

На правах рукописи

ПОЖАРКОВА ИРИНА НИКОЛАЕВНА

ФОРМИРОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВЫХОДНОМУ ИМПЕДАНСУ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Специальность 05.09.03 – электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск 2009

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современные требования к выходному импедансу систем электропитания (СЭП) космических аппаратов (КА) значительно жестче требований, предъявляемых к СЭП 70-х, 80-х годов прошлого века. Необходимость в снижении величины модуля выходного импеданса $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ СЭП обусловлена как увеличением суммарной мощности каналов электропотребления (КЭП) (с $2 \div 4$ до $10 \div 15$ кВт), так и числа КЭП с вторичными источниками питания (ВИП) (с $6 \div 10$ до $50 \div 70$). Наличие у КЭП с ВИП отрицательного входного импеданса создает предпосылки для потери устойчивости системы электроснабжения (СЭС), состоящей из СЭП и совокупности КЭП. Явления автоколебаний выходного напряжения СЭП выявляются в основном на стадии комплексных испытаний КА. Устранение автоколебаний выходного напряжения СЭП может быть осуществлено путем доработки энергопреобразующей аппаратуры, направленной на снижение выходного импеданса СЭП, а так же за счет повышения входного импеданса КЭП путем упрочнения входных фильтров каналов. Все это приводит к увеличению сроков и затрат на создание КА и увеличению их массы.

Современные требования к срокам и стоимости проектирования КА, предполагают исключение или минимизацию по времени и стоимости этапа доработки энергопреобразующей аппаратуры. Для чего необходимо точное определение допустимых значений выходного импеданса СЭП уже на раннем этапе проектирования КА. Следование стандарту питания Европейского космического агентства (ESA) или нормам предприятия, которые регламентируют уровень $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ только в зависимости от номинального выходного напряжения СЭП и мощности системы КЭП, но не учитывают реактивные параметры и специфику нагрузок конкретного космического аппарата, а также сеансное расписание коммутации КЭП, приводит к тому, что требования для ряда систем являются завышенными, что увеличивает трудозатраты при проектировании соответствующей системы, для других – занижены, последствием чего может стать увеличение длительности этапа обработки или выход системы из строя в процессе эксплуатации.

В работах В.В.Златоманова и Б.С.Яковлева описан способ определения допустимых значений выходного импеданса СЭП по известным значениям входного импеданса системы КЭП, исходя из условия обеспечения заданных запасов устойчивости по амплитуде и фазе СЭС. Однако на раннем этапе проектирования СЭП зачастую невозможно получить входной импеданс $Z_{КЭП}(j\omega)$ КЭП аналитически или построить его частотные характеристики экспериментально, так как сами каналы также находятся в стадии разработки или доработки.

Таким образом, актуальным является решение задачи создания методики определения допустимых значений выходного импеданса СЭП из условий устойчивости СЭС при ограниченной информации о каналах электропотребления. Также целесообразно разработать способ снижения требований к выходному импедансу СЭП в случае, если задаваемые, из соображений устойчивости, значения его модуля существенно меньше обеспечиваемых современным уровнем развития техники. Решение этих

задач позволит значительно сократить объем доработки энергопреобразующей аппаратуры СЭП после этапа комплексных испытаний СЭС или совсем исключить его, тем самым снижая затраты и ускоряя ввод изделия в эксплуатацию.

Разработка и производство СЭП ведется следующими фирмами: Alcatel (Франция), Lockheed Martin и Hughes (США). В России СЭП разрабатывают и производят в ОАО “Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева” (г. Железногорск), НПЦ “Полус” (г. Томск) и ОАО “НПО Энергия” (г. Самара) и на ряде других предприятий.

Исследованиями процессов в энергопреобразующей аппаратуре занимаются в Московском и Самарском государственных авиационных университетах, Московском государственном энергетическом университете, С. Петербургском ВИКИ им. Можайского, Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники, Сибирском федеральном университете, Сибирском государственном аэрокосмическом университете.

Актуальность подтверждается и хозяйственными договорами № 20/2, №22/1 выполняемыми в ГУ НИИ информатики и процессов управления Красноярского государственного технического университета в период с 2000 по 2006 гг. при участии автора.

Объектом исследования настоящей работы является система электроснабжения (СЭС) космического аппарата и ее подсистемы: система электропитания и система каналов электропотребления.

Предметом исследования является взаимное влияние автономной системы электропитания и системы каналов электропотребления.

Цель работы состоит в разработке методики формирования требований к выходному импедансу СЭП на ранних этапах проектирования по ограниченному данным о каналах электропотребления из условия обеспечения устойчивости СЭС. Для достижения поставленной цели в работе решались следующие задачи:

1. Анализ влияния мощности нагрузки, параметров ВИП, кабельной сети, входного фильтра, а также топологии КЭП на амплитудную и фазовую частотные характеристики входного импеданса КЭП для определения достаточной информации о частотной характеристике входного импеданса КЭП.

2. Разработка методики определения частотных характеристик входного импеданса системы КЭП по ограниченному данным о каналах.

3. Разработка методики формирования требований к выходному импедансу СЭП по известным частотным характеристикам входного импеданса системы КЭП из условия устойчивой работы СЭП как на заданную группу КЭП, так и при всех возможных комбинациях одновременно функционирующих КЭП.

4. Оценка устойчивости разработанной СЭС при возможных изменениях сеансного расписания.

5. Разработка решений по снижению результирующего входного импеданса системы однотипных КЭП с целью ослабления требований к уровню модуля выходного импеданса СЭП или для обеспечения

устойчивости СЭС в случае использования СЭП, имеющей высокий модуль выходного импеданса.

Основной идеей диссертации является разработка методики формирования требований к частотным характеристикам выходного импеданса СЭП с учетом всех возможных комбинаций одновременно функционирующих КЭП и при наличии ограниченной информации о каналах электропотребления на ранних этапах проектирования.

Методы исследования: моделирование электромагнитных процессов на ЦВМ с использованием системы схемотехнического проектирования OrCAD, использование теории линейных непрерывных систем автоматического управления (логарифмические частотные характеристики, частотные критерии устойчивости), использование теории линейных электрических цепей (прямые методы расчета цепей переменного тока, операторные методы анализа цепей), физическое макетирование.

Основные результаты:

1. Установлено, что входной импеданс отдельного КЭП определяется мощностью нагрузки, параметрами входной цепи КЭП, наличием или отсутствием ВИП. Это позволяет минимальной и достаточной информацией для определения ЧХ входного импеданса КЭП с ВИП считать: мощность нагрузки P_n , индуктивность L_{KC} и активное сопротивление r_{KC} кабельной сети, емкость $C_{B\Phi}$ и внутреннее активное сопротивление $r_{B\Phi}$ конденсатора входного фильтра ВИП.

2. Разработана методика, позволяющая определить входной импеданс отдельных КЭП произвольной структуры и системы каналов электропотребления по ограниченным данным о каналах, таких как мощность нагрузки, параметры входной цепи КЭП, тип нагрузки.

3. Определены выражения для нахождения допустимых значений частотных характеристик выходного импеданса $Z_{СЭП}(j\omega)$ СЭП при работе на заданную группу КЭП из условия устойчивости СЭС, как замкнутой динамической системы, линейной и непрерывной по макропроцессам. Разработана методика формирования требований к выходному импедансу СЭП из условия устойчивой работы СЭС при всех возможных комбинациях одновременно функционирующих КЭП, применение которой позволяет определить допустимые значения модуля и фазы выходного импеданса СЭП при изменяющемся в результате коммутаций каналов результирующем входном импедансе системы параллельно включенных КЭП.

4. Разработан алгоритм оценки устойчивости СЭС с известными частотными характеристиками импедансов СЭП и КЭП с учетом сеансного расписания коммутации КЭП.

5. Предложен способ увеличения модуля результирующего входного импеданса системы параллельно включенных однотипных КЭП основанный на разнесении резонансных частот отдельных подсистем КЭП - кабельная сеть и позволяющий повысить допустимые значения модуля выходного импеданса СЭП.

Научную новизну представляют:

- Аналитическое выражение, позволяющее определить по ограниченным

данным входной импеданс канала электропотребления с вторичным источником питания.

- Выражения для определения допустимых значений частотных характеристик выходного импеданса СЭП из условия устойчивости СЭС при изменяющемся согласно сеансному расписанию результирующем входном импедансе системы КЭП.

Значение для теории заключается в расширении области применения известного метода формирования требований к выходному импедансу СЭП по входному импедансу системы КЭП для случая проектирования СЭП при неполной информации о каналах электропотребления. При этом показано, что минимальной и достаточной информацией для определения частотных характеристик входного импеданса КЭП с ВИП являются: мощность нагрузки, индуктивность и активное сопротивление кабельной сети, емкость и внутреннее активное сопротивление конденсатора входного фильтра ВИП.

Значение для практики. Для практики проектирования интерес представляют:

- Имитационные модели КЭП различного типа, синтезированные в среде OrCAD, использование которых позволяет автоматизировать исследование электромагнитных процессов в КЭП.

- Методика задания обоснованных требований к выходному импедансу СЭП и автоматизация расчета его допустимых значений за счет использования программного модуля вычисления границ зон изменения амплитуды и фазы входного импеданса системы КЭП в различных режимах работы.

- Способ увеличения модуля результирующего входного импеданса системы КЭП, включающей в себя однотипные каналы, с целью повышения допустимых значений модуля выходного импеданса СЭП.

- Программно реализованный алгоритм оценки устойчивости СЭС во всех заданных режимах сеансного расписания.

Достоверность полученных результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов, полученных аналитическими методами, методами численного моделирования и физического макетирования, а также результатами испытаний опытных и серийных экземпляров СЭП КА.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- Международной научно-практической конференции “САКС-2004”, г. Красноярск, 2004 г.

- Всероссийской с международным участием конференции «Современные проблемы радиоэлектроники», г. Красноярск, 2005 г.

- Международной научно-технической конференции «Электромеханические преобразователи энергии», г. Томск, 2005 г.

- Международной научно-технической конференции «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, 2006 г.

- Всероссийской научно-технической конференции «Молодежь и наука: начало XXI века», г. Красноярск, 2006 г.

Использование результатов диссертации. Основные научные и практические результаты использованы при разработке СЭП космических аппаратов в ОАО “Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф. Решетнева” и в учебном процессе СФУ.

Рекомендации по использованию результатов диссертации. Научные и практические результаты, полученные в ходе выполнения работ по диссертации, целесообразно использовать при разработке новых систем электропитания на предприятиях, занимающихся проектированием и изготовлением космических аппаратов, а также при проектировании автономных систем электропитания постоянного тока для автоматических станций мониторинга окружающей среды, систем телеуправления удаленными объектами, выполненных на основе солнечных батарей, термоэлектрических преобразователей или других аналогичных первичных источников энергии.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, из них: статей в рецензируемых изданиях по списку ВАК - 1; статей в центральных изданиях - 1; статей в сборниках - 3; статей в официально зарегистрированных ВАК электронных изданиях – 1; трудов в материалах всероссийских и международных конференций - 4.

Общая характеристика диссертации. Диссертация содержит основной текст на 147 с., 69 иллюстраций, 8 таблиц, список использованной литературы из 74 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении показана актуальность проблемы, сформулированы цель работы и решаемые задачи. Изложены основные научные результаты, методы исследований, сведения об апробации работы и практическом использовании результатов.

В первой главе описан объект исследования – система электроснабжения космического аппарата, которая представляется в виде двух взаимодействующих подсистем, соединенных общими шинами: системой электропитания и системой каналов электропотребления. Рассмотрены различные варианты топологий СЭП, применяемых зарубежными и отечественными компаниями. Показано, что одним из основных критериев сравнения различных топологий СЭП является их способность к обеспечению требуемого качества напряжения на выходе СЭП во всех режимах ее работы. Выявлены преимущества СЭП с управлением, обеспечивающим минимальный модуль выходного импеданса $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ СЭП по току нагрузки, которое при прочих равных условиях позволяет получить необходимую стабильность напряжения на выходных шинах СЭП при использовании менее мощных входных фильтров КЭП. Приведены требования стандарта питания Европейского космического агентства к выходному импедансу СЭП, регламентирующие его амплитудную частотную характеристику (АЧХ).

О характере токопотребления КЭП, как в установившихся, так и в динамических режимах, можно судить по амплитудной и фазовой частотным

характеристикам входного импеданса $Z_{КЭП}(j\omega)$ КЭП, который определяется типом их вторичного источника питания (ВИП), структурой, параметрами нагрузки и входного фильтра КЭП. В настоящее время влияние отдельных параметров ВИП и его нагрузок на входной импеданс КЭП изучено недостаточно. В главе проведена классификация современных КЭП по потребляемой мощности, характеру взаимодействия с СЭП, уровню допуска напряжения на входе КЭП; типу, числу, схеме построения преобразователей в ВИП и характеру их нагрузок. Выделены следующие основные типы потребителей КЭП современных КА (рис.1): активно-индуктивная нагрузка, активно-индуктивно-емкостная нагрузка, вторичный источник питания, работающий на активную нагрузку или электромеханический преобразователь (ЭМП). Показано, что в настоящее время большинство КЭП космических аппаратов (более 80% потребляемой мощности) составляют КЭП с ВИП.

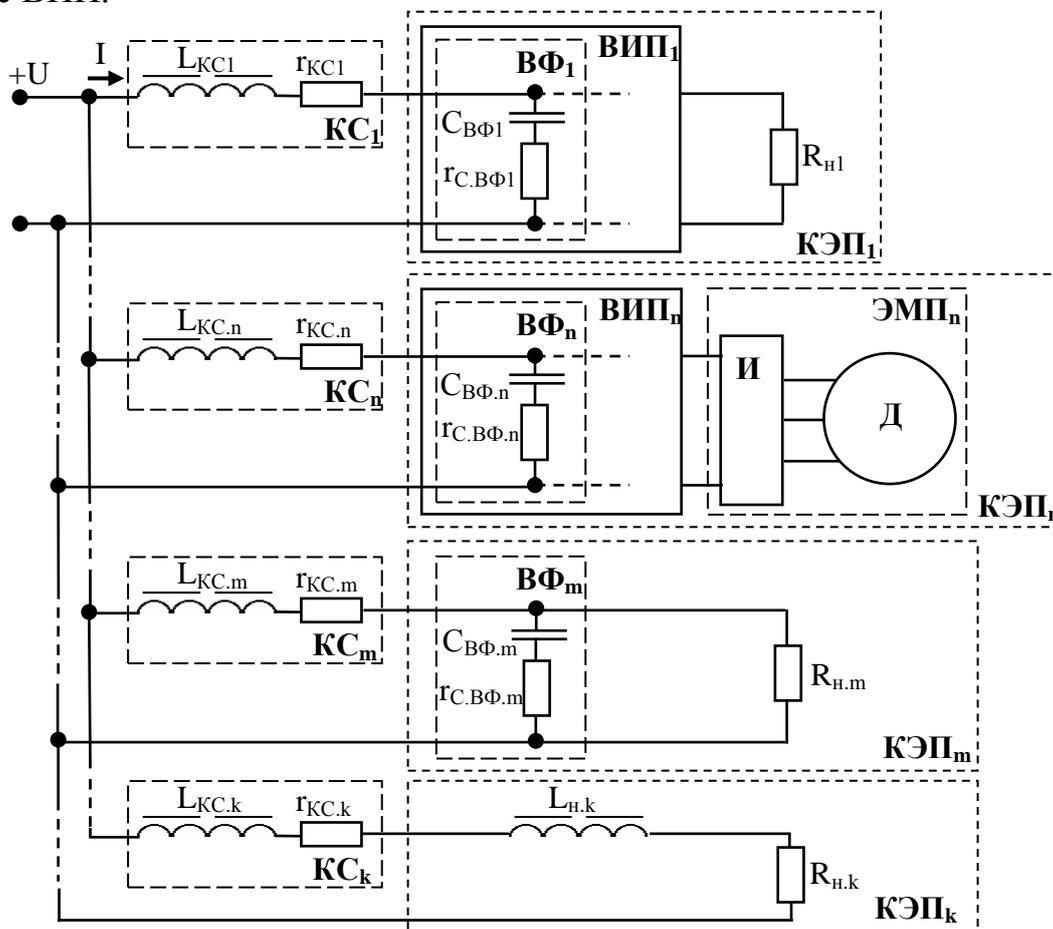


Рис.1. Система каналов электропотребления

По схеме построения выделены следующие типы импульсных преобразователей, используемых в ВИП: повышающие, понижающие, инвертирующие, однотактные (прямоходовые, обратноходовые), двухтактные (мостовые, полумостовые). В результате проведенного сравнения электромагнитных процессов в типовых преобразователях, которые выпускаются различными фирмами в настоящее время, установлено, что все указанные преобразователи обеспечивают длительность переходного процесса в доли или единицы миллисекунд при возмущениях по входу (изменение входного напряжения) и выходу (изменение тока, потребляемого нагрузкой), не вызывающих прерывания процесса ШИМ. Приведены

временные диаграммы, полученные в результате коммутации КЭП, показывающие влияние на характер токопотребления мощности КЭП, доли ВИП-нагрузки, индуктивности входной цепи КЭП.

Описан способ оценки устойчивости СЭС, как линейной непрерывной системы, на основе сопоставления импедансов СЭП и КЭП. Указаны ограничения на использование этого метода для оценки устойчивости СЭС. Изложен метод определения допустимых значений выходного импеданса СЭП из условия обеспечения требуемых запасов устойчивости СЭС по амплитуде и фазе, по известным ЧХ входного импеданса системы КЭП. Выделены параметры КЭП, информация о которых, как правило, является доступной разработчикам СЭП на раннем этапе проектирования. К ним отнесены: мощность нагрузки, индуктивность и активное сопротивление кабельной сети, емкость и активное сопротивление входного фильтра ВИП, тип потребителя КЭП.

Во второй главе разработаны методы определения частотных характеристик входного импеданса КЭП. Для получения частотных характеристик входного импеданса КЭП экспериментальным путем предложено использовать частотные методы. Описаны особенности определения ЧХ импеданса $Z_{кэл}(j\omega)$ методом физического эксперимента с использованием самих КЭП, их макетов, либо устройств, имитирующих аппаратуру каналов, и методом модельного эксперимента с использованием моделей КЭП в формате PSpice в системе сквозного проектирования OrCAD.

Для определения зависимостей входного импеданса КЭП от его параметров проведены экспериментальные исследования с использованием моделей КЭП в формате PSpice. Для исследований использовались модели КЭП с двумя вариантами схемы управления ВИП: с законом управления, названным его авторами оптимальным по быстродействию (БУ), и с инерционно-форсирующим корректирующим устройством (ИФКУ) в цепи обратной связи. В моделях в качестве силовых цепей ВИП выбраны конверторы понижающего (ПН), повышающего (ПВ) и инвертирующего (ИН) типов. Также проведены исследования для ВИП со следующими схемами построения преобразователя: однотактный (прямоходовый, обратноходовый), двухтактный (мостовой, полумостовой). Используются следующие варианты КЭП равной мощности (рис.1): канал электропотребления с ВИП, работающим на активную нагрузку, КЭП с ВИП, работающим на ЭМП, КЭП с емкостным входным фильтром и активной нагрузкой, КЭП с активно-индуктивной нагрузкой.

Частотные характеристики входного импеданса КЭП получены при вариации мощности P_n нагрузки (рис.2,а), индуктивности $L_{кС}$ кабельной сети (КС) (рис.2,б), емкости $C_{вФ}$ входного фильтра (ВФ) ВИП (рис.2,в), активных сопротивлений $r_{кС}$ и $r_{вФ}$, соответственно, кабельной сети и входного фильтра, используемого в ВИП закона управления (ИФКУ, БУ), частоты преобразования f_{np} , типа конвертора ВИП (ПН, ПВ, ИН), типа потребителя КЭП (ВИП, RL-нагрузка, RLC-нагрузка) (рис.2,г), количества N КЭП (рис.2,д). Вариация параметров КЭП и КС производилась относительно

базовых. За базовые параметры приняты: $P_n=333$ Вт, $L_{KC}=2$ мкГн, $C_{BФ}=50$ мкФ, $r_{KC}=0.12$ Ом, $r_{BФ}=0.01$ Ом, $f_{np}=40$ кГц, конвертор ПН, закон управления ВИП - БУ, тип потребителя – ВИП, $N=1$. Значения модуля импеданса КЭП на рис.2, б-г записаны в относительных единицах, где U - напряжение на входе КЭП, P - мощность КЭП.

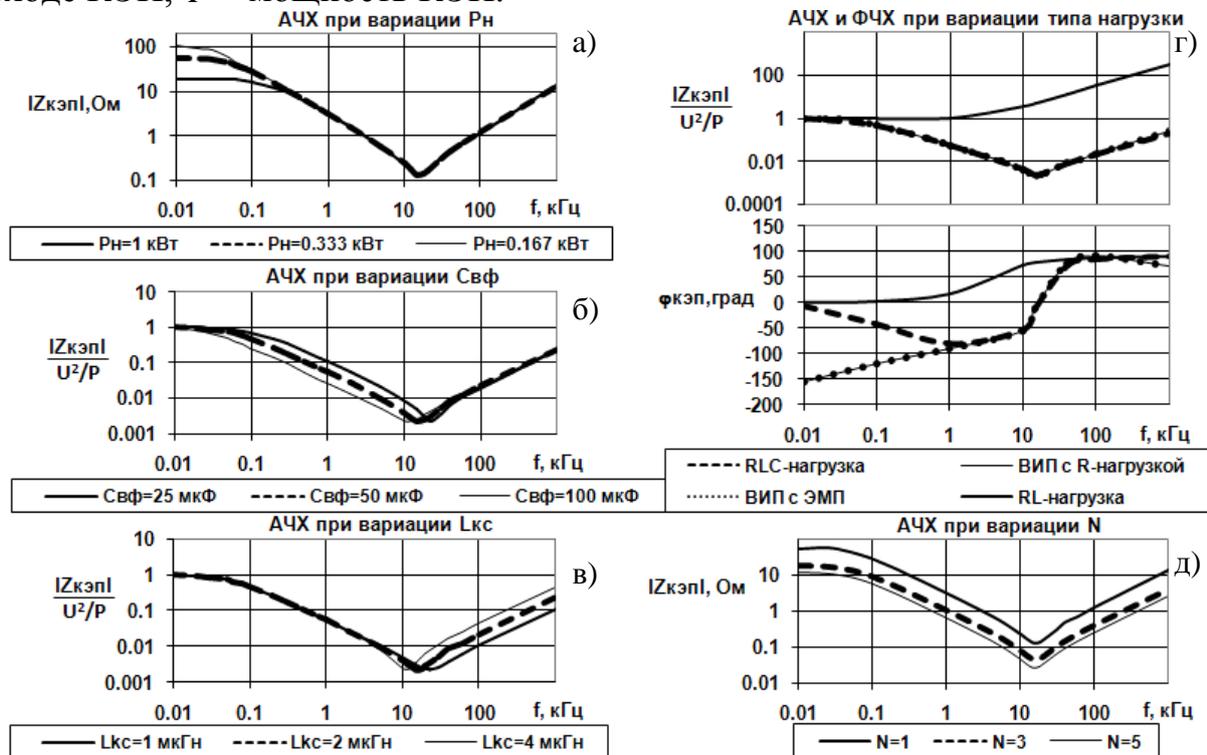


Рис.2. АЧХ и ФЧХ входного импеданса КЭП

Полученные частотные характеристики входного импеданса КЭП позволили сделать следующие выводы:

1. Частота преобразования, закон управления ВИП, тип силовой цепи не влияют на ЧХ входного импеданса КЭП, т.е. частотные свойства КЭП практически не зависят от параметров ВИП и его динамических характеристик.

2. Низкочастотный участок (НЧ) амплитудной частотной характеристики (АЧХ) $|Z_{кэп}(j\omega)|$ входного импеданса КЭП определяется только мощностью нагрузки. Фазовая частотная характеристика (ФЧХ) $\varphi_{кэп}(j\omega)$ входного импеданса КЭП на НЧ близка к нулю при использовании в качестве потребителя КЭП активной нагрузки. КЭП с ВИП на низких частотах имеет отрицательное входное сопротивление, т.е. фазовый сдвиг между входным током $I_{кэп}(j\omega)$ КЭП и питающим напряжением $U_{кэп}(j\omega)$ близок к π . Таким образом, входной импеданс КЭП на НЧ зависит от мощности нагрузки ВИП и от наличия (отсутствия) ВИП и не зависит от других параметров КЭП и КС. Использование в КЭП вторичного источника питания не влияет на АЧХ входного импеданса КЭП, но создает неминимально-фазовый сдвиг ФЧХ на очень низких частотах.

3. На участке средних частот (СЧ) АЧХ и ФЧХ обуславливаются емкостью $C_{BФ}$ входного фильтра.

4. На высокочастотном участке (ВЧ) ЧХ зависят только от параметров КС.

5. Минимум модуля входного импеданса $|Z_{КЭП}(j\omega)|$ КЭП находится на резонансной частоте $f_{рез}$ входной цепи, образованной кабельной сетью и емкостным входным фильтром, где

$$f_{рез} = 1 / (2\pi \sqrt{L_{КС} C_{ВФ}}). \quad (1)$$

Минимальная величина модуля входного импеданса КЭП, соответствующая резонансной частоте, $|Z_{КЭП}(j\omega)|_{min} \approx r_{КС} + r_{ВФ}$, а фазовая характеристика при $|Z_{КЭП}(j\omega)|_{min}$ близка к нулю.

Таким образом, входной импеданс отдельного КЭП определяется мощностью нагрузки, параметрами активных и реактивных элементов кабельной сети и входного фильтра, типом потребителя (активная нагрузка, ВИП). При этом частотные характеристики можно условно разделить на три зоны, характер амплитуды и фазы на которых определяется соответствующим параметром КЭП:

1-я зона (НЧ) – уровень АЧХ определяется мощностью нагрузки, ФЧХ – ее типом;

2-я зона (СЧ) – АЧХ и ФЧХ определяются емкостью входного фильтра КЭП;

3-я зона (ВЧ) – АЧХ и ФЧХ определяются индуктивностью кабельной сети КЭП.

Входной импеданс отдельного КЭП с ВИП с учетом его КС вычисляется по выражению

$$Z_{КЭП}(j\omega) = Z_{КС}(j\omega) + \frac{Z_{ВФ}(j\omega) \cdot Z_{ВИП}(j\omega)}{Z_{ВФ}(j\omega) + Z_{ВИП}(j\omega)}, \quad (2)$$

где $Z_{КС}(j\omega)$ - комплексное сопротивление кабельной сети, $Z_{ВФ}(j\omega)$ - комплексное сопротивление входного фильтра ВИП, $Z_{ВИП}(j\omega)$ - комплексное сопротивление собственно ВИП (без ВФ) с учетом его нагрузки.

Аналитическое получение выражений для комплексных сопротивлений КС и ВФ не вызывает затруднений, так как их параметры могут быть определены на раннем этапе проектирования СЭП в соответствии с заданными топологией КЭП и мощностью нагрузки.

Комплексное сопротивление ВИП определяется его структурой и параметрами, полная информация о которых недоступна на ранних этапах проектирования СЭП, т.к. зачастую КЭП также находится в стадии разработки. Для определения сопротивления $Z_{ВИП}(j\omega)$ ВИП, необходимого для вычисления входного импеданса $Z_{КЭП}(j\omega)$ КЭП, был проведен анализ динамики процессов в КЭП при низких частотах задающего воздействия. Как было установлено, входной импеданс КЭП на НЧ зависит от мощности нагрузки, от наличия (отсутствия) ВИП и не зависит от других параметров КЭП и КС. Проведенные исследования процессов в КЭП при изменении входного напряжения показали, что при работе преобразователя на низких частотах запас энергии в реактивных элементах $L_{вых.ф}$, $C_{вых.ф}$ выходной цепи ВИП, не изменяется в случае возмущения по входу, т.е. средние за период

значения $I_{L_{\text{вых.}\phi}}$ и $U_{C_{\text{вых.}\phi}}$ после изменения входного напряжения такие же, как и до него. Такая динамика процессов в ВИП возможна в том случае, если преобразователь является потребителем постоянной мощности, т.е. средняя мощность, потребляемая ВИП за период преобразования, не зависит от значения входного напряжения КЭП. Для проверки этого утверждения был проведен эксперимент с использованием модели КЭП с ВИП в среде OrCAD. Временные диаграммы переходного процесса в ВИП, вызванного скачком напряжения на входе КЭП, приведены на рис.3.

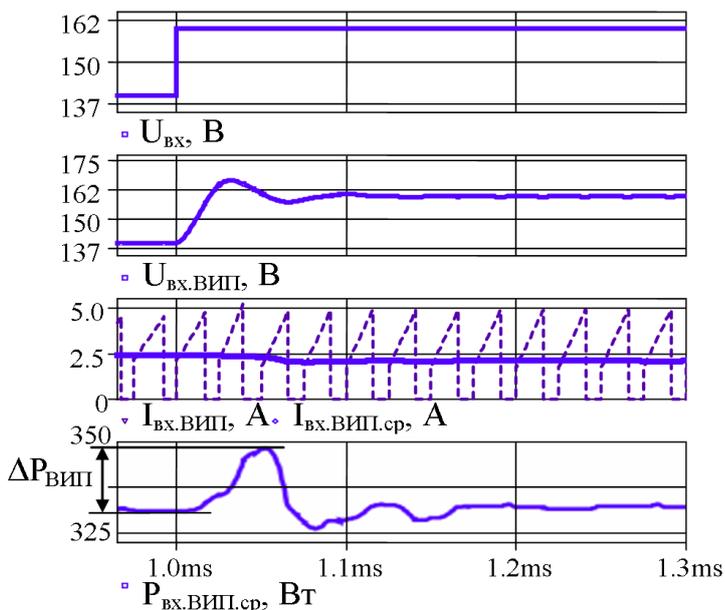


Рис.3. Временные диаграммы переходного процесса в ВИП

Как видно из временных диаграмм, средняя мощность, потребляемая ВИП (равная произведению среднего за период преобразования значения входного тока $I_{\text{вх.ВИП}}$ ВИП, на среднее за период преобразования значение напряжения $U_{\text{вх.ВИП}}$ на входе ВИП) до изменения входного напряжения КЭП, равна средней мощности, потребляемой ВИП после завершения переходного процесса. Кратковременное изменение мощности преобразователя сразу после коммутации на величину

$\Delta P_{\text{ВИП}}$ составляет около 5% от мощности преобразователя в установившемся режиме и устраняется за доли и единицы миллисекунд, при любом законе управления, используемом в современных ВИП. Такое изменение мощности объясняется зарядом (разрядом) конденсатора входного фильтра ВИП. Временной интервал, за который мощность, потребляемая ВИП, достигает своего установившегося значения, соответствует диапазону средних частот, на котором входной импеданс КЭП, определяется емкостью ВФ. При этом границы СЧ-участка не могут быть смещены вправо, поскольку минимальная емкость конденсатора ВФ ограничена предельно допустимой величиной пульсаций тока, потребляемого им. Таким образом, на низких частотах и постоянном токе ВИП можно считать потребителем постоянной мощности.

Это допущение позволяет при рассмотрении низкочастотного участка входного импеданса КЭП заменить ВИП эквивалентным активным сопротивлением R_n / K_n^2 , где K_n - коэффициент передачи ВИП по напряжению. Поскольку фазовая характеристика импеданса $Z_{\text{КЭП}}(j\omega)$ на низких частотах равна $-\pi$, т.е. звено $Z_{\text{ВИП}}(j\omega)$ должно являться неминимально-фазовым, комплексное сопротивление ВИП необходимо представить эквивалентным отрицательным сопротивлением

$Z_{ВИП}(j\omega) = -(R_n / K_n^2)$. В результате получим звено, дающее соответствующую величину модуля входного импеданса КЭП и свойственный ВИП неминимально-фазовый сдвиг на НЧ.

Диапазон частот, на которых преобразователь не обрабатывает входные возмущения, т.е. СЧ и ВЧ участки, соответствует минимуму модуля комплексного сопротивления $|Z_{ВИП}(j\omega)|$ ВИП. При этом сопротивление ВИП в области средних и высоких частот значительно превышает сопротивление включенного с ним параллельно емкостного ВФ. Следовательно, сопротивление $Z_{ВИП}(j\omega)$ в диапазоне СЧ и ВЧ можно считать бесконечно большим, либо оставить равным $Z_{ВИП}(j\omega) = -(R_n / K_n^2)$, где $R_n / K_n^2 \gg |Z_{ВФ}(j\omega)|$. С учетом сделанных относительно $Z_{ВИП}(j\omega)$ на НЧ, СЧ, ВЧ выводов, выражение (2) примет вид:

$$Z_{КЭП}(j\omega) = Z_{КС}(j\omega) + \frac{Z_{ВФ}(j\omega) \cdot \left(-\frac{R_n}{K_n^2}\right)}{Z_{ВФ}(j\omega) + \left(-\frac{R_n}{K_n^2}\right)} = (r_{КС} + j\omega L_{КС}) + \frac{\left(r_{ВФ} - \frac{j}{\omega C_{ВФ}}\right) \cdot \left(-\frac{R_n}{K_n^2}\right)}{\left(r_{ВФ} - \frac{j}{\omega C_{ВФ}}\right) + \left(-\frac{R_n}{K_n^2}\right)}, \quad (3)$$

где $Z_{КЭП}(j\omega)$ - входной импеданс отдельного КЭП с ВИП.

Результирующий входной импеданс $Z_{КЭП.э}(j\omega)$ системы КЭП определяется в соответствии ее топологией. Наиболее распространенной и рекомендованной стандартом питания ESA является топология с N параллельно включенными КЭП. Для такой системы эквивалентный входной импеданс определяется выражением:

$$Z_{КЭП.э}(j\omega) = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{Z_{КЭП.i}(j\omega)}}, \quad (4)$$

где $Z_{КЭП.i}(j\omega)$ - входной импеданс i -го КЭП.

С целью проверки справедливости полученного аналитического выражения для определения входного импеданса КЭП с ВИП были построены частотные характеристики модуля и фазы импеданса $Z_{КЭП}(j\omega)$, вычисленного в соответствии с (3). Параметры КЭП, входящие в (3), совпадают с соответствующими параметрами моделей КЭП, использованных при экспериментальном исследовании входного импеданса КЭП. Сравнение расчетных ЧХ с соответствующими экспериментальными показало их удовлетворительное совпадение. При этом относительное отклонение составляет 0÷5.8%. Таким образом, выражение (3) может быть применено для определения входного импеданса отдельного КЭП с ВИП при ограниченных данных о канале.

На основе выражений (3) и (4), а также полученных в работе выражений для нахождения входного импеданса других типовых каналов электропотребления сформулирована методика определения результирующего входного импеданса $Z_{КЭП.э}(j\omega)$ системы КЭП произвольной структуры на основании информации только о мощности нагрузки, параметрах кабельной сети и входного фильтра, типе потребителя.

Третья глава посвящена разработке методики формирования требований к выходному импедансу СЭП.

На основании допущении о линейности и непрерывности систем КЭП и СЭП с ВИП по макропроцессам СЭС представлена как замкнутая динамическая система, для анализа устойчивости которой применимы методы исследования непрерывных систем. Для оценки устойчивости СЭС выбран частотный критерий Найквиста, как наиболее удобный метод анализа замкнутой системы по ЧХ разомкнутого контура, которые можно получить через АЧХ и ФЧХ импедансов СЭП и КЭП. Определены условия нахождения СЭС на границе устойчивости:

$$\begin{cases} |Z_{СЭП}(j\omega)| = |Z_{КЭП.э}(j\omega)| \\ \varphi_{СЭП}(\omega) = \varphi_{КЭП.э}(\omega) - \pi \end{cases} \quad (5)$$

Входящие в состав уравнений (5) частотные характеристики модуля $|Z_{КЭП.э}(j\omega)|$ и фазы $\varphi_{КЭП.э}(\omega)$ результирующего входного импеданса системы КЭП, могут быть определены по полученным в главе 2 выражениям (3) и (4). С использованием известных ЧХ входного импеданса $Z_{КЭП.э}(j\omega)$ системы КЭП на основании (5) и логарифмического критерия Найквиста сформулированы требования к логарифмическим частотным характеристикам выходного импеданса $Z_{СЭП}(j\omega)$ СЭП при работе на заданную группу КЭП: для устойчивости СЭС необходимо и достаточно, чтобы на частотах, где логарифмическая амплитудная частотная характеристика (ЛАЧХ) выходного импеданса СЭП проходит выше ЛАЧХ результирующего входного импеданса системы КЭП, логарифмическая фазовая частотная характеристика (ЛФЧХ) выходного импеданса СЭП не пересекала фазовую характеристику результирующего входного импеданса системы КЭП, сдвинутую на значение $-\pi$. То есть, выходной импеданс $Z_{СЭП}(j\omega)$ СЭП удовлетворяет условиям устойчивости системы, если на всем диапазоне частот выполняется условие

$$\begin{cases} |Z_{СЭП}(j\omega)| < |Z_{КЭП.э}(j\omega)| \\ \varphi_{СЭП}(\omega) = \varphi_{КЭП.э}(\omega) - \pi \end{cases} \quad (6)$$

Поскольку на практике происходят постоянные коммутации КЭП, вследствие чего изменяется результирующий входной импеданс системы КЭП, а, следовательно, и условие устойчивости (6), найдены выражения (7) - (9) для определения допустимых значений модуля и фазы импеданса $Z_{СЭП}(j\omega)$ СЭП из условия устойчивости СЭС во всех режимах функционирования КЭП, описываемых заданным сеансным расписанием. Для чего проведен анализ устойчивости СЭС при различном расположении логарифмических амплитудной и фазовой ЧХ выходного импеданса СЭП относительно логарифмических амплитудной и фазовой ЧХ результирующего входного импеданса системы КЭП. Для формализации и упрощения описания совокупности частотных характеристик КЭП, построенных для каждой из k возможных комбинаций одновременно функционирующих КЭП, введены следующие функции, ограничивающие сверху и снизу зоны изменения модуля и фазы входного импеданса системы

КЭП: $Z_{zp.min}(\omega) = \min(|Z_{КЭП.э.k}(j\omega)|)$, $Z_{zp.max}(\omega) = \max(|Z_{КЭП.э.k}(j\omega)|)$;
 $\varphi_{zp.min}(\omega) = \min(\varphi_{КЭП.э.k}(\omega))$, $\varphi_{zp.max}(\omega) = \max(\varphi_{КЭП.э.k}(\omega))$ (рис.4).

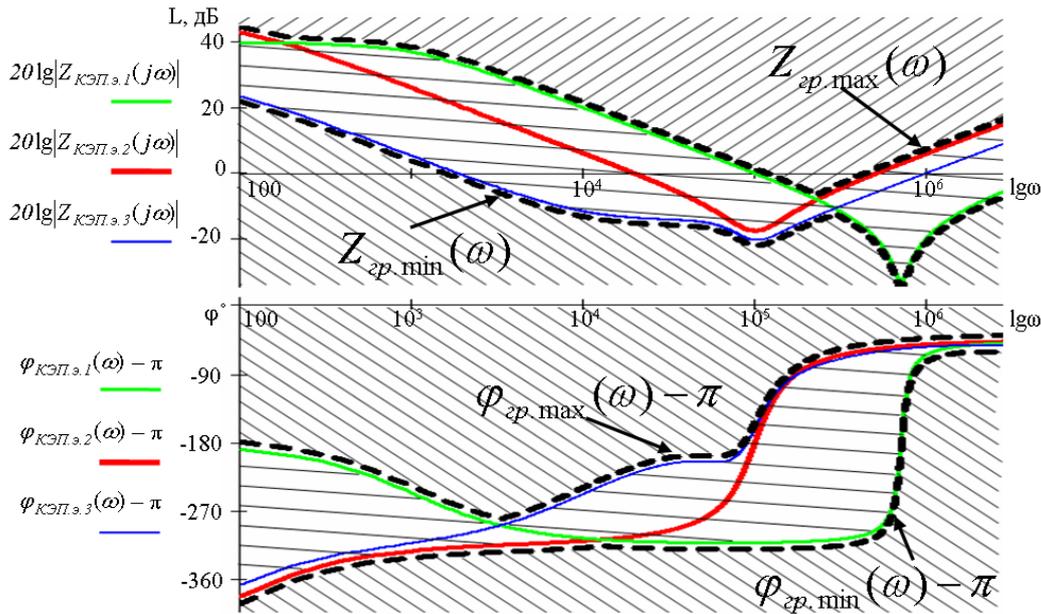


Рис.4. Логарифмические характеристики модуля и фазы результирующего входного импеданса $Z_{КЭП.э.k}(j\omega)$ системы КЭП в различных режимах

На основании анализа устойчивости СЭС при различном расположении ЛАЧХ и ЛФЧХ импеданса $Z_{СЭП}(j\omega)$ относительно $Z_{zp.min}(\omega)$, $Z_{zp.max}(\omega)$, $\varphi_{zp.min}(\omega)$, $\varphi_{zp.max}(\omega)$ сформулированы следующие требования к выходному импедансу СЭП из условия устойчивой работы СЭС с необходимыми запасами устойчивости по амплитуде β и фазе $\Delta\varphi$ при всех возможных комбинациях одновременно функционирующих КЭП:

- СЭП будет обеспечивать устойчивую работу СЭС во всех заданных режимах функционирования КЭП, если на всем диапазоне частот выполняется хотя бы одно из условий:

$$\begin{cases} |Z_{СЭП}(j\omega)| < Z_{zp.min}(\omega) \cdot \beta \\ \varphi_{СЭП}(\omega) \notin [\varphi_{zp.min}(\omega) - \pi - \Delta\varphi; \varphi_{zp.max}(\omega) - \pi + \Delta\varphi] \end{cases} \quad (7)$$

- При выходном импедансе СЭП, ЧХ которого в интервале частот от ω_m до ω_l лежат в областях:

$$\begin{cases} |Z_{СЭП}(j\omega)| \in [Z_{zp.min}(\omega) \cdot \beta; Z_{zp.max}(\omega) \cdot \beta] \\ \varphi_{СЭП}(\omega) \in [\varphi_{zp.min}(\omega) - \pi - \Delta\varphi; \varphi_{zp.max}(\omega) - \pi + \Delta\varphi] \end{cases} \quad (8)$$

а на всем остальном диапазоне частот удовлетворяют одному из условий (7), СЭС устойчива, если на частотах, на которых ФЧХ выходного импеданса СЭП $\varphi_{СЭП}(\omega) \in [\varphi_{КЭП.э.k}(\omega) - \pi - \Delta\varphi; \varphi_{КЭП.э.k}(\omega) - \pi + \Delta\varphi]$, модуль выходного импеданса $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ СЭП меньше модуля результирующего входного импеданса $|Z_{КЭП.э.k}(j\omega)|$ системы КЭП k -ом режиме, помноженного на величину β :

$$|Z_{СЭП}(j\omega)| < |Z_{КЭП.э.k}(j\omega)| \cdot \beta \quad (9)$$

$$\left. \begin{array}{l} \\ \varphi_{СЭП}(\omega) \in [\varphi_{КЭП.э.k}(\omega) - \pi - \Delta\varphi; \varphi_{КЭП.э.k}(\omega) - \pi + \Delta\varphi] \end{array} \right\}$$

На основании полученных выражений (7) - (9), позволяющих определить допустимые значения модуля и фазы выходного импеданса СЭП, и найденных в главе 2 аналитических зависимостей входного импеданса КЭП от его параметров предложена следующая методика формирования требований к выходному импедансу СЭП по ограниченным данным о каналах электропотребления из условия устойчивой работы СЭС во всех заданных техническим заданием режимах функционирования КЭП:

1. Вычисляется входной импеданс $Z_{КЭП.i}(j\omega)$ каждого из КЭП по определенным в главе 2 выражениям на основании информации о типе потребителя КЭП, мощности P_n нагрузки, индуктивности $L_{КС}$ кабельной сети, емкости $C_{ВФ}$ входного фильтра ВИП, активных сопротивлений $r_{КС}$ КС и $r_{ВФ}$ ВФ.

2. Производится анализ возможных функциональных состояний потребителей энергии. По результатам анализа составляется сеансное расписание, характеризующее состояние каждого канала (включен/выключен) в режиме k .

3. Для каждого режима рассчитывается результирующий входной импеданс $Z_{КЭП.э}(j\omega)$ системы КЭП по выражению (4), используя входные импедансы $Z_{КЭП.i}(j\omega)$ каналов, подключенных, согласно сеансному расписанию, к выходным шинам СЭП в данном режиме.

4. Рассчитываются границы и на основании (7) - (9) строятся области для определения возможных значений ЛАЧХ и ЛФЧХ выходного импеданса $Z_{СЭП}(j\omega)$ СЭП с учетом заданных запасов устойчивости по амплитуде и фазе.

5. В представляющем интерес диапазоне частот определяются допустимые значения модуля и фазы выходного импеданса $Z_{СЭП}(j\omega)$ СЭП при которых обеспечивается требуемая (7) и/или (8) - (9) устойчивость СЭС.

Применение данной методики для задания требований к выходному импедансу системы электропитания позволит сократить сроки и стоимость ее проектирования путем задания возможно больших значений модуля выходного импеданса $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ и исключения этапа доработки энергопреобразующей аппаратуры СЭП после стадии испытаний, в том случае, если СЭС оказывается неустойчивой.

Для автоматизации расчета границ зон изменения модуля $Z_{зр.min}(\omega)$, $Z_{зр.max}(\omega)$ и фазы $\varphi_{зр.min}(\omega)$, $\varphi_{зр.max}(\omega)$ входного импеданса системы КЭП в различных режимах функционирования каналов и построения по ним областей возможных значений ЧХ выходного импеданса СЭП предложенная методика реализована программным модулем в системе компьютерной математики MathCAD.

Полученное выражение (9) также может быть применено для оценки устойчивости разработанной СЭС с известными частотными

характеристиками импедансов СЭП и КЭП при возможных изменениях сеансного расписания, либо при разработке системы электроснабжения нового КА, в том случае, если его СЭС komponуется из ряда каналов электропотребления и уже имеющейся спроектированной СЭП с известным выходным импедансом. Для оценки устойчивости СЭС и определения возможности функционирования системы в заданных режимах сеансного расписания используется алгоритм, реализованный программным модулем в MathCAD. Входными данными алгоритма являются сеансное расписание коммутации КЭП, амплитудные и фазовые ЧХ выходного импеданса СЭП и входного импеданса КЭП и/или аналитические выражения импедансов. Суть алгоритма заключается в следующем: производится сравнение модулей и фаз импедансов СЭП и КЭП в каждом из k режимов сеансного расписания и определяются те режимы, в которых одновременно выполняются условия $|Z_{СЭП}(j\omega)| > |Z_{КЭП.э.k}(j\omega)| \cdot \beta$ и $\varphi_{СЭП}(\omega) \in [\varphi_{КЭП.э.k}(\omega) - \pi - \Delta\varphi; \varphi_{КЭП.э.k}(\omega) - \pi + \Delta\varphi]$, т.е. выявляются режимы в которых, в соответствии с выражением (9), СЭС теряет устойчивость. На основе полученных данных составляется матрица, содержащая информацию об устойчивости системы в k -ом режиме на всем рассматриваемом диапазоне частот. Выходом алгоритма является вывод об устойчивости или неустойчивости исследуемой системы электроснабжения при заданном сеансном расписании. В последнем случае выводятся номера режимов и частоты, на которых система неустойчива.

В том случае, если требуемые согласно (7) или (8) - (9) значения модуля выходного импеданса $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ СЭП в задаваемой полосе частот окажутся существенно меньше, обеспечиваемых в разработанных системах электропитания, то с целью снижения трудоемкости проектирования энергопреобразующей аппаратуры СЭП найдены технические решения, позволяющие повысить требуемые для обеспечения устойчивости значения модуля выходного импеданса $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ СЭП.

Для обеспечения устойчивости СЭС наименьшие значения модуль $|Z_{СЭП}(j\omega)|$ должен иметь в окрестности резонансной частоты $f_{рез}$ входной цепи КЭП, где модуль входного импеданса $|Z_{КЭП}(j\omega)|$ КЭП - минимален. В состав СЭС современных КА может входить более ста соединенных параллельно однотипных КЭП. В случае одинаковых параметров входной цепи эти каналы будут иметь одинаковую резонансную частоту $f_{рез}$. Следовательно, минимальное значение результирующего входного импеданса $|Z_{КЭП.э}(j\omega)|_{min}$ такой системы КЭП будет меньше, чем у системы каналов с разными резонансными частотами $f_{рез}$ входной цепи (рис.2,д), т.е. данный режим включения КЭП можно считать наилучшим в плане устойчивости.

Повысить модуль результирующего входного импеданса системы параллельно включенных однотипных КЭП предложено разнесением резонансных частот отдельных подсистем КЭП - кабельная сеть (КС). Согласно полученному в главе 2 выражению (1), резонансная частота, на которой находится минимум модуля входного импеданса $|Z_{КЭП}(j\omega)|$ КЭП,

определяется емкостью $C_{ВФ}$ входного фильтра ВИП и индуктивностью $L_{КС}$ кабельной сети. Изменить ее можно, задавая различные $C_{ВФ}$ и $L_{КС}$. КЭП, как правило, является изделием, поставляемым для КА, и параметры его входного фильтра устанавливаются производителем. Поэтому величина емкости $C_{ВФ}$ входного фильтра не может быть скорректирована разработчиками СЭП и СЭС. Следовательно, для повышения уровня модуля входного импеданса совокупности однотипных КЭП необходимо варьировать индуктивность кабельных сетей отдельных каналов. Реализовать это можно введением дополнительной индуктивности в кабельную сеть канала. Однако в этом случае увеличивается масса КЭП и всей СЭС в целом. Кроме того, в ряде случаев, например, при использовании стандарта питания ESA, накладываются ограничения на максимальную индуктивность КС.

Для формализации диапазона, в котором допустимо варьировать индуктивности КС обозначим: $L_{КС.max}$ - максимально возможную индуктивность КС, определяемую стандартом питания; $L_{КС.min}$ - минимально возможную индуктивность КС, величина которой обусловлена параметрами питающей линии.

Пусть к выходным шинам СЭП может быть одновременно подключено N однотипных каналов, т.е. КЭП с одинаковыми параметрами КС и ВФ. Индуктивность первого КЭП зададим равной $L_{КС1} = L_{КС.min}$, индуктивность N -го КЭП: $L_{КСN} = L_{КС.max}$. Согласно определенному в главе 2 выражению (1), КЭП с индуктивностью КС $L_{КС1} = L_{КС.min}$ при прочих равных параметрах будет иметь максимальную резонансную частоту $f_{рез1} = f_{рез.max}$, а КЭП с $L_{КСN} = L_{КС.max}$ - минимальную резонансную частоту: $f_{рез1} = f_{рез.min}$. Для уменьшения минимального значения результирующего входного импеданса данной системы N КЭП предлагается разнести резонансные частоты каналов КЭП₂, КЭП₃... КЭП _{$N-1$} в диапазоне от $f_{рез.min}$ до $f_{рез.max}$. Резонансная частота i -го КЭП при равномерном разнесении резонансных частот $f_{рез_i} - f_{рез_{i-1}} = f_{рез_{i+1}} - f_{рез_i}$ будет вычисляться как $f_{рез_i} = f_{рез.min} + \frac{f_{рез.max} - f_{рез.min}}{N - 1} \cdot (i - 1)$. Величина индуктивности КС i -го КЭП из выражения (1) определится: $L_{КС_i} = 1 / (4\pi \cdot f_{рез_i}^2 \cdot C_{ВФ})$.

Для задания различных индуктивностей КС каналов в диапазоне от $L_{КС.min}$ до $L_{КС.max}$ предлагается использовать КС различной длины, либо питающую сеть с разнесенными проводами. В первом случае для изменения индуктивности $L_{КС}$ в k раз необходимо увеличить длину КС также в k раз; во втором случае при увеличении расстояния d между осями проводов питающей линии в k раз индуктивность питающей сети получает приращение на единицу длины линии $\Delta L = \frac{\mu_0}{\pi} \ln k$ Гн. КС различной длины используются, если отдельные КЭП могут быть удалены от СЭП на разные расстояния. Питающую линию с разнесенными проводами необходимо

использовать при компактном расположении КЭП. Возможно одновременное использование первого и второго приемов коррекции индуктивностей КС каналов электропотребления.

Таким образом, разнесение резонансных частот у отдельных подсистем КЭП позволяет снизить требования (7), (8) и (9) к выходному импедансу СЭП, и, соответственно, упростить разработку энергопреобразующей аппаратуры СЭП.

Заключение

Основные результаты по решению научно-технической задачи создания методики определения допустимых значений амплитуды и фазы выходного импеданса СЭП, исходя из условий устойчивости СЭС, при ограниченной информации о каналах электропотребления, состоят в следующем:

1. Установлено, что минимальной и достаточной информацией для определения частотных характеристик входного импеданса КЭП с ВИП можно считать: мощность нагрузки P_n , индуктивность $L_{КС}$ и активное сопротивление $r_{КС}$ кабельной сети, емкость $C_{ВФ}$ и внутреннее активное сопротивление $r_{ВФ}$ конденсатора входного фильтра ВИП.

2. Разработана методика, применение которой позволяет определить входной импеданс отдельных КЭП произвольной структуры и системы каналов электропотребления по ограниченным данным о каналах.

3. Разработана методика формирования требований к выходному импедансу СЭП из условия устойчивой работы СЭС при всех возможных комбинациях одновременно функционирующих КЭП при ограниченных данных о каналах, позволяющая на ранних этапах проектирования учесть индивидуальные особенности КЭП КА и режимов их совместной работы и обоснованно определить допустимые значения выходного импеданса СЭП.

4. Сформулирован и реализован программно алгоритм оценки устойчивости разработанной СЭС, позволяющий выявить режимы функционирования КЭП и частотные диапазоны, на которых СЭС теряет устойчивость в случае возможных изменений сеансного расписания.

5. Предложен способ увеличения модуля результирующего входного импеданса системы параллельно включенных одностипных КЭП, позволяющий повысить допустимые значения модуля выходного импеданса СЭП.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

Публикация в издании по перечню ВАК:

1. Краснобаев Ю.В. Определение допустимых значений выходного импеданса автономной системы электропитания / Ю.В. Краснобаев, И.Н. Пожаркова // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. Выпуск 3 (16). - Красноярск: РИО СибГАУ, 2007. - С.91-96.

Прочие публикации:

1. Краснобаев Ю.В. Динамика быстродействующего импульсного стабилизатора напряжения с ШИМ в режимах, связанных с прерыванием модуляции / Ю.В. Краснобаев, И.В. Алатов, И.Н. Шульга (И.Н. Пожаркова) //

Информатика и системы управления. Вып.8: Межвуз. сб. науч. тр. / Отв. редактор С.В.Ченцов. – Красноярск: ГУ НИИ ИПУ, 2002. - С.45-50.

2.Иванчура В.И. Методика оценки устойчивости автономной системы электроснабжения с импульсными стабилизаторами / В.И.Иванчура, Ю.В.Краснобаев, И.Н.Пожаркова // Электрика. Научно-технический журнал. – М.: 2004. – №9. – с. 24-27.

3.Пожаркова И.Н. Методика определения амплитуды и фазы основной гармоники полигармонического сигнала в среде Orcad / И.Н.Пожаркова // Оптимизация режимов работы электротехнических систем: Межвуз. сб. науч. тр. / Отв. ред. С.Р.Залялеев. - Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2004. - С.22-28.

4.Иванчура В.И. Оценка устойчивости автономной системы электроснабжения / В.И.Иванчура, И.Н.Пожаркова // САКС-2004: Тез. докл. науч.-практ. конф. Третьего Сибир. Междунар. авиац.-космич. салона. – Красноярск: СибГАУ, 2004. - С.93-94.

5.Пожаркова И.Н. Определение частотных характеристик входной проводимости системы каналов энергопотребления / И.Н.Пожаркова // Современные проблемы радиоэлектроники: Сб. науч. тр. - Красноярск: КГТУ, 2005. – С. 495-497.

6.Иванчура В.И. Устойчивость системы электроснабжения постоянного тока с импульсными стабилизаторами / В.И.Иванчура, Ю.В.Краснобаев, И.Н.Пожаркова // Материалы международной НТК: “Электромеханические преобразователи энергии”. - Томск, 2005. - С.39 -41.

7.Иванчура В.И. Определение входного импеданса системы каналов энергопотребления по ограниченным данным о конечных потребителях / В.И.Иванчура, Ю.В.Краснобаев, И.Н.Пожаркова // Электронные и электромеханические системы и устройства. Тезисы докладов XVII НТК. – Томск: ФГУП НИЦ «Полюс», 2006. - С.29 – 32.

8.Пожаркова И.Н. Формирование требований к выходному импедансу системы электропитания автономного объекта на ранних этапах проектирования / И.Н.Пожаркова // Молодежь и наука: начало XXI века: материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 ч. Ч.2.- Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. - С.34-36.

9.Василенко К.Н. Задание требований к выходному импедансу системы электропитания автономного объекта / К.Н.Василенко, Ю.В.Краснобаев, И.Н.Пожаркова // Наука и образование. Электрон. научн.-техн. изд. [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/63590.html>, свободный. - Загл. с экрана.

Пожаркова Ирина Николаевна

Формирование требований к выходному импедансу систем электропитания космических аппаратов

Автореф. дисс. на соискание учёной степени кандидата технических наук

Подписано в печать 28.04.2009. Заказ

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1,2. Тираж 100 экз.

Отпечатано на в ИПК СФУ

660074, Красноярск, ул. Киренского, 28