок трансформаторов.

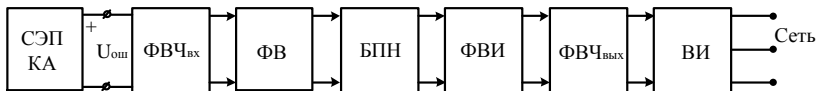


Рис. 5. Блок-схема канала передачи энергии в сеть.

Полная блок-схема комплекса имитации нагрузки для различных шин, 27 В, 40 В, 100 В СЭП КА представлена на рис. 6.

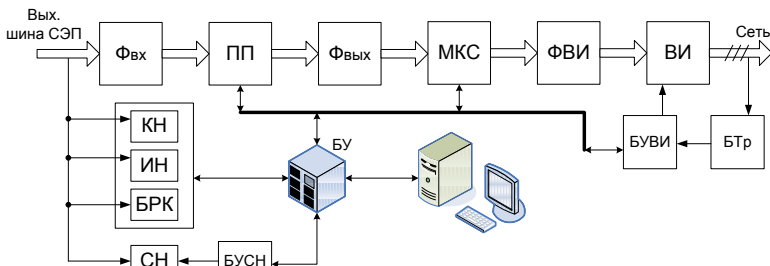


Рис. 6. Блок-схема разработанного энергосберегающего комплекса имитации нагрузочных токов СЭП КА.

Одним из основных требований при проектировании НК для испытаний СЭП КА является заданное время и форма фронтов нагрузочного тока. Вариантом возможного решения формирования фронтов заданной длительности и формы является блок-схема формирователя фронтов (ФФ) представленная на рис. 7.

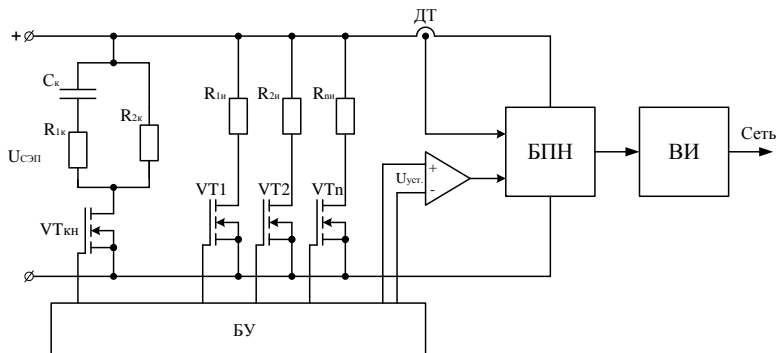


Рис. 7. Блок-схема системы формирования фронтов и подключения комплексной нагрузки.

Здесь $VT_1 - VT_n$ – дифференциальные импульсные ключи, БУ – блок управления, БПН – блок повышения напряжения, ДТ – датчик тока. Задачей ФФ является набор и сброс нагрузки на фиксированную величину совместно с

каналом постоянной нагрузки. Для корректного функционирования ФФ разработаны алгоритмы наброса (сброса) тока в общей шине, представленные в приложении к диссертации. При этом наброс тока по автономной или дистанционной команде (от внешней ЭВМ) выполняется включенными параллельно общей шине дифференциальными импульсными ключами VT1 – VTn с фиксированной заданной нагрузкой.

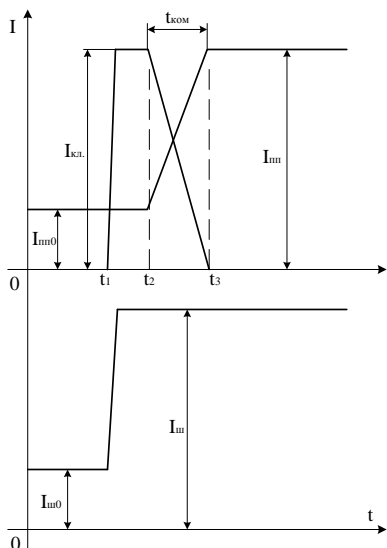


Рис. 8. Диаграмма, поясняющая способ формирования переднего фронта тока наброса.

Форма импульса тока наброса дифференцирующего ключа характеризуется крутым передним фронтом и пилообразным спадающим задним фронтом (рис. 8), длительность которого превышает постоянную времени входного регулятора постоянного тока. Применение отрицательной обратной связи по току (ДТ) позволяет входному регулятору постоянного тока после крутого фронта наброса удержать ток постоянным и равным заданной сумме величины постоянной нагрузки и скачка тока наброса. При сбросе, наоборот, следует предварительное плавное пилообразное отпирание дифференциальных ключей до величины фиксированного тока (рис. 9). При неизменной уставке входного регулятора он вынужден поддерживать постоянным входной ток БПН, уменьшая входной ток преобразователей БПН пропорционально увеличению тока дифференцирующих ключей. К моменту полного отпирания дифференцирующих ключей, входной ток преобразователей уменьшается на величину тока открытых транзисторов системы ФФ. Затем следует резкое запираение дифференцирующих транзисторов и одновременно уменьшение уставки регулятора на величину сброса тока нагрузочного устройства. В этот

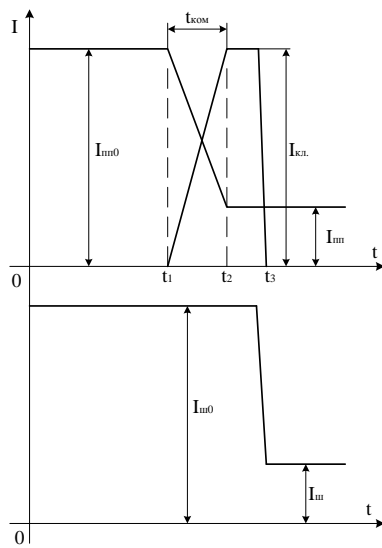


Рис. 9. Диаграмма, поясняющая способ формирования заднего фронта тока сброса.

момент баланс уставки регулятора и входного тока преобразователей, равный суммарному току НК, позволяет удержать систему в устойчивом состоянии и чётко осуществить требуемый переход. Таким образом, ФФ осуществляет формирование заданной траектории и времени фронта тока общей шины.

Третья глава посвящена разработке математических моделей, получению расчетных аналитических выражений для токов и напряжений основного канала и дополнительных нагрузочных блоков.

Для составления математического описания системы основного канала, разработана математическая модель, опираясь на блок-схему рис. 10 и схемы каждого из блоков в отдельности.

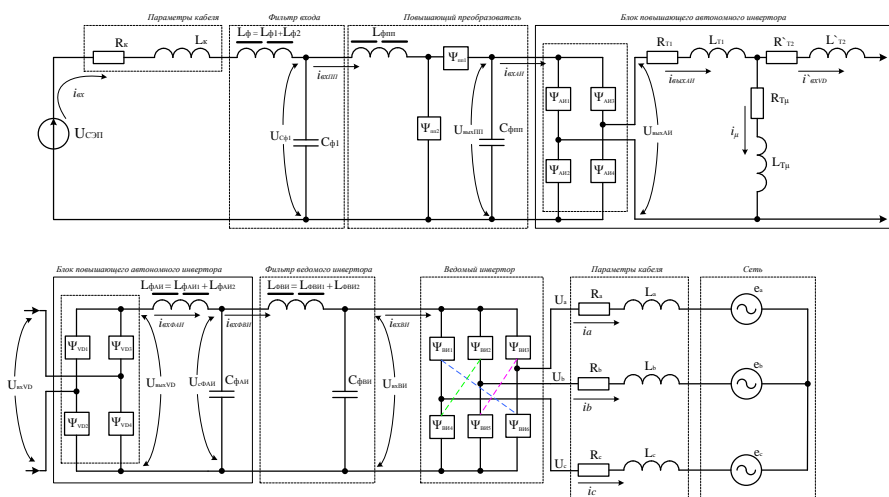


Рис. 10. Схема замещения основного канала нагрузки.

При разработке модели приняты следующие допущения:

1. СЭП – это идеальный источник напряжения, т.е. внутренне сопротивление которого $R_{вн} = 0$.
2. Решение системы дифференциальных уравнений проведено не более чем для третьей гармоники, поэтому параметры блоков фильтров радиопомех не учитываются;
3. Значениями индуктивностей и сопротивлений межблочных соединений пренебрегаем, но учитываем параметры кабелей соединяющих КИН с СЭП КА и силовой трехфазной сетью.
4. Полупроводниковые элементы рассматриваются как идеализированные ключи.

5. Трёхфазная силовая цепь есть идеальный потребитель передаваемой мощности.

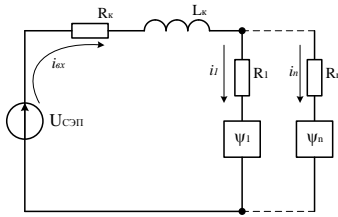


Рис. 11. Схема замещения блока формирования фронта.

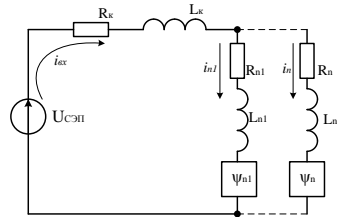


Рис. 12. Схема замещения блока импульсной нагрузки.

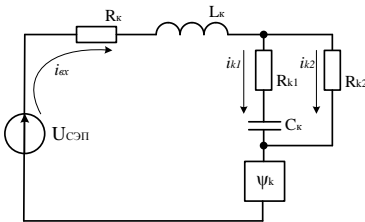


Рис. 13. Схема замещения блока комплексной нагрузки.

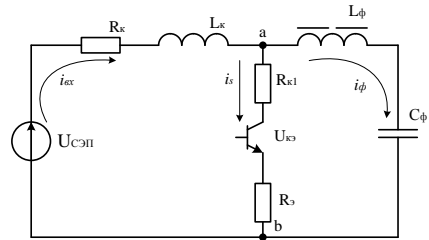


Рис. 14. Схема замещения блока гармонической нагрузки.

На основе разработанных схем замещения (рис. 11-14) составлены математические модели основного канала нагрузки, гармонической нагрузки, системы формирователя фронтов, блока импульсной и комплексной нагрузок, позволяющие проводить исследование электромагнитных процессов.

По разработанным схемам замещения составлены системы дифференциальных уравнений, описывающие зависимости входных токов от параметров схемы нагрузочного устройства. Найдены решения в аналитическом виде для токов основного канала и вышеперечисленных блоков нагрузок, позволяющие проводить проектирование системы и составлять инженерные расчётные выражения (1-5).

$$I_{exВИ} = \frac{U_{exВИ}^2 C}{\omega^2 L_{ФВИ}^2 T} \left(+ \left\langle \left\langle \Gamma \right\rangle \right\rangle \right) - \frac{2U_{exВИ} C U_{сФАН} C}{\omega^2 L_{ФВИ}^2 T} \left(+ \left\langle \left\langle \Gamma \right\rangle \right\rangle \right) + \frac{U_{сФАН}^2 C}{\omega^2 L_{ФВИ}^2 T} \quad (1)$$

$$U_{сФВИ} = \frac{I_{exВИ}^2 C}{\omega^2 C_{ФВИ}^2 T} - \frac{2I_{exВИ} C I_{exФВИ} C}{\omega^2 C_{ФВИ}^2 T} - \frac{I_{exФВИ}^2 C}{\omega^2 C_{ФВИ}^2 T} \quad (2)$$

$$\begin{aligned}
I_m^2 & \left[a_{3m}^2 + \frac{a_{2m}^2 - 2a_{3m}a_{1m}}{\omega^2} + \frac{a_{1m}^2 - 2a_{2m}a_{0m}}{\omega^4} + \frac{a_{0m}^2}{\omega^6} \right] = \\
& = \sum_{m=a,b,c} \frac{b_{2m}^2}{\omega^2} U_m^2 + \sum_{m=a,b,c} \frac{b_{1m}^2 - 2b_{2m}b_{0m}}{\omega^4} U_m^2 + \sum_{m=a,b,c} \frac{b_{0m}^2}{\omega^6} U_m^2 + \\
& + 2 \sum_{\substack{k1,k2=0,1,2 \\ m1,m2=a,b,c \\ m1 \neq m2}} b_{km1} b_{km2} \left(\overline{U_{m1}^{k1}} \cdot \overline{U_{m2}^{k2}} \right)
\end{aligned} \quad (3)$$

$$i_{\text{ex}} = \sum_{n=1}^a \frac{3 \left(U_{C\Pi\Pi} + U_{C\Pi\Pi} \sin \omega_n t \right) \left(U_{C\Pi\Pi} \sin 3\omega_n t \right)}{3 \left(R_k + R_k \sin \omega_n t \right) \left(R_k \sin 3\omega_n t + 6R_n \right)} \cdot \left(1 - e^{-\sum_{n=1}^a \frac{3 \left(R_k + R_k \sin \omega_n t \right) \left(R_k \sin 3\omega_n t + 6R_n \right)}{3 \left(R_k + L_k \sin \omega_n t \right) \left(L_k \sin 3\omega_n t \right)} t \cdot \phi} \right) \quad (4)$$

$$i_{\theta,x} = \sqrt{\frac{U_{C\Pi\Pi} - \left(R_k + \sum_{n=1}^k R_n \right)^2 \sum_{n=1}^k \Psi_{n0}^2 \cdot \frac{I_{n(1)}}{\omega}}{\left(L_k + \sum_{n=1}^k L_n \right)^2 \sum_{n=1}^k \Psi_{n0}^2}} \quad (5)$$

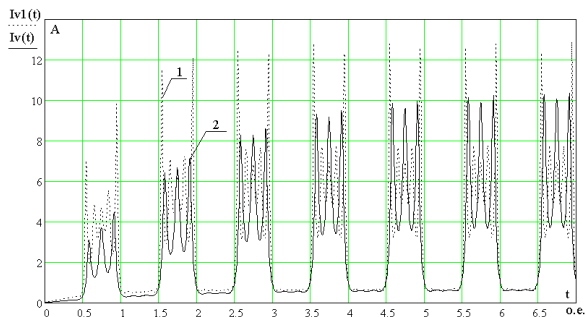


Рис. 15. Диаграммы токов импульсной нагрузки для шины 27 В, где 1 – численное решение, 2 – аналитическое решение.

С помощью полученных расчётных выражений построены диаграммы токов для различных шин (рис. 15), показывающие адекватность математических моделей. Сравнение графических зависимостей токов, полученных численным методом и с помощью аналитических выражений показывает их хорошую сходимость ($\pm 10\%$), что позволяет рекомендовать полученные аналитические выражения для практического использования.

Четвертая глава посвящена схематическому проектированию и экспериментальному исследованию электромагнитных процессов нагрузочного комплекса, с учётом разработанных блок-схем и алгоритмов второй главы и расчётных выражений третьей главы.

При проведении экспериментальных исследований использована разработанная схема опытного образца комплекса имитации нагрузки, представленная на рис. 16.

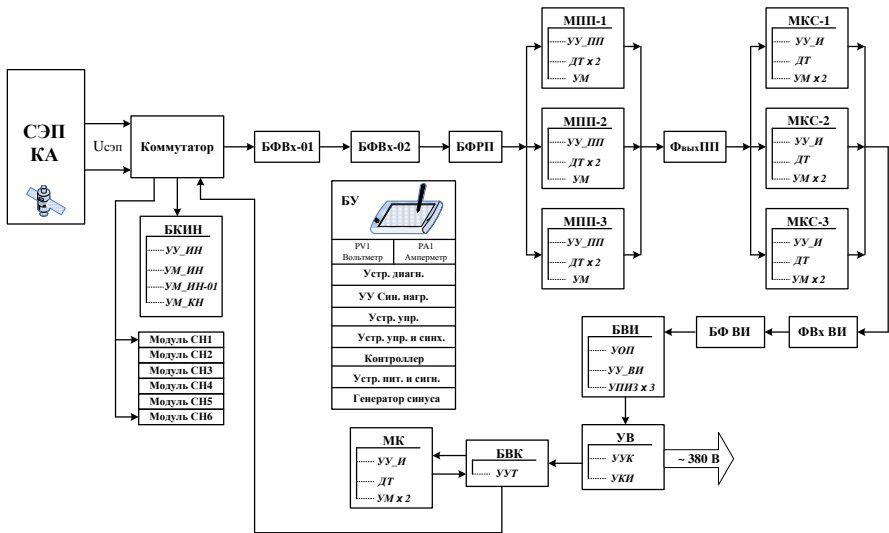


Рис.16. Блок схема комплекса имитации нагрузок.

Данная схема содержит модули, при помощи которых, имитируются практически все виды нагрузок. Система управляется блоком БУ, который предусматривает задание автоматических режимов испытаний, обеспечивает диагностику состояния всех силовых модулей и состояние трехфазной сети на соответствие параметрам ГОСТа, ненорму частоты, уровень напряжения. Для обеспечения аварийного отключения от СЭП КА и от сети предусмотрены модули коммутатор и устройство ввода (УВ). С целью фильтрации низких частот использованы модули БФВх-01, БФВх-02, для фильтрации высоких частот, появляющихся в результате работы ВЧ модулей МПП и МКС, использован блок БФРП. В результате, на опытных образцах комплексов имитации нагрузок, проведены экспериментальные исследования и получены осциллограммы токов основного канала нагрузки и всех вспомогательных нагрузочных модулей, представленные на рис. 17, 18. На рис. 17 а, б - показаны осциллограммы при набросе (сбросе) тока величиной 90 А для шины 27 В, 1 – ток полученный по расчётным выражениям, 2 – ток полученный при экспериментальном исследовании. На рис. 18 а – представлена осциллограмма тока при подключении комплексной нагрузки; 1- ток расчётный, 2 – ток экспериментальный. Осциллограммы тока при импульсной нагрузке для шины 40 В показаны на рис. 18 б; 1 - ток расчётный, 2 – ток экспериментальный.

Анализ осциллограмм токов на рис. 17, 18 показывает, что расхождение между экспериментальными и расчётными осциллограммами токов составляет 5 – 7 %, что говорит об адекватности математического описания и математических моделей НК.

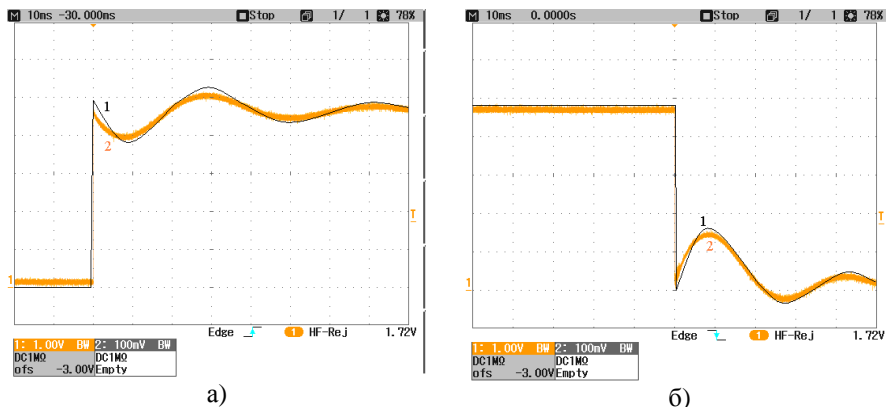


Рис. 17. Осциллограммы токов для шины 27 В.

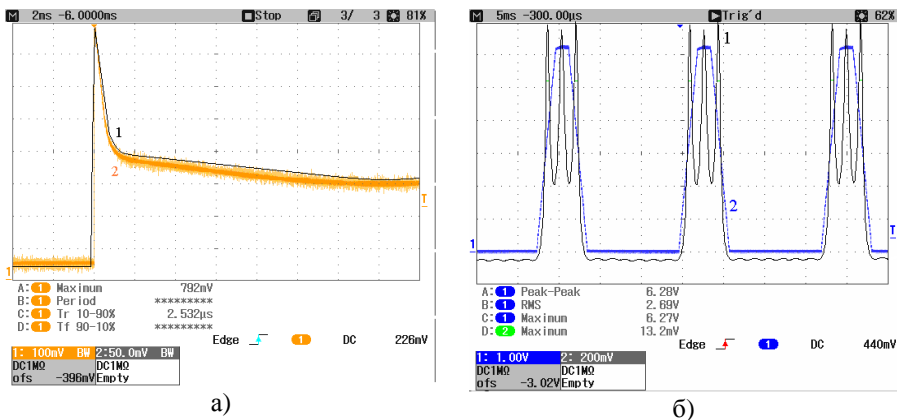


Рис. 18. Осциллограммы токов для шины 40 В.

В процессе выполнения диссертации с участием автора поставлены заказчику действующие образцы комплексов имитации нагрузок, общий вид которых, а также отдельных устройств представлены на рис. 19-22.



Рис. 19. Модуль конвертора.



Рис. 20. Модуль конвертора сброса.

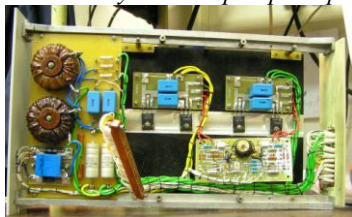


Рис. 21. Модуль повышающего преобразователя.



Рис. 22. Блок имитации нагрузки на шину питания СЭП 100 В, БИН-100.

Основные результаты работы

По результатам проведённых в диссертационной работе теоретических и экспериментальных исследований, направленных на решение вопросов, связанных с созданием автоматизированных испытательных нагрузочных комплексов, обладающих энергосберегающей структурой, для проведения наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов, можно сделать следующие выводы:

1. Для проведения качественных наземно-технических испытаний современных СЭП КА необходимо использовать автоматизированные испытательные площадки содержащие комплексы имитации нагрузки шины питания. Ввиду большой выходной мощности СЭП, а также в результате выявленной тенденции её роста, при производстве КА нового поколения целесообразно нахождение энергосберегающего решения построения устройств имитации нагрузки. Анализ каналов электропотребления СЭП показывает, что для проведения имитации нагрузочных токов общей шины, необходимо

чтобы проектируемые комплексы нагрузок содержали блоки имитации импульсной, комплексной, постоянной, гармонической и плавно изменяющейся нагрузок.

2. Разработана энергосберегающая структура комплекса имитации нагрузок для различных шин, 27 В, 40 В, 100 В СЭП КА, позволяющая получить экономию электроэнергии в пределах 60 – 70 % от его мощности.

3. Разработан модуль формирователя фронтов тока, позволяющий получить заданное время переходного процесса при сбросе-набросе нагрузочного тока (≈ 10 мкс) при любой величине имитируемого тока на основной шине.

4. Разработано устройство импульсной нагрузки, гармонической нагрузки и необходимые алгоритмы для их корректной работы. Установлено, что разработанное устройство импульсной нагрузки позволяет создавать имитацию нагрузочных токов в импульсном режиме с возможностью цифровой регулировки длительности фронта, а устройство гармонической нагрузки обеспечивает возможность проводить испытания СЭП КА в широком диапазоне частот (20 Гц – 150 кГц).

5. Разработаны математические модели основного канала нагрузки, гармонической нагрузки, системы формирователя фронтов, блока импульсной и комплексной нагрузок, позволяющие проводить исследование электромагнитных процессов, а также производить, подтверждающие адекватность, инженерные расчёты силовой части НК. С помощью полученных расчётных выражений построены диаграммы токов для различных шин, показывающие адекватность математических моделей. Сравнение графических зависимостей токов, полученных численным методом и с помощью аналитических выражений показывает их хорошую сходимость ($\pm 10\%$), что позволяет рекомендовать полученные аналитические выражения для практического использования.

6. Проведены экспериментальные исследования основного канала нагрузочного тока на действующем НК, получены осциллограммы наброса (сброса) тока. При сравнении графиков токов на шинах питания 27 В и 40 В, полученных на модели и снятых экспериментальным путём показывает, что расхождение между ними составляет 5 – 7 %, что говорит об адекватности математического описания электромагнитных процессов НК.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Патент на полезную модель 50317 РФ. Комплекс имитации нагрузки для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г., Дементьев Ю.Н. Бюл. №36, 2005.

2. Патент на полезную модель 75755 РФ. Имитатор нагрузок для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г., Иванов В.Л., Патрахина О.В. Бюл. №23, 2008.

3. Патент на полезную модель 73102 РФ. Имитатор аккумуляторной батареи для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г., Леонов В.В., Цебенко Н.Н., Кайсанов С.А. Бюл. №13, 2008.
4. Патент на полезную модель 77730 РФ. Преобразователь напряжения с защитой от перегрузки / Мишин В.Н., Бубнов О.В., Пчельников В.А., Юдинцев А.Г. Бюл. №30, 2008.
5. Юдинцев А.Г., Дементьев Ю.Н., Бубнов О.В. Нагрузочные устройства для испытаний систем электропитания космических аппаратов // Известия Томского политехнического университета. – 2005. – Т.307. №6,– 126 – 130.
6. Юдинцев А.Г., Дементьев Ю.Н., Рулевский В. М., Автономные источники питания для индивидуальных шахтных фонарей // Горный журнал. 2006. №4. 43 – 44.
7. Юдинцев А.Г., Микросхема UC3875 фирмы Unitrode в мостовом инверторе с фазовой широтно-импульсной модуляцией // Схемотехника, 2005. 16 – 20.
8. Юдинцев А.Г., Бесконтактные авиационные генераторы постоянного тока и их особенности // Решетневские чтения. Сборник докладов V Всероссийской научной конференции, посвященной памяти Генерального конструктора ракетно-космических систем академика М. Ф. Решетнева: Красноярск 2001. 165 – 166.
9. Юдинцев А.Г., Измерительный преобразователь переменного тока // Сборник докладов V Всероссийского студенческого научно-технического семинара. Энергетика: экология, надежность, безопасность. Томск: ТПУ 2003. 47 – 49.
10. Юдинцев А.Г., Имитатор гармонической нагрузки для систем электропитания космических аппаратов // Сборник тезисов X международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «СТТ 2004» Томск: ТПУ, 2004. 277 – 278.
11. Юдинцев А.Г., Имитация гармонической нагрузки в системах электропитания космических аппаратов // Сборник трудов НИИ АЭМ «Аппаратно-программные средства автоматизации технологических процессов» 2004 г. Выпуск 5, 121 – 123.
12. Yudinsev A.G., The review of modern switching regulators // X International Scientific and Practical Conference of students, post – graduates and young scientists “Modern Techniques and Technology” (MTT 2004), Tomsk, Tomsk Polytechnic University. 79 – 80.
13. Юдинцев А.Г., Мишин В.Н., Автономный инвертор с фазовой широтно-импульсной модуляцией // Труды международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», 2004, Томск. 56 – 59.
14. Юдинцев А.Г., Бубнов О.В., Автоматизированный испытательный комплекс систем электропитания космических аппаратов // Труды VIII Все-

российской научной конференции с международным участием «Решетневские чтения», 2004, Красноярск. 66 – 67.

15. Юдинцев А.Г., Дементьев Ю.Н., Анализ работы мостового инвертора в квазирезонансном режиме // Сборник научных трудов «Электротехнические системы и комплексы», 2005, Магнитогорск. 117 – 121.

16. Yudinsev A.G., Analysis of structuring variants of loading devices for the systems of electric supply of space aircrafts // XI International Scientific and Practical Conference of students, post – graduates and young scientists “Modern Techniques and Technology” (МТТ 2005), Tomsk, Tomsk Polytechnic University. 94 – 95.

17. Юдинцев А. Г., Бубнов О. В. Нагрузочные устройства для систем электропитания космических аппаратов. Электронные и электромеханические системы и устройства. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов: Томск 2008. 25 – 27.

18. Юдинцев А. Г., Дементьев Ю. Н. Многофункциональный энергосберегающий имитационный нагрузочный комплекс для систем электропитания космических аппаратов // Материалы международной научно-технической конференции «Электротехнические комплексы и системы», 2010, Комсомольск-на-Амуре. 142 – 146.

Личный вклад автора.

Семь работ написано автором единолично. В работах, выполненных в соавторстве, автору принадлежит: разработка модулей конвертора, модулей конвертора сброса, модулей повышающего преобразователя в основном канале нагрузки БИН-100 [1, 2, 4], БИАБ-100 [3, 4] (45%); систематизация вариантов выполнения СЭП КА и требований, предъявляемых к нагрузочным устройствам [11, 13] (60%); разработка системы управления при фазовой широтной импульсной модуляции мостового инвертора [8] (50%); разработка системы управления и силовой части квазирезонансного инвертора [10] (70%).

Автор приносит благодарность кандидату технических наук, заведующему отделом №14 «Энергетической электроники» НИИ АЭМ ТУСУР Мишину Вадиму Николаевичу, сотрудникам отдела Пчельникову Виктору Алексеевичу и Бубнову Олегу Викторовичу за оказанную помощь при проектировании и создании физических моделей комплексов, а также в обсуждении результатов исследований.