

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента  
на диссертацию  
на тему

**Коняхина Сергея Федоровича**  
**Ворониной Людмилы Николаевны**

### **«Методы обеспечения параллельного включения транзисторных инверторов»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

### **АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ**

Выбранная диссертантом тема безусловно является актуальной, поскольку решение задачи обеспечения равномерного токораспределения в параллельно работающих инверторах позволяет повысить мощность и надежность систем электроснабжения автономных, в том числе, бортовых электроэнергетических комплексов с одновременным снижением себестоимости и сокращением сроков разработки источников переменного тока. Повышение уровня электрификации бортовых систем самолета при все ужесточающихся требованиях к качеству электроэнергии переменного тока сопровождается не только повышением энергооборуженности борта, но и появлением новых единичных потребителей переменного тока большой мощности. Использование модульного принципа, когда одинаковые устройства, включенные параллельно, работают на общую нагрузку, позволяет повысить мощность и надежность инверторов. Одной из основных проблем, возникающих при организации параллельной работы инверторов, является неравномерное распределение токов между ними. При различных выходных частотах соединяемых в параллель инверторов возникают «биения» их выходного напряжения. Сегодня существует довольно много технических решений, направленных на обеспечение симметрирования работы модулей, но из-за ряда тех или иных недостатков они не могут использоваться при серийном производстве устройств повышенной надежности для бортовых систем электроснабжения. В связи с этим задача определения функциональных блоков и выявления параметров, неблагоприятно влияющих на параллельную

работу инверторов, а также поиск функциональных и схемотехнических решений для создания устройств, способных при параллельной работе обеспечивать равномерное токораспределение и отсутствие «биений» выходного напряжения является важной и актуальной задачей.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И НАУЧНАЯ НОВИЗНА**

Научная новизна полученных диссертантом результатов обусловлена следующими положениями:

1. Предложен метод введения компенсирующих связей, исключаящий задачу синхронизации задающих генераторов инверторов по амплитуде, частоте и фазе и обеспечивающий синхронизацию выходных напряжений параллельно работающих модулей.
2. Показана работоспособность предложенного метода для задающих генераторов на основе мультивибратора, на основе полосовых фильтров, а также для задающих генераторов с фазовращателями для трехфазных инверторов.
3. Выявлено необходимое число компенсирующих связей между задающими генераторами параллельно включенных инверторов, обеспечивающих работоспособность инверторов как с управлением по напряжению, так и с управлением по току.
4. Показано, что помимо параметров задающих генераторов на несинхронность выходных напряжений параллельно работающих инверторов влияют и параметры управляющих устройств.
5. Определено необходимое число компенсирующих связей, которые необходимо дополнительно вводить между управляющими устройствами преобразователей.
6. Выявлена необходимость введения буферных каскадов для исключения взаимного влияния цепей как между задающими генераторами, так и между устройствами управления инверторов.
7. Работоспособность способа введения компенсирующих связей подтверждена для однофазных и трехфазных инверторов как с управлением по на-

пряжению, так и с управлением по току в номинальном, аварийном и переходном режимах.

Основные результаты диссертации:

1. Предложена классификация известных методов синхронизации задающих генераторов, выявлены их достоинства и недостатки.
2. Предложена реализация метода, обеспечивающего синхронизацию выходных напряжений параллельно включенных инверторов и исключающего задачу синхронизации задающих генераторов различных типов.
3. Предложена реализация метода введения дополнительных связей между устройствами управления инверторов, обеспечивающего более равномерное распределение токов в номинальном, аварийном и переходном режимах работы.
4. Предложены структурные и схемотехнические решения буферных каскадов.

## **СТРУКТУРА И ОБЪЕМ ДИССЕРТАЦИИ**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 149 страницах, включающих 174 рисунка. Список литературы состоит из 106 наименований.

Во введении обоснована актуальность, цель, задачи работы. Описаны задачи и методы исследований; научная новизна и практическая ценность выводов и результатов. Также во введении содержится информация об апробации и реализации результатов.

В первой главе диссертационной работы проведен анализ существующих структур, применяемых для обеспечения параллельной работы инверторов. Для исследования определены структуры инверторов с управлением по напряжению, а также с управлением по току. Для исследования процессов в параллельно работающих преобразователях разработаны компьютерные модели инверторов обоих типов.

Показано, что основная проблема, возникающая при параллельной работе преобразователей, заключается в неравномерном распределении выходных токов параллельно работающих инверторов, которое вызвано технологическим разбросом параметров их функциональных блоков и отсутствием синхронизации задающих генераторов. Показано, что синхронизация задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе позволяет значительно снизить неравномерность распределения выходных токов. Проведен сравнительный анализ существующих методов синхронизации задающих генераторов и выявлены их недостатки.

Во второй главе предложен метод, позволяющий компенсировать разброс выходных напряжений задающих генераторов по амплитуде, частоте и фазе, исключив задачу их синхронизации. Метод заключается во введении компенсирующих связей, которые обеспечивают работу задающих генераторов параллельно включенных инверторов, с эквивалентной амплитудой, частотой и фазой. Рассмотрены задающие генераторы на основе мультивибратора и на основе полосового фильтра. Для однофазных инверторов с задающими генераторами обоих типов необходимо введение трех компенсирующих связей. Кроме того, анализ результатов моделирования показал, что связь по амплитуде необходимо вводить через буферные каскады для устранения взаимного влияния

В третьей главе рассмотрено применение метода введения компенсирующих связей для обеспечения параллельной работы однофазных инверторов с управлением по напряжению и ШИМ-регулированием. Разработана модель параллельно включенных инверторов, учитывающая схемотехническое решение задающих генераторов. Показано, что формирование эквивалентной времязадающей цепи задающих генераторов для обеспечения равномерного токораспределения недостаточно. Выявлено, что необходимо вводить четыре дополнительные связи, компенсирующие разброс параметров устройств управления, а именно: датчиков выходного напряжения и ШИМ-регулятора. Введенные связи устраняют разброс выходных токов параллельно включенных инверторов. Эффективность метода доказана как в номинальном, так и в аварийном и переходном режимах.

В четвертой главе описан метод введения компенсирующих связей для обеспечения параллельной работы однофазных инверторов с управлением по току и релейным регулированием. Разработана компьютерная модель параллельно включенных инверторов с компенсирующими связями между задающими генераторами. Показано, что технологический разброс параметров устройств управления вызывает разбаланс выходных токов. Выявлено, что необходимо вводить две дополнительные связи, компенсирующие разброс параметров датчиков выходного напряжения и компараторов инверторов. Введенные связи практически устраняют разброс выходных токов параллельно работающих инверторов и эффективны при номинальном, аварийном и переходном режимах.

В пятой главе исследован метод обеспечения параллельной работы трехфазных инверторов с управлением по напряжению и с управлением по току.

Установлено, что для задающих генераторов на основе мультивибратора для трехфазных 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.

Показано, что для задающего генератора на основе полосового фильтра для трехфазных инверторов необходимы пять объединяющих связей.

Разработана компьютерная модель параллельной работы трехфазных инверторов.

Эффективность предложенного метода сохраняется в следующих режимах:

- номинальный режим с симметричной нагрузкой;
- номинальный режим с несимметричной нагрузкой;
- переходный режим;
- фазные и межфазные короткие замыкания.

# ДОСТОВЕРНОСТЬ И АПРОБАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Использование автором положений и методов фундаментальных наук для разработки и обоснования методов обеспечения равномерного токораспределения между параллельно работающими инверторами, а также выбор программного обеспечения для создания имитационной модели транзисторного регулятора и реализации компьютерного эксперимента проведены корректно и позволяют сделать вывод о том, что положения, выносимые на защиту являются достоверными и обоснованными.

Результаты работы докладывались на 5 научных конференциях. Тезисы докладов опубликованы в соответствующих сборниках. Автором опубликовано 4 работы в журналах, рекомендованных ВАК РФ. В публикациях достаточно полно отражены основные выводы и полученные результаты.

## ЗАМЕЧАНИЯ

К недостаткам диссертационной работы можно отнести следующее:

1. Из множества дестабилизирующих факторов, влияющих на распределение токов через параллельно соединенные инверторы подробно исследован лишь один - неидентичность задающих генераторов инверторов.
2. В работе не указано на какое максимальное количество параллельно соединенных модулей инверторов могут быть распространены предложенные методы симметрирования.
3. Работоспособность схем подтверждена только компьютерным моделированием. Отсутствует проверка полученных результатов на натурном образце.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

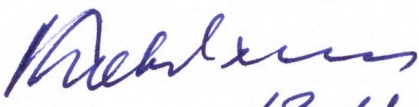
Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности.

Проводя оценку работы в целом, считаю, что диссертация «Методы обеспечения параллельного включения транзисторных инверторов» является законченной самостоятельной квалификационной работой и ее результаты представляют значительный научный и практический интерес. Работа несомненно вно-

сит вклад в развитие ряда отраслей знаний, связанных с построением источников электропитания и автономных систем электроснабжения переменного тока. Отмеченные замечания не уменьшают ее общую значимость и важность полученных результатов.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации. Работа удовлетворяет всем требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Воронина Людмила Николаевна, заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы».

Главный конструктор систем преобразования электроэнергии –  
заместитель Главного конструктора ОАО «Аэроэлектромаш»,  
кандидат технических наук

  
13.11.2014

Коняхин С.Ф.

Адрес: Москва, Большая Новодмитровская, 12

Тел.: 495-980-65-02

e-mail: flat84@mail.ru

Подпись руки Главного конструктора систем преобразования электроэнергии –  
заместителя Главного конструктора ОАО «Аэроэлектромаш» заверяю:

Помощник Генерального директора ОАО «Аэроэлектромаш»



Морозова С. А.