

На правах рукописи



Воронина Людмила Николаевна

МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ  
ТРАНЗИСТОРНЫХ ИНВЕРТОРОВ

Специальность 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва–2014

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) на кафедре «Микроэлектронные электросистемы»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Шевцов Даниил Андреевич

Официальные оппоненты: Лукин Анатолий Владимирович, доктор технических наук, профессор, академик АЭН РФ, генеральный директор ЗАО «ММП-Ирбис»,

Коняхин Сергей Федорович, кандидат технических наук, главный конструктор ОАО «Аэроэлектромаш» по направлению «Преобразовательная техника»

Ведущая организация: ОАО «Авиационное оборудование»

Защита состоится «25» декабря 2014 г. в 14.00 на заседании диссертационного совета Д212.125.07 при Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, г.Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское ш., д. 4, Ученый совет МАИ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Автореферат разослан «    »                      2014 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.125.07  
к.т.н.



Степанов В.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Транзисторные инверторы представляют собой отдельный класс источников вторичного электропитания и предназначены для преобразования постоянного напряжения (тока) первичного источника в переменное напряжения (ток) для питания соответствующих потребителей. Инверторы могут быть как самостоятельными устройствами, так и составной частью других устройств: источников бесперебойного питания, преобразователей частоты, регуляторов синхронных и асинхронных двигателей. На сегодняшний день для мощностей до 10 кВА используются транзисторные инверторы с силовыми ключами на основе МДП- или IGB-транзисторов. На современном этапе инверторы применяются как на борту летательных аппаратов, так и в наземных авиационных комплексах.

На борту летательных аппаратов транзисторные инверторы используются для питания таких потребителей, как радиолокационное оборудование, пилотажно-навигационные комплексы, оборудование радиосвязи, устройства систем автоматического управления и т. д. (рис. 1).

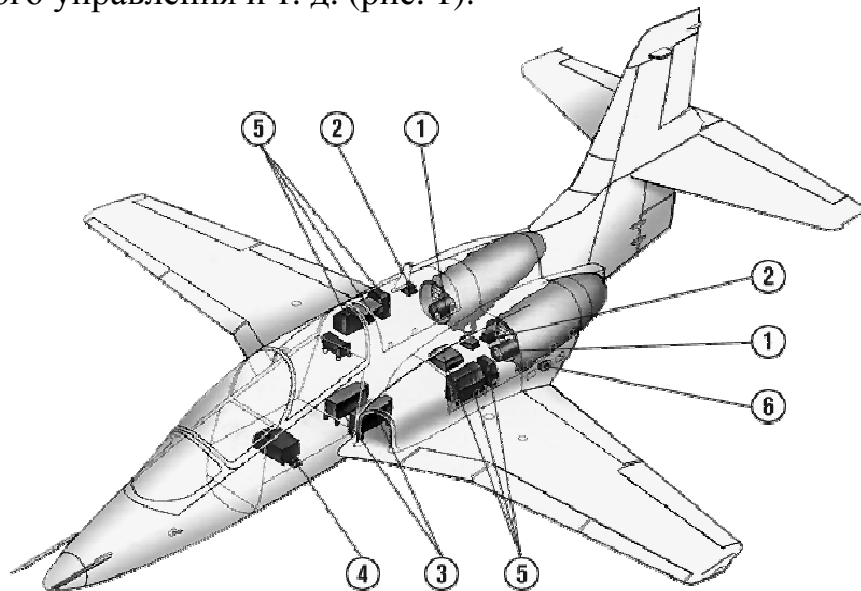


Рис. 1. Система электроснабжения самолета МиГ-АТ  
(1—стартер-генератор, 2—блок регулирования и защиты, 3—статический преобразователь, 4—аккумуляторная батарея, 5—распределительные устройства постоянного и переменного тока, 6— панель аэродромного питания)

В наземных авиационных комплексах инверторы используются для питания аэродромного оборудования, в качестве составной части систем электропитания комплексов обслуживания мобильных объектов и беспилотных летательных аппаратов в полевых условиях, а также передвижных и стационарных пусковых платформ и т. п.

Постоянно возрастающие требования к качеству электроэнергии переменного тока на фоне постоянно увеличивающегося количества потребителей переменного тока вызывают необходимость повышения мощности и надежности инверторов. Повышение мощности может быть выполнено либо разработкой устройств на базе более мощных электронных компонентов, либо так называемым модульным способом. В последнем случае наращивание мощности происходит за счет параллельного включения одинаковых модулей инверторов, когда они работают на общую нагрузку (рис. 2).

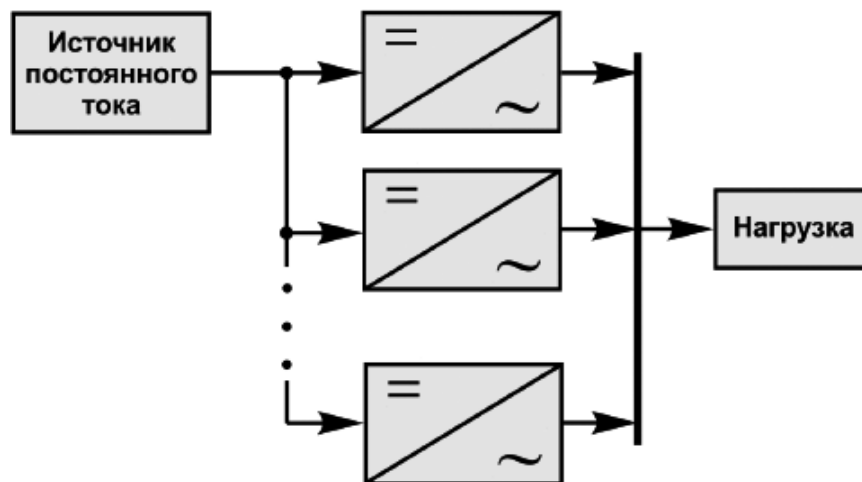


Рис. 2. Параллельное соединение инверторов

Такой способ обладает рядом преимуществ по сравнению с одномодульной системой электропитания.

Для обеспечения электроснабжения критических нагрузок возможно использование одномодульных источников переменного тока. Однако при возникновении аварийной ситуации на борту летательного аппарата или проведении профилактических, регламентных и других видов работ в наземных усло-

виях источник необходимо отключать. При этом нагрузка на какое-то время обесточивается, что неприемлемо для определенных типов нагрузок.

Модульный способ позволяет создать некоторую избыточность системы по мощности за счет резервирования при использовании дополнительных преобразователей. В случае выхода из строя или принудительного отключения одного из модулей, происходит подключение резервного модуля, что не приводит к временному перерыву питания нагрузки.

Кроме того, многие производители, выпускающие инверторы, стремятся разработать одиночный преобразователь средней мощности и выпускать его в больших количествах. Но потребность в преобразователях большой мощности постоянно растет. При этом производители стремятся уменьшить расходы на новые разработки и, по возможности, уменьшить себестоимость уже выпускаемых устройств. Поэтому с экономической точки зрения им выгоден способ параллельного соединения инверторов средней мощности, так как он позволяет минимизировать время и производственные затраты на создание новых преобразователей.

Таким образом к преимуществам многомодульной конструкции источников вторичного электропитания можно отнести:

- возможность наращивания выходной мощности при увеличении нагрузки без затрат на новые разработки;
- возможность простого резервирования дополнительных модулей, поскольку при подключении резервного модуля параметры выходного напряжения системы не изменяются;
- возможность создания определенной избыточности системы по мощности, используя дополнительные преобразователи, как резервные;
- возможность замены неисправных модулей без отключения системы, что позволяет минимизировать время обслуживания при ремонте, простоту технического обслуживания и профилактики, максимальную эксплуатационную эффективность.

Анализ литературы показал, что основная проблема, возникающая при организации параллельной работы инверторов, заключается в неравномерном распределении токов между ними. Это может быть вызвано разбросом внутренних параметров инверторов. Так при параллельном включении инверторов разброс внутренних параметров всего в 1% может вызвать неравномерность токов на выходе инверторов до 100%. Несинхронность выходных частот инверторов приводит к «биениям» выходного напряжения параллельно работающих модулей. На данный момент в литературе уже имеются технические решения, но сравнительный анализ показал, что они обладают рядом недостатков и не могут быть использованы в крупносерийном производстве устройств повышенной надежности для бортовых сетей летательных аппаратов.

По причинам защиты интеллектуальной собственности производители не публикуют в открытой печати структурные и схемотехнические решения по обеспечению параллельной работы инверторов.

Таким образом задача определения функциональных блоков и выявление параметров, неблагоприятно влияющих на возможность параллельного включения модулей инверторов, а также поиск функциональных и схемотехнических решений, позволяющих создавать инверторы, способные при параллельном включении обеспечить равномерное токораспределение между модулями и отсутствие «биений» выходного напряжения, является актуальной задачей.

**Цели и задачи работы.** Целью работы является исследование и разработка эффективных методов обеспечения равномерного распределения токов при параллельной работе однофазных и трехфазных транзисторных инверторов с различными способами управления (таких как ШИМ-регулированием по напряжению и с релейным регулированием по току), а также методов обеспечения безопасной работы многомодульных инверторов в аварийных и переходных режимах.

Для достижения указанной цели в работе решаются следующие задачи:

– анализ известных методов обеспечения параллельной работы инверторов с целью выявления их достоинств и недостатков;

– анализ работы функциональных узлов для определения их влияния на неравномерность токораспределения между параллельно работающими инверторами;

– анализ способов обеспечения равномерного токораспределения между параллельно работающими инверторами;

– разработка компьютерных моделей однофазных и трехфазных инверторов с управлением как по току так и по напряжению;

– разработка структурных, функциональных и схемотехнических решений для синхронизации выходных напряжений однофазных и трехфазных инверторов по амплитуде, частоте и фазе в многомодульных инверторах с управлением по напряжению и с управлением по току.

**Научная новизна** заключается в следующем:

– предложен метод введения компенсирующих связей, устраняющих разброс по амплитуде, частоте и фазе, обеспечивающий синхронизацию выходных напряжений параллельно работающих инверторов и исключаящий задачу синхронизации задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе. Предложенные связи позволяют объединять задающие генераторы и устройства управления в единый блок, позволяющий модулям работать как единое устройство;

– показана работоспособность предложенного метода для задающих генераторов различных типов (задающие генераторы на основе мультивибратора, задающие генераторы на основе полосовых фильтров, а также для задающих генераторов трехфазных инверторов с фазовращателями);

– выявлено необходимое число компенсирующих связей, устраняющих разброс по амплитуде, частоте и фазе, между задающими генераторами параллельно включенных инверторов для обеспечения работоспособности инверторов как с управлением по напряжению, так и с управлением по току;

– показано, что на несинхронность выходных напряжений параллельно работающих инверторов помимо параметров задающих генераторов влияют также параметры устройств управления.

– выявлено, необходимое число дополнительных компенсирующих связей, устраняющих разброс по амплитуде, частоте и фазе, между управляющими устройствами инверторов;

– выявлено, что для исключения взаимного влияния связей как между задающими генераторами, так и между управляющими устройствами инверторов необходимо вводить буферные каскады. Предложены структурные и схемотехнические решения данных каскадов;

– подтверждена работоспособность способа введения дополнительных связей между задающими генераторами и устройствами управления для однофазных и трехфазных инверторов как с управлением по напряжению, так и с управлением по току в номинальном, переходном и аварийном режимах.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

– предложена классификация известных методов синхронизации задающих генераторов и выявлены их достоинства и недостатки;

– разработаны компьютерные модели однофазных и трехфазных инверторов с управлением как по напряжению, так и по току, позволяющие исследовать процессы в параллельно работающих инверторах;

– предложена реализация метода, обеспечивающего синхронизацию выходных напряжений параллельно работающих инверторов и исключаящего задачу синхронизации задающих генераторов на основе мультивибратора и задающих генераторов на основе полосовых фильтров;

– предложена реализация метода введения дополнительных связей между управляющими устройствами инверторов, обеспечивающего более равномерное токораспределение в номинальном, аварийном и переходном режимах;

– предложены структурные и схемотехнические решения буферных каскадов.

**Методология и методы исследования.** При решении поставленных задач в диссертационной работе использованы методы теории электрических цепей, теории автоматического управления, а также методы дифференциального



и интегрального исчисления и концепция многоканального преобразования энергетического потока.

Исследование рабочих процессов в параллельно работающих инверторах проводилось с помощью имитационного компьютерного моделирования (ИКМ). Такой способ проверки работоспособности схемы позволяет сократить время и расходы на создание макетного образца.

**Положения, выносимые на защиту:**

– классификация известных методов синхронизации задающих генераторов и анализ выявленных недостатков;

– метод, устраняющий разброс выходных напряжений инверторов по амплитуде, частоте и фазе и исключаящий задачу синхронизации задающих генераторов на основе мультивибратора для однофазных и трехфазных инверторов;

– метод, устраняющий разброс выходных напряжений инверторов по амплитуде, частоте и фазе и исключаящий задачу синхронизации задающих генераторов на основе полосовых фильтров для однофазных и трехфазных инверторов;

– метод введения дополнительных связей между управляющими устройствами однофазных и трехфазных инверторов с управлением по напряжению для обеспечения более равномерного токораспределения в номинальном, аварийном и переходном режимах;

– метод введения дополнительных связей между управляющими устройствами однофазных и трехфазных инверторов с управлением по току для обеспечения равномерного токораспределения в номинальном, аварийном и переходном режимах.

**Степень достоверности результатов** определяется корректным использованием положений теории электрических цепей, теории автоматического управления и концепции многоканального преобразования энергетического потока; применяемым математическим и имитационным аппаратом, подтверждающим основные теоретические положения работы; сопоставлением проведенных исследований с опубликованными материалами других авторов.

**Личный вклад автора** состоит в следующем:

- предложен способ введения компенсирующих связей, устраняющих разброс выходных напряжений задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе;
- предложен способ введения компенсирующих связей, устраняющих разброс выходных напряжений инверторов по амплитуде, частоте и фазе, при разбросе параметров датчиков выходного напряжения инверторов;
- предложен способ уменьшения постоянной составляющей выходного напряжения инвертора;
- разработаны компьютерные модели в программе PSpice, позволяющие анализировать и исследовать электромагнитные процессы в однофазных и трехфазных инверторах как с управлением по напряжению, так и с управлением по току;
- с помощью компьютерного моделирования доказано, что предложенный способ введения компенсирующих связей эффективен в номинальном, аварийном и переходном режимах.

### **Реализация результатов работы**

Результаты диссертационной работы были использованы в госбюджетной НИР кафедры (№ темы 341650-03060, 2012 г.), а также в учебном процессе на кафедре 306 «Микроэлектронные электросистемы» Московского авиационного института (национального исследовательского университета).

**Апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

- 10-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика-2011» (г. Москва, 2011г.);
- Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2012» (г. Москва, 2012г.);
- 47-х научных чтениях памяти К.Э.Циолковского (г.Калуга, 2012г.);
- 11-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика-2012» (г. Москва, 2012г.);

– Московской молодежной научно-практической конференции «Инновации в авиации и космонавтике-2013» (г. Москва, 2013г.).

**Публикации.** По теме диссертационной работы опубликовано 11 научных работ, из них 4 работы – в изданиях, рекомендованных ВАК. Получено 2 патента РФ на полезную модель.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 149 страницах текста, содержит 174 рисунка.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, а также сформулированы ее цели и задачи. Определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, приведены сведения об апробации, публикациях и структуре диссертационной работы.

**В первой главе** проведен анализ существующих структур, применяемых для обеспечения параллельной работы инверторов и определены для исследования структуры с управлением по напряжению и ШИМ-регулированием (рис. 3), а также с управлением по току и релейным регулированием (рис. 4).

На основе проведенного анализа разработаны компьютерные модели инверторов с управлением как по напряжению, так и по току, позволяющие исследовать процессы в параллельно работающих инверторах с идеализированными ЗГ с изменяемыми амплитудой, частотой и фазой.

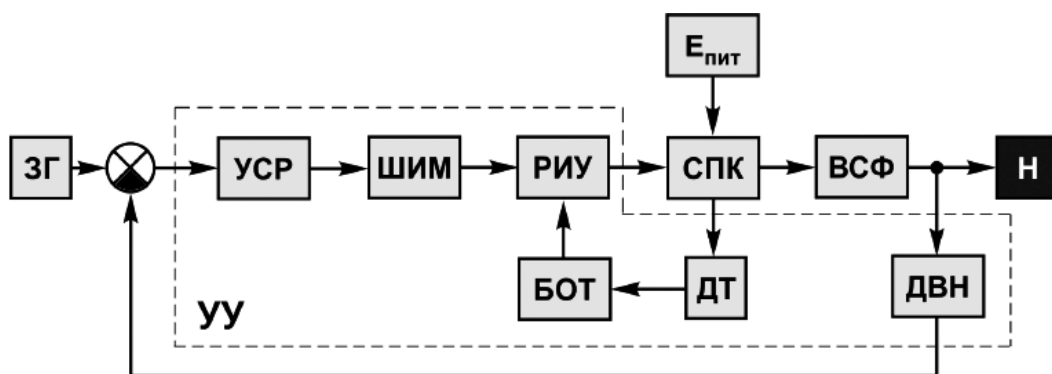


Рис. 3. Структурная схема однофазного инвертора с управлением по напряжению и ШИМ-регулированием

(ЗГ– задающий генератор, УУ– устройство управления, УСР– усилитель сигнала рассогласования, ШИМ– широтно-импульсный модулятор, РИУ– регулятор импульсов управления, ДТ– датчик тока, БОТ– блок ограничения тока, ДВН– датчик выходного напряжения, СПК– силовой пролупроводниковый каскад, ВСФ– выходной силовой фильтр, Епит.– источник питания, Н– нагрузка)

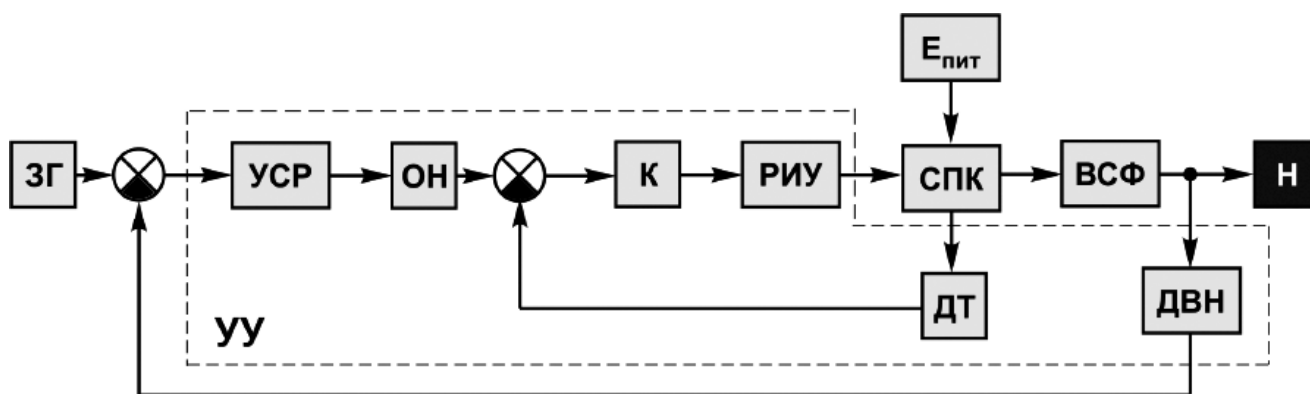


Рис. 4. Структурная схема однофазного инвертора с управлением по току и релейным регулированием

(ЗГ– задающий генератор, УУ– устройство управления, УСР– усилитель сигнала рассогласования, ОН– источник опорного напряжения, К – компаратор, РИУ– регулятор импульсов управления, ДТ– датчик тока, ДВН– датчик выходного напряжения, СПК– силовой пролупроводниковый каскад, ВСФ– выходной силовой фильтр, Епит.– источник питания, Н– нагрузка)

Показано, что основная проблема, возникающая при параллельной работе преобразователей, заключается в неравномерном распределении выходных токов параллельно работающим инверторам, которое вызвано технологическим разбросом параметров функциональных блоков инверторов и отсутствием синхронизации задающих генераторов, определяющих частоту работы включаемых параллельно устройств.

Показано, что синхронизация задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе позволяет существенно снизить неравномерность распределения выход-

ных токов параллельно работающих инверторов. Проведен анализ влияния разброса параметров задающих генераторов на равномерность распределения выходных токов между параллельно работающими инверторами. На рис. 5 представлены зависимости разброса выходных токов инверторов с управлением по напряжению от разброса параметров задающих генераторов. Аналогичные зависимости получены и для инверторов с токовым управлением.

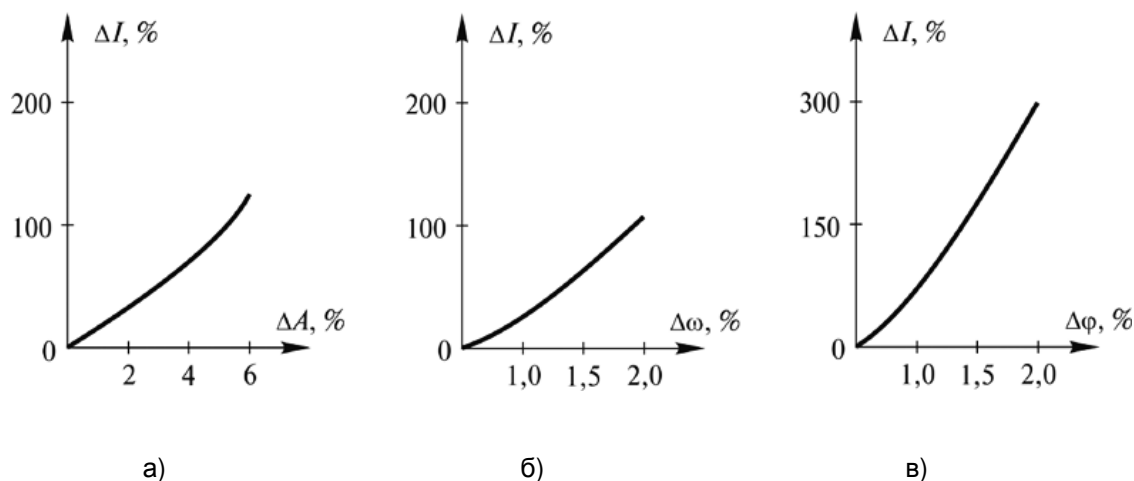


Рис. 5. Влияние разброса параметров задающих генераторов на неравномерность распределения токов параллельно работающих инверторов с управлением по напряжению:

- а) влияние разброса амплитуды задающих генераторов, разброс частоты и фазы отсутствует
- б) влияние разброса частоты задающих генераторов, разброс амплитуды и фазы отсутствует
- в) влияние разброса фазы задающих генераторов, разброс амплитуды и частоты отсутствует

Проведен сравнительный анализ существующих методов синхронизации задающих генераторов: прямой импульсной синхронизации и метода фазовой автоподстройки частоты. Использование этих методов при параллельной работе инверторов не полностью устраняет несимметричность выходных токов преобразователей. К тому же эти методы недостаточно надежны из-за общего недостатка – использования принципа «ведущий-ведомый». Этот принцип заключается в том, что ведущий генератор, имеющий заданную частоту, определяет работу ведомых задающих генераторов. В такой системе отсутствует тождественность модулей. Если ведущий генератор выходит из строя, то вся система становится не работоспособной. На основании чего сделан вывод о необходимости разработки нового более эффективного метода синхронизации выходных напряжений инверторов.

**Во второй главе** предложен метод, позволяющий компенсировать разброс выходных напряжений задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе, исключив задачу их синхронизации. Метод состоит во введении компенсирующих связей, которые обеспечивают работу задающих генераторов модулей, включенных параллельно с общей (эквивалентной) амплитудой, частотой и фазой. Показано, что эквивалентная частота  $f_{\text{ЭКВ}}$  после введения связей практически не отличается от основной частоты  $f_{\text{ГПН1}}$  до введения связей и зависит только от технологического разброса параметров  $\Delta R$  и  $\Delta C$  время-задающих цепей, который можно свести к незначительной величине:

$$f_{\text{ЭКВ}} = f_{\text{ГПН1}} \frac{1 + \frac{\Delta R}{2R_2}}{\left(1 + \frac{\Delta R}{R_2}\right) \left(1 + \frac{\Delta C}{2C_1}\right)},$$

где:  $R_2$  – сопротивление резистора времязадающей цепочки;  $C_1$  – емкость конденсатора времязадающей цепочки.

Рассмотрены различные виды задающих генераторов. На рис. 6. показан принцип введения компенсирующих связей, устраняющих разброс по амплитуде, частоте и фазе, для задающего генератора на основе мультивибратора.

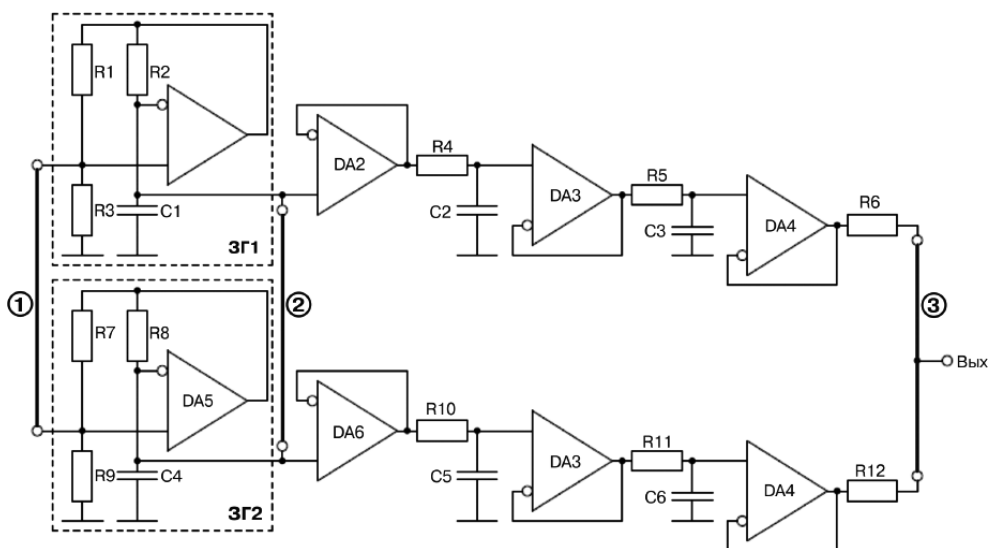


Рис. 6. Принцип введения компенсирующих связей для задающего генератора на основе мультивибратора  
(1 – компенсирующая связь по фазе; 2 – компенсирующая связь по частоте; 3 – компенсирующая связь по амплитуде)

Показано, что для однофазных инверторов с задающими генераторами на основе мультивибратора и генераторов с различными полосовыми фильтрами при параллельной работе однофазных инверторов необходимо введение трех компенсирующих связей.

Проведен анализ результатов моделирования, который показал, что прямые связи по амплитуде нарушают работу генераторов и предложено вводить связи через буферные каскады для устранения взаимного влияния.

Таким образом, метод применим к следующим видам задающих генераторов:

- на основе мультивибратора (с фильтром низких частот);
- на основе полосового фильтра;

**В третьей главе** рассмотрено применение метода введения компенсирующих связей, устраняющих разброс по амплитуде, частоте и фазе, для обеспечения параллельной работы однофазных инверторов с управлением по напряжению и ШИМ-регулированием (рис.7).

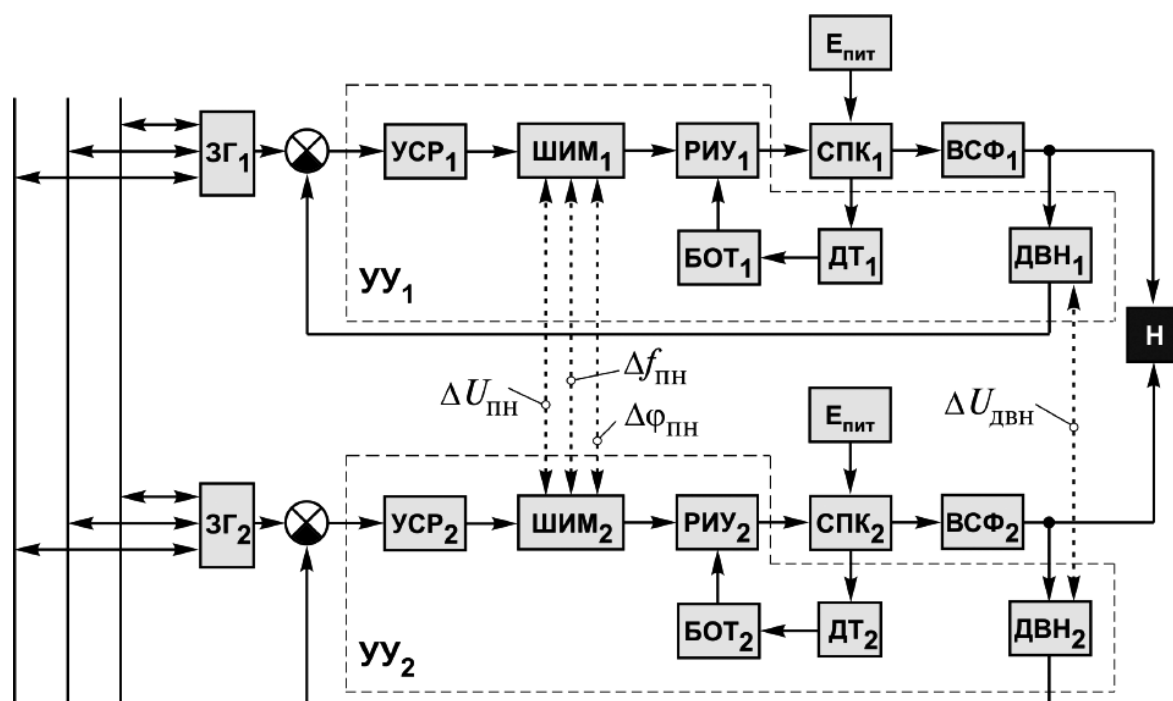


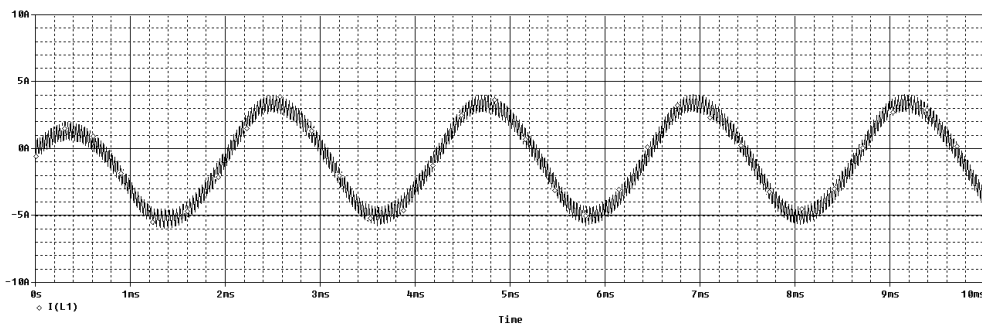
Рис. 7. Структурная схема параллельно включенных инверторов с управлением по напряжению с компенсирующими связями между задающими генераторами.

Разработана модель параллельно включенных инверторов, учитывающая схемотехническое решение задающих генераторов.

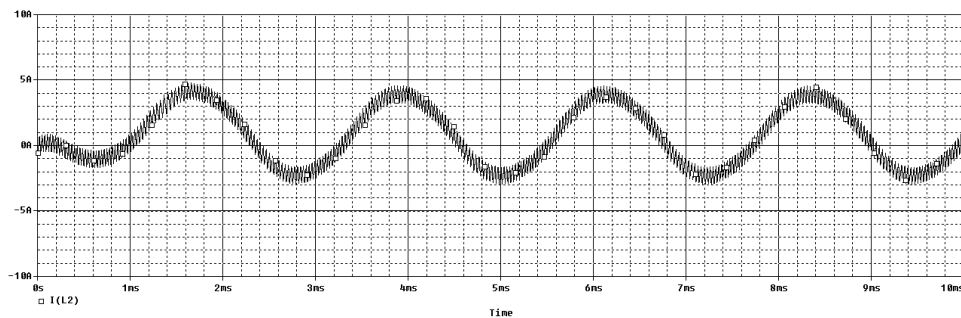
Показано, что формирование эквивалентной времязадающей цепи задающих генераторов недостаточно для обеспечения равномерного токораспределения.

Выявлено, что на неравномерность распределения выходных токов инверторов влияет и технологический разброс параметров устройства управления (рис.7).

Рис.8 показывает, что этот разброс параметров приводит к неравномерности токов инверторов



а)



б)

Рис.8. Выходные токи инверторов с управлением по напряжению при разбросе параметров датчиков выходного напряжения  
а) ток I1 первого инвертора  
б) ток I2 второго инвертора

Показано, что введение дополнительных связей позволяет устранить разброс выходных токов параллельно включенных инверторов.



Выявлено, что необходимо вводить четыре дополнительные связи, компенсирующие разброс параметров датчиков выходного напряжения инверторов, а также разброс амплитуды, частоты и фазы ШИМ (рис.9).

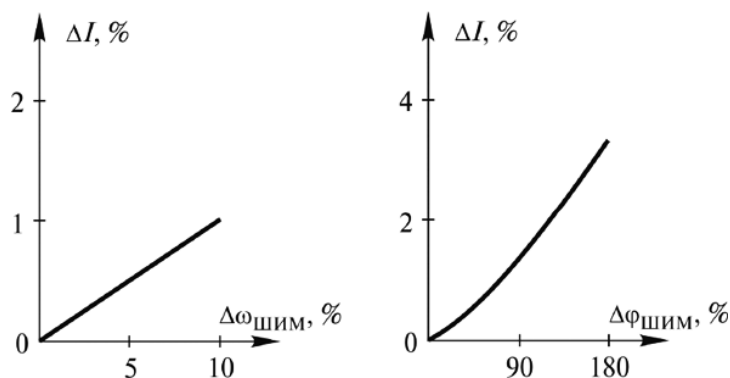


Рис. 9. Зависимость разброса выходных токов инверторов с управлением по напряжению от разброса параметров ШИМ по частоте и фазе  
 а) влияние разброса частоты ШИМ на разброс выходных токов, разброс фаз отсутствует.  
 б) влияние разброса фазы ШИМ на разброс выходных токов, разброс частот отсутствует.

На основании компьютерного моделирования доказано, что предложенный метод эффективен как в номинальном, так в аварийном и переходном режимах. Разность выходных токов инверторов практически отсутствует.

**В четвертой главе** исследован метод введения компенсирующих связей применительно к однофазным инверторам с управлением по току и релейным регулированием (рис.10).

Разработана модель параллельно работающих инверторов с компенсирующими связями между задающими генераторами.

Показано, что технологический разброс параметров устройств управления (рис.10) вызывает разбаланс выходных токов инверторов (рис. 11–12).

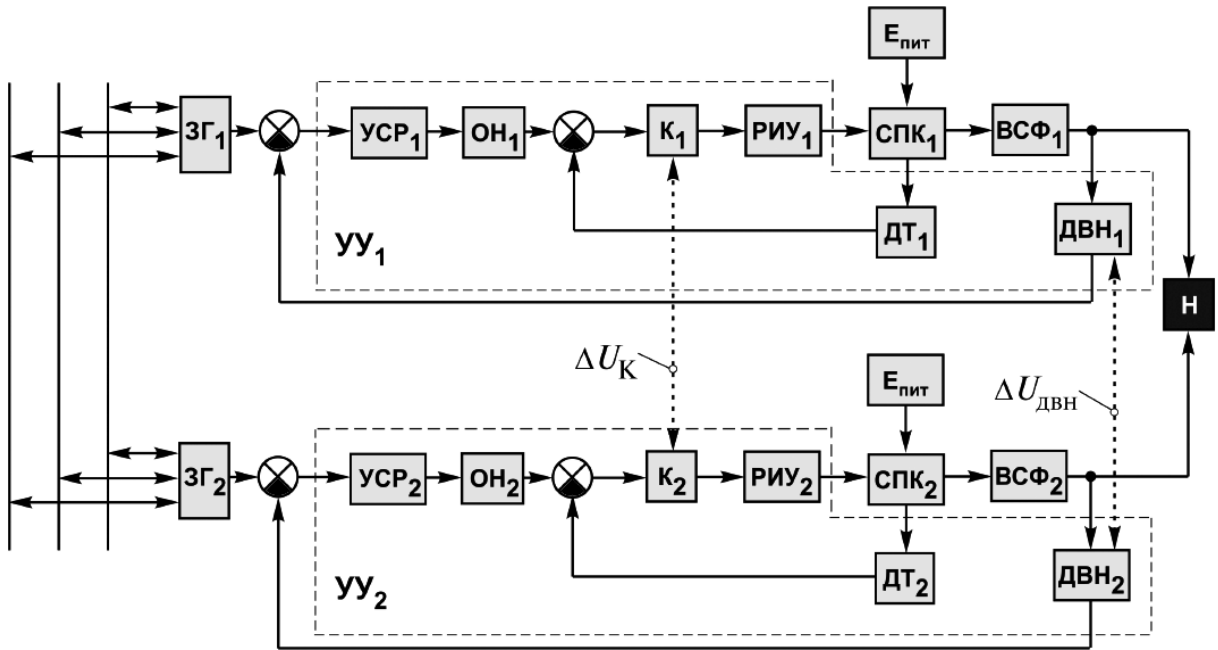


Рис.10. Структурная схема параллельно включенных инверторов с управлением по току с компенсирующими связями между задающими генераторами.

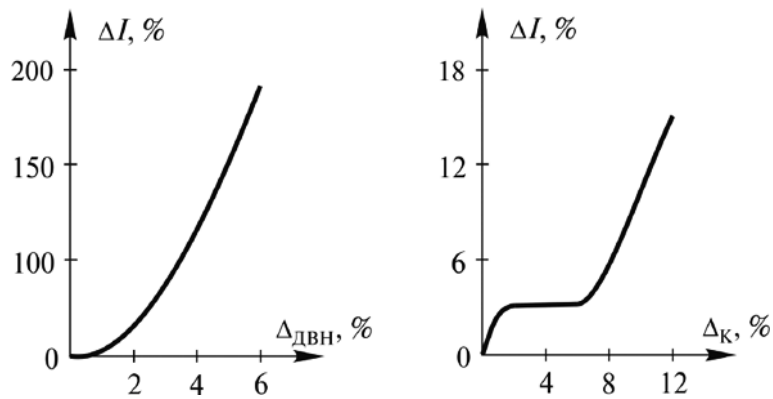


Рис.11. Зависимость разбросов выходных токов от разброса параметров устройств управления

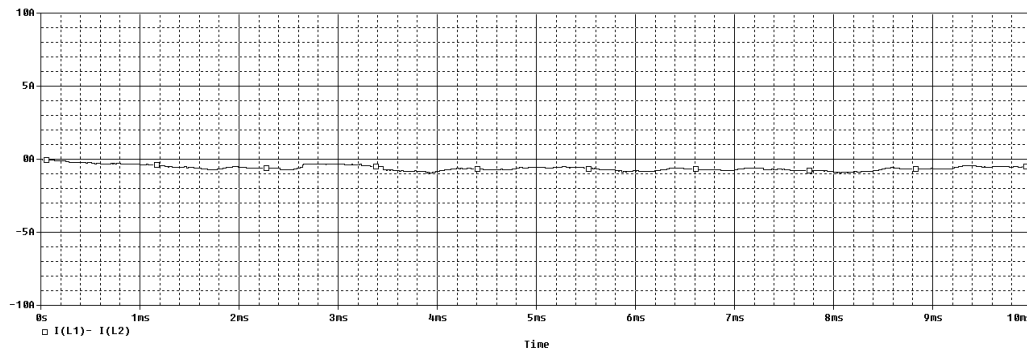


Рис.12. Разность выходных токов инверторов при разбросе параметров компараторов (разброс токов составляет 20%)

Установлена необходимость введения двух дополнительных связей в устройствах управления, компенсирующих разброс параметров датчиков выходного напряжения и компараторов инверторов.

Исследования показали, что предложенный метод эффективен как в номинальном, так в аварийном и переходном режимах работы инвертора. Разброс токов при этом практически отсутствует.

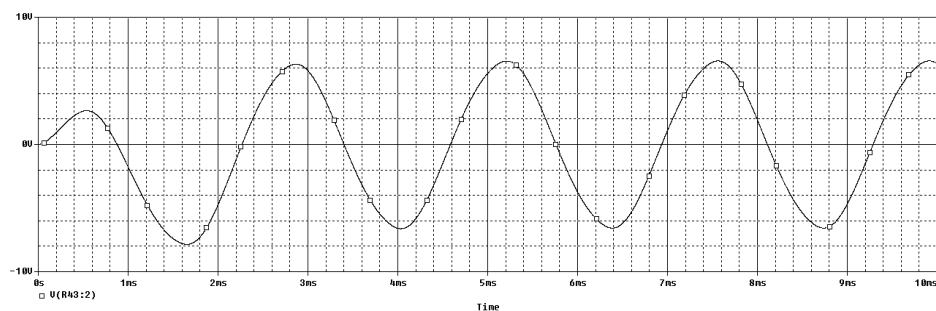
Эффективность предложенного метода подтверждена компьютерным моделированием.

**В пятой главе** исследован метод обеспечения параллельной работы трехфазных инверторов с управлением как по напряжению, так по току.

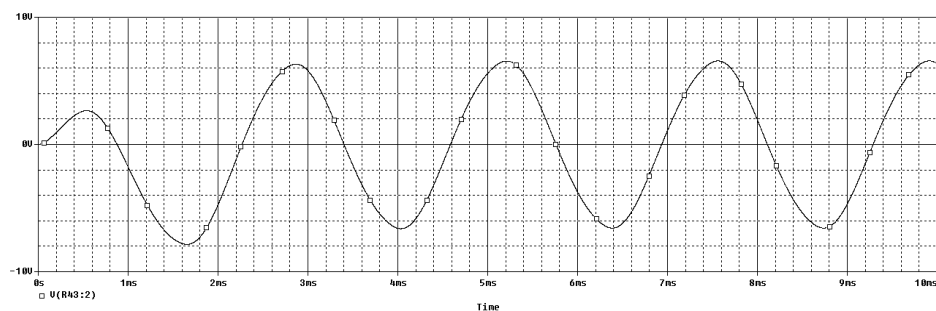
Выявлено, что для задающих генераторов на основе мультивибратора трехфазных инверторов при обеспечении параллельной работы инверторов необходимо введение шести компенсирующих связей. Три из них обеспечивают работу задающих генераторов с эквивалентными частотой, фазой и амплитудой, а три – компенсацию разбросов параметров фазовращателей.

Установлено, что для задающего генератора на основе полосового фильтра трехфазных инверторов необходимы пять объединяющих связей. Особенность задающего генератора такой структуры состоит в том, что трехфазное синусоидальное напряжение на выходе генератора формируется без использования фильтра низких частот. Поэтому две связи обеспечивают работу задающего генератора с эквивалентными частотой и фазой, а три – компенсацию разбросов параметров фазовращателей.

На рис. 13 представлен результат введения связей между задающими генераторами трехфазных инверторов.



а)



б)

Рис.13. Выходные напряжения трехфазных генераторов после введения компенсирующих связей:  
 а) напряжение фазы A1 первого задающего генератора  
 б) напряжение фазы A2 второго задающего генератора

Из временных диаграмм видно, что разброс выходных напряжений фаз практически отсутствует.

Все перечисленные виды задающих генераторов применимы в трехфазных инверторах при введении в их структуру фазовращателей.

Разработана модель параллельной работы трехфазных инверторов.

Для обеспечения равномерного распределения токов в трехфазных инверторах использовались те же принципы, что и для однофазных.

Имитационное компьютерное моделирование подтвердило, что методы обеспечения равномерного токораспределения, применяемые для однофазных инверторов, эффективны и для трехфазных.

Показано, что эффективность предложенных методов сохраняется в следующих режимах:

- номинальный режим с симметричной нагрузкой;
- номинальный режим с несимметричной нагрузкой (рис. 14);

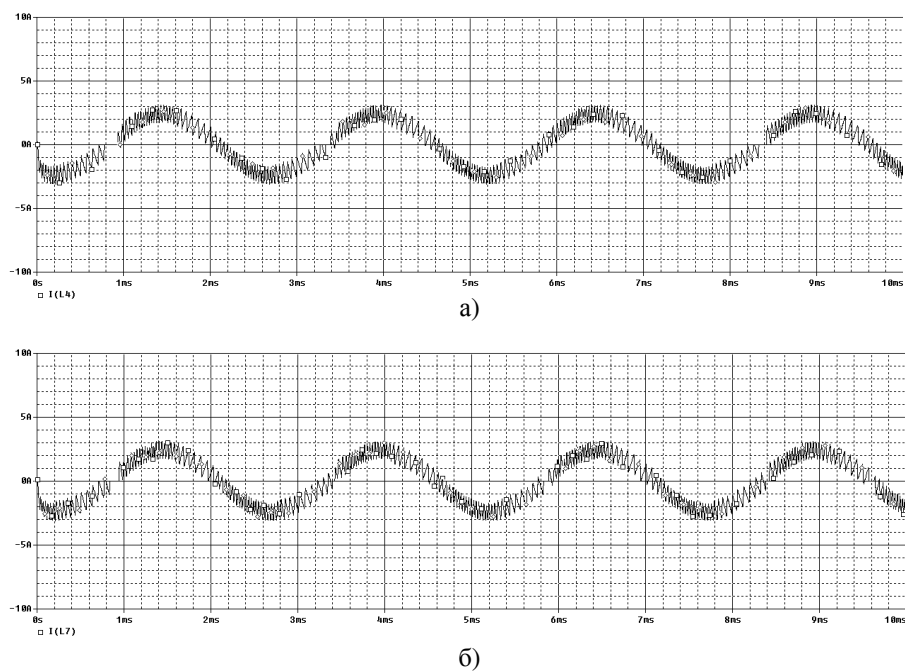


Рис.14. Выходные токи трехфазных инверторов после введения компенсирующих связей  
 а) ток фазы  $A1$  первого инвертора  
 б) ток фазы  $A2$  второго инвертора

Из представленных временных диаграмм, видно, что разность выходных токов инверторов не превышает 1%.

Также в работе рассмотрены переходный режим, режим короткое замыкание на землю и межфазное короткое замыкание (рис. 15).

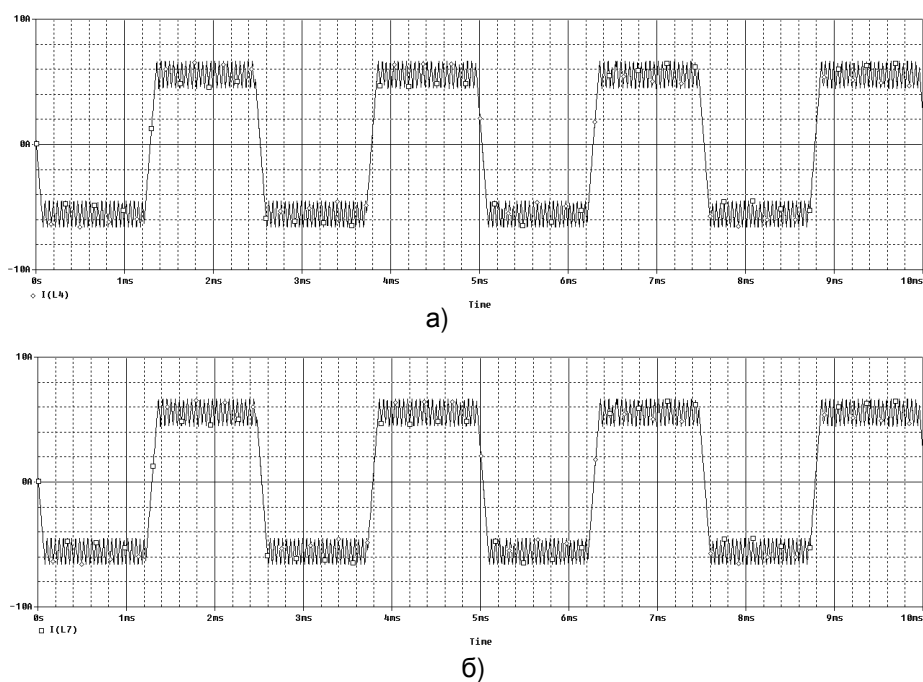


Рис.15. Выходные токи трехфазных инверторов после введения компенсирующих связей при межфазном коротком замыкании  
 а) ток фазы  $A1$  первого инвертора  
 б) ток фазы  $A2$  второго инвертора

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы получены следующие научные и практические результаты:

1. Проведен сравнительный анализ и дана классификация известных методов синхронизации задающих генераторов инверторов. Выявлены их достоинства и недостатки. Показано, что существующие методы нельзя считать надежными и подходящими для СЭС ЛА. Исходя из этого, сформулированы требования к новым методам обеспечения параллельной работы инверторов.

2. Разработан новый метод, позволяющий компенсировать разброс выходных напряжений задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе. Рассмотрены два вида генераторов: на основе мультивибратора и на основе полосового фильтра.

3. Разработаны структурные и схемотехнические решения объединения задающих генераторов инверторов в единый эквивалентный задающий генератор. Проведено компьютерное моделирование, подтверждающее эффективность предложенного метода.

4. Разработан метод равномерного токораспределения между параллельно работающими однофазными инверторами с управлением по напряжению и ШИМ-регулированием при наличии технологического разброса параметров. Разработаны структурные и схемотехнические решения по реализации предложенного метода.

5. Разработана компьютерная модель параллельно работающих инверторов с управлением по напряжению, позволяющая исследовать эффективность предложенного метода в номинальном, аварийном и переходном режимах.

6. Разработан метод равномерного токораспределения между параллельно работающими однофазными инверторами с управлением по току и релейным регулированием при наличии технологического разброса параметров. Разработаны структурные и схемотехнические решения такого метода

7. Разработана компьютерная модель параллельно соединенных инверторов с управлением по току и способы их реализации в номинальном, аварийном и переходном режимах.

8. Разработан метод обеспечения параллельной работы трехфазных инверторов с управлением по напряжению и с управлением по току.

9. Разработаны структурные и схемотехнические решения вышеуказанного метода. С помощью компьютерного моделирования проверена его эффективность в номинальном и аварийном режимах.

## СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ

### Статьи, опубликованные в периодических изданиях, рекомендованных

#### ВАК

1. Шевцов Д.А., Воронина Л.Н. Новый метод обеспечения параллельной работы инверторов // Вестник московского авиационного института 2012, т. 19, № 5, С. 114-130.
2. Шевцов Д.А., Воронина Л.Н. Сравнительный анализ известных методов обеспечения параллельной работы инверторов // Практическая силовая электроника. № 49, 2013 г. С. 52-55.
3. Воронина Л.Н. Анализ влияния разбросов параметров на режим работы многомодульных инверторов // Вестник московского авиационного института 2013, т. 20, № 3, С. 139-144.
4. Воронина Л.Н. Новый метод обеспечения параллельной работы задающих генераторов для транзисторных инверторов // Итоги диссертационных исследований. Том 3. – Материалы IV Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2012. – С. 34-45.

### Статьи, опубликованные в других изданиях:

5. Воронина Л.Н. Методы обеспечения параллельной работы задающих генераторов для транзисторных инверторов // 10-я международная

конференция «Авиация и космонавтика-2011». 8–10 ноября 2011 г. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2011. – С. 226-227.

6. Воронина Л.Н., Шевцов Д.А. Разработка методов обеспечения параллельной работы задающих генераторов для транзисторных инверторов // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике-2012». 17–20 апреля 2012 г. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – С. 60-61.

7. Шевцов Д.А., Воронина Л.Н. Анализ существующих методов обеспечения параллельной работы транзисторных инверторов // Идеи К.Э. Циолковского: прошлое, настоящее, будущее: материалы XLVII Научных чтений памяти К.Э. Циолковского – Калуга: Издательство «Эйдос». – С. 191-192.

8. Воронина Л.Н., Шевцов Д.А. Анализ влияния разбросов параметров на работу параллельно включенных инверторов и обеспечение равномерного токораспределения // 11-я международная конференция «Авиация и космонавтика-2012». 13–15 ноября 2012 г. Москва. Тезисы докладов. – СПб.: Мастерская печати, 2012. – С. 248-249.

9. Воронина Л.Н., Шевцов Д.А. Устранение постоянной составляющей выходного тока инвертора // Московская молодежная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике-2013». 16–18 апреля 2013 г. Москва. Сборник тезисов докладов. – М.: ООО «Принт-салон». – С. 216-217.

10. Патент на полезную модель № 128805 «Система синхронизации транзисторных инверторов» от 27.05.13 г., (Шевцов Д.А., Воронина Л.Н.).

11. Патент на полезную модель № 135205 «Инвертор с устройством для уменьшения постоянной составляющей выходного напряжения» от 27.11.13 г., (Шевцов Д.А., Воронина Л.Н.).