

1568956

На правах рукописи
УДК 629.7.064.5

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

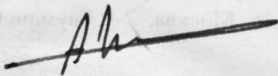
РАХХАЛЬ АХМАД

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ
АВИАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО
ТОКА ПОСТОЯННОЙ ЧАСТОТЫ ЛА НА БАЗЕ СТАТИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С АМПЛИТУДНО-ИМПУЛЬСНОЙ
МОДУЛЯЦИЕЙ**

Специальность 05.13.05 – Элементы и устройства вычислительной
техники и систем управления

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук



Москва – 2000

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана.

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Лакота Н. А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Лохин Валерий Михайлович (МИРЭА)

кандидат технических наук, старший

научный сотрудник Румянцев Михаил

Юрьевич (МЭИ)

Ведущее предприятие:

Защита диссертации состояла
на заседании диссертационного
государственного университета
Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться
Баумана. Ваш отзыв на автореферат
просим направлять по указанному
ул., д.5, ученый Совет МГТУ им.

1568956

Ученый секретарь
диссертационного совета

к. т. н., доцент

Мамон

Максимов А. И.

Актуальность темы. В настоящее время во многих авиационных системах генерирования для стабилизации частоты бортового переменного напряжения широко используют дифференциальные гидромеханические или турбомеханические привода постоянной скорости (ППС). Такие привода преобразовывают механическую энергию, отбираемую от редуктора авиационного двигателя, в механическую энергию вращения ротора магистрального генератора с постоянной частотой.

Однако из-за неудовлетворительного современному уровню быстродействия, высокой стоимости изготовления, установки и проведения регламентных работ, относительно низкой надежности, существующие ППС все в большей степени начинают не удовлетворять современным авиационным требованиям, что предопределяет поиск новых принципов построения систем генерирования переменного тока постоянной частоты.

В тоже время среди возможных авиационных систем генерирования переменного тока все более перспективными становятся так называемые системы «переменная скорость постоянная частота» (ПСПЧ). В таких системах, магистральный генератор непосредственно размещен на валу раздаточной коробки авиационного двигателя и соответственно имеет переменную угловую скорость вращения ротора. При этом постоянство частоты выходного напряжения ПСПЧ обеспечивается посредством преобразователя частоты, который установлен на выходе магистрального генератора.

Благодаря отсутствию привода постоянной частоты и высокой управляемости статического преобразователя рассматриваемые системы ПСПЧ потенциально способны значительно улучшить качество вырабатываемой электроэнергии, повысить быстродействие и точность согласования всех параметров напряжения при включении на параллельную работу и в конечном результате улучшить массогабаритные и энергетические показатели всего авиационного электрооборудования в целом. Помимо применения на летательных аппаратах, также считается перспективной областью использование ПСПЧ и в автономных ветроэнергетических и дизель-генераторных установках наземного назначения.

В связи с этим многие ведущие фирмы, например, General Electric (США), Синко Денки (Япония), Westinghouse и т.п., ведут интенсивные работы по созданию автономных систем генерирования типа «переменная скорость постоянная частота». Этой тематике посвящены научные труды таких видных ученых как Д.Э. Брускин, И.М. Синдеев, Ф.Ф. Галтеев, Ф.И. Ковалев, Г.С. Мыцык, О.И. Хасаев, В.С. Руденко, В.И. Сенько, Б.И. Фигаро, Ю.М. Быков, М. Rosswurm, Л. Джуджи, Б. Пелли, М. William, M. Nasser и др. В большинстве из них рассматриваются ПСПЧ без учета особенностей,

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1568956

Раххаль Ахмад Разработка и



присущих системам электроснабжения малых летательных аппаратах, имеющих общую мощность потребителей электрической энергии не более 15...25 кВА и кратность изменения угловой скорости ротора магистрального генератора не менее 1.5. Хотя данная область применения ПСПЧ с учетом современного уровня развития силовой полупроводниковой техники представляется наиболее перспективной с точки зрения быстрой и эффективной практической реализации. Поэтому анализ существующих и разработка перспективной системы генерирования переменного тока типа ПСПЧ для малых ЛА, тщательное исследование ее рабочих процессов и основных характеристик является актуальной технической задачей.

По существу выполненная научно-техническая работа способствует решению комплекса задач, связанных с созданием эффективной авиационной системы генерирования переменного тока постоянной частоты для малых летательных аппаратов.

Цель диссертационной работы - разработка и исследование перспективной авиационной системы генерирования переменного тока постоянной частоты на базе статического преобразователя с амплитудно-импульсной модуляцией и выработка рекомендаций к проектированию основных ее узлов и элементов.

Для достижения указанной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Анализ возможных вариантов построения, выбор и разработка структурной схемы перспективной авиационной системы генерирования переменного тока постоянной частоты для малых летательных аппаратов;
2. Анализ возможных вариантов построения, выбор и разработка силовой схемы статического трехфазного преобразователя перспективной системы генерирования ЛА;
3. Анализ рабочих процессов предложенной силовой схемы трехфазного преобразователя;
4. Определение основных расчетных выражений и характеристик предложенного статического преобразователя;
5. Проверка достоверности полученных расчетно-теоретических положений диссертационной работы посредством компьютерного моделирования;
6. Экспериментальная проверка достоверности полученных расчетно-теоретических положений диссертационной работы;
7. Выработка рекомендаций к проектированию предложенного трехфазного преобразователя с амплитудно-импульсной модуляцией для перспективных систем генерирования ЛА.

Методы исследования. При решении поставленных задач использованы: аналитические методы, принятые в электротехнике и общей теории электрических цепей, эмпирико-эвристические методы, методы гармонического анализа и компьютерное моделирование посредством использования пакета прикладных программ DesignLab - 8.0. Достоверность основных теоретических положений и результатов подтверждена посредством экспериментальных исследований на макетном образце силовой схемы статического преобразователя.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие новые результаты:

- предложен новый подход к проектированию статического преобразователя систем ПСПЧ, при котором требования к форме кривой выходного напряжения определяются из условия, что дополнительные потери основных потребителей электрической энергии от гармонических составляющих не будут превышать заданного уровня. При этом питание потребителей электрической энергии, критичных к качеству входного напряжения, осуществляется через дополнительные сглаживающие фильтры;
- определены основные выражения для проведения инженерных расчетов максимального, среднего и действующего значений токов и напряжений на нагрузке и в силовых элементах, амплитудных значений гармонических составляющих, коэффициентов искажения синусоидальности, формы и синусоидальности кривых фазного и линейного выходного напряжения статического преобразователя;
- установлены параметры силовой цепи разработанного статического преобразователя, при которых синтезируемое выходное напряжение имеет наименьший коэффициент искажения синусоидальности кривой;
- дана аналитическая и количественная оценка влияния параметров нагрузки на рабочие процессы в силовой схеме преобразователя.

Практическая ценность работы определяется тем, что

- разработана рациональная структурная схема ПСПЧ для малых ЛА, в которой генерирование электрической энергии осуществляется посредством магистрального генератора с возбуждением от постоянных магнитов, стабилизация постоянного напряжения промежуточного звена осуществляется посредством последовательно включенного дополнительного канала с понижающим конвертором, а формирование выходного трехфазного напряжения осуществляется посредством преобразователя с АИМ;

- разработана силовая схема статического преобразователя, в которой основная часть электрической энергии осуществляется с помощью классической трехфазной мостовой схемы, а требуемое качество выходного

переменного напряжения обеспечивается посредством малоомощной вспомогательной преобразовательной ячейки, содержащей минимальное количество ключевых полупроводниковых приборов;

- получены расчетные выражения и характеристики рассматриваемой системы ПСПЧ и статического преобразователя, на основе которых выработаны рекомендации по проектированию силовых элементов;

- выработан расчетный алгоритм эскизного проектирования разработанной силовой схемы трехфазного преобразователя;

- создан и исследован макетный образец силовой схемы статического преобразователя для перспективной системы генерирования.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и ее отдельные разделы докладывались и обсуждались на науч.-техн. конф. «Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве» (г. Москва, 1999 г.), на международной науч.-техн. конф. «РСИМ-99» и «РСИМ-2000» (г. Нюрнберг, Германия, 1999 г. и 2000 г.), науч.-техн. конф. «Электротехнические комплексы автономных объектов» (г. Москва, 1999 г.), на международном науч.-техн. семинаре «Силовая электроника» (г. Москва, 2000 г.). Диссертационная работа в полном объеме рассматривалась на кафедре «Специальная робототехника и механотроника» М7 Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана (2000 г.).

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах. Сданы в печать по материалам диссертации 2 работы.

Научные консультанты работы - к.т.н., доцент Вольский С.И. (Московский государственный авиационный институт) и к.т.н., доцент Шцепетьев В. В. (МГТУ им. Н. Э. Баумана).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа изложена на 185 страницах машинного текста, включая 108 рисунков, 16 таблиц на 62 страницах. Список литературы содержит 6 страниц машинописного текста и включает 74 наименований. Общий объем работы составляет 195 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена решаемая научно-техническая проблема, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи диссертации, показана научная новизна и практическая ценность результатов, дана информация по структуре, апробации, публикации и практическому использованию материалов диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены основные технические требования, предъявляемые к авиационным системам генерирования переменного тока. С учетом данных требований проведен анализ существующих и перспективных

систем генерирования переменного тока постоянной частоты применительно к малым ЛА, имеющих общую мощность потребителей не более 15 кВА и кратность изменения скорости вращения ротора магистрального генератора не менее 1.5. Посредством анализа установлено, что среди возможных авиационных систем генерирования наиболее перспективной является система «переменная скорость постоянная частота» (ПСПЧ) с промежуточным звеном постоянного тока, в которой магистральный генератор непосредственно размещен на валу раздаточной коробки авиационного двигателя, а постоянство частоты выходного напряжения ПСПЧ обеспечивается посредством трехфазного преобразователя. Такая система генерирования благодаря отсутствию прецизионных трущихся деталей имеет сравнительно высокую надежность, низкие эксплуатационные затраты и нетрудоемкие регламентные работы, а за счет практически безинерционности и высокой управляемости полупроводниковых приборов обладает неограниченными потенциальными возможностями повышения качества выходного напряжения.

В результате анализа выявлено, что суммарная мощность бортовых потребителей, наиболее критичных к форме кривой питающего напряжения, составляет не более 5-7 % от всей выходной мощности системы генерирования. В связи с этим предложен новый подход к проектированию трехфазного преобразователя, при котором за базу приняты такие требования к форме кривой выходного напряжения, при которых основные бортовые потребители электрической энергии имеют дополнительные потери от гармонических составляющих не больше заданного уровня. При этом необходимое качество питающего напряжения для остальных потребителей, имеющих сравнительно небольшую входную мощность, обеспечивается с помощью дополнительных входных фильтров.

В соответствии с предложенным подходом проектирования проведен сопоставительный анализ двух способов формирования выходного трехфазного напряжения посредством ШИМ преобразователя и АИМ преобразователя. Сравнение было проведено по количеству (S) и числу коммутаций (SV) применяемых силовых ключей, по величине напряжения, прикладываемого к ним, по сложности системы управления, по величине относительных динамических потерь и т. п. При этом за граничный критерий был принят относительный коэффициент нелинейных искажений, который определяется из следующего выражения:

$$K_g^* = \left(\sqrt{\sum_{m=2}^M U_m^2} \right) / (K_{\Sigma} \cdot U_1),$$

где m и M – текущий и максимальный номера учитываемых высших гармонических составляющих выходного напряжения;

U_1 и U_m – амплитудное значение первой и текущей m -ой гармонической составляющей выходного напряжения;

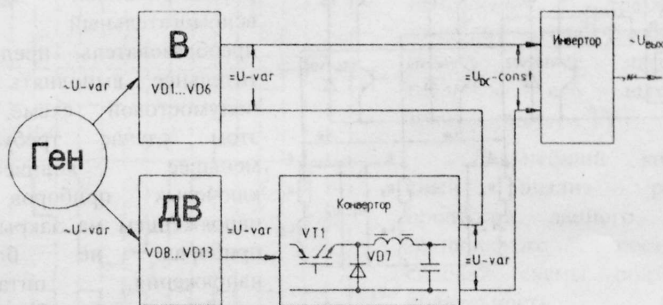
K_Σ – требуемый коэффициент искажения синусоидальности кривой выходного напряжения, при котором относительные дополнительные потери мощности от высших гармонических составляющих в потребителях третьей группы не превышают заданного значения.

В отличие от гостированного коэффициента K_g искажения синусоидальности кривой выходного напряжения (ГОСТ 23875-79), который отражает приближение формы кривой синтезируемого напряжения к синусоидальной форме, представленный коэффициент K_g^* при заданных параметрах потребителей качественно характеризует относительные дополнительные потери мощности ΔP , вызванные высшими гармоническими составляющими бортового напряжения.

В ходе анализа установлено, что K_g^* и соответственно дополнительные потери ΔP , в ШИМ преобразователе снижаются с увеличением числа импульсов, а в АИМ преобразователе – с повышением числа его уровней. При этом в отличие от K_g^* гостированный коэффициент K_g искажения синусоидальности кривой напряжения в ШИМ преобразователе практически мало меняется от повышения числа импульсов на полупериоде выходного напряжения. Это объясняется тем, что повышение числа импульсов на полупериоде в ШИМ преобразователе вызывает лишь смещение гармонических составляющих напряжения в более высокую полосу частот. В тоже время в АИМ преобразователе с повышением числа уровней выходного напряжения происходит общее подавление гармонических составляющих. В связи с этим коэффициент K_g снижается, а кривая выходного напряжения по гармоническому составу приближается к синусоидальной форме. По существу при выборе способа формирования переменного напряжения приходится выбирать между устройством с повышенным количеством S ключевых приборов (АИМ преобразователь) и устройством с повышенным числом коммутаций SV ключевых приборов (ШИМ преобразователь) и соответственно с повышенным уровнем динамических потерь. Причем из-за сравнительно высокой частоты бортового напряжения равной 400 Гц , роль динамических потерь в ШИМ преобразователе из-за требуемой высокой несущей частоты переключений ключевых приборов становится весьма значимой, что обуславливает соответственно сравнительно высокие динамические потери в ШИМ преобразователе. Поэтому при установленном качестве формы кривой выходного напряжения ($K_g^* < 1.1$) в перспективных системах ПСПЧ целесообразно использовать АИМ преобразователь.

Также проанализированы различные структурные схемы построения рассматриваемых ПСПЧ при использовании магистральных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов, которые по сравнению с существующими имеют повышенную надежность, низкую стоимость технического обслуживания и потенциально лучшие массогабаритные показатели. Ожидается, что такие генераторы будут иметь удельную массу $0.17...0.23 \text{ кг/кВА}$. Однако применение данного типа генератора требует решение задачи стабилизации напряжения промежуточного звена ПСПЧ. Посредством компьютерного моделирования выявлено, что решение поставленной задачи рационально осуществлять (рис. 1) с помощью дополнительного выпрямителя (ДВ) и понижающего конвертора, который последовательно включен с основным выпрямителем (В). В этом случае стабилизация промежуточного звена постоянного тока осуществляется с наименьшими потерями электрической мощности.

Рис. 1



Таким образом в первой главе определено, что на малых ЛА целесообразно применять систему ПСПЧ, в которой генерирование электрической энергии осуществляется посредством магистрального генератора с возбуждением от постоянных магнитов, стабилизация постоянного напряжения промежуточного звена осуществляется посредством дополнительного канала с понижающим конвертором, а формирование выходного трехфазного напряжения осуществляется посредством АИМ преобразователя.

Во второй главе проведен анализ принципов построения силовой схемы трехфазного преобразователя. В результате анализа выявлено, что наиболее эффективными преобразователями применительно к рассматриваемым системам ПСПЧ для малых ЛА являются составные трехфазные инверторы с вспомогательным трансформатором. В таких инверторах основная часть электрической энергии осуществляется с помощью классической трехфазной мостовой схемы, а требуемое качество

выходного переменного напряжения обеспечивается посредством маломощной вспомогательной преобразовательной ячейки, содержащей минимальное количество ключевых приборов. Такое построение силовой схемы позволяет при заданных исходных условиях и ограничениях достигнуть сравнительно высокого коэффициента полезного действия при сравнительно высоком качестве как фазного, так и линейного выходного напряжения и относительно не сложном построении системы управления.

Предложена новая силовая схема данного типа трехфазных преобразователей (рис. 2), которая содержит трехфазный мост на силовых транзисторах VT1...VT6 с обратными диодами VD1...VD6, стойку входных конденсаторов C1 и C2, три дополнительных ключа переменного тока (S1...S3) и вспомогательный преобразователь A1 с выходным трансформатором TV1.

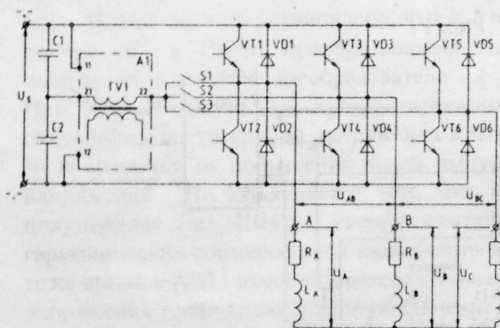


Рис. 2

Применительно к решению рассматриваемой задачи вспомогательный преобразователь предпочтительнее выполнять по полумостовой схеме. В этом случае требуется меньшее количество ключевых приборов с напряжением на закрытых приборах не более напряжения питания трехфазного преобразователя. При этом в качестве

конденсаторной стойки вспомогательного преобразователя рационально использовать входные конденсаторы C1 и C2.

По принципу действия предложенный инвертор работает следующим образом. Основное преобразование входного напряжения U_s осуществляют силовые транзисторы VT1...VT6. При этом качество выходного трехфазного напряжения до требуемого уровня доводится посредством вспомогательного преобразователя, выходное напряжение которого через дополнительные ключи переменного тока по заданному алгоритму подключается к той или другой фазе нагрузки. В результате на выходе преобразователя формируется девяти ступенчатое фазное напряжение, форма кривой которого близка к синусоидальной форме. Кривые выходных фазных напряжений u_A, u_B, u_C преобразователя и алгоритм проводящих состояний ключевых приборов приведены на рис. 3.

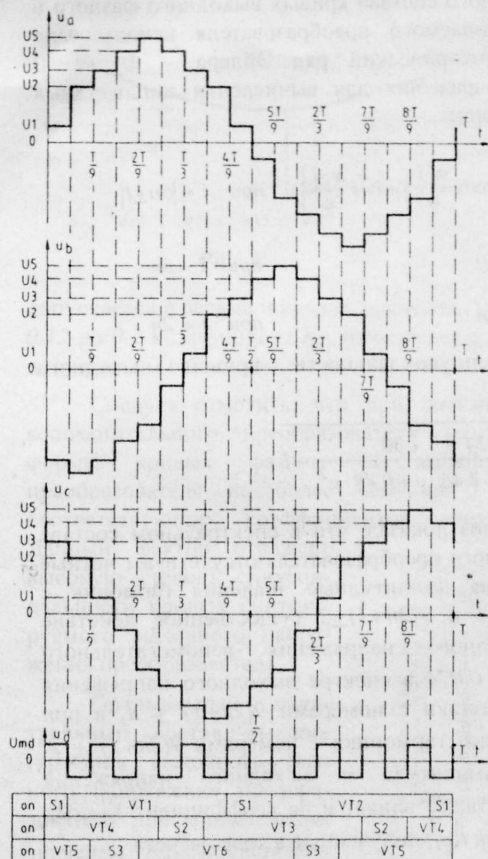


Рис. 3

Как видно из рис. 3 вспомогательный преобразователь А1 и дополнительные ключи S1...S3 проводят ток только при формировании первого самого низкого уровня выходного напряжения, что определяет сравнительно малые требования к ним по установочной мощности. При этом рабочая частота выходного напряжения вспомогательного преобразователя в девять раз превышает частоту выходного напряжения трехфазного преобразователя, что обуславливает малые массы и габариты его выходного трансформатора TV1.

Дальнейший комплексный анализ рабочих процессов данного схемотехнического построения силовой схемы подтвердил правильность выбора предложенного трехфазного инвертора применительно к рассматриваемой системе генерирования ПСПЧ для малых летательных аппаратов.

Третья глава посвящена исследованию рабочих процессов силовой схемы трехфазного преобразователя и выводу основных расчетных выражений. При исследовании рабочих процессов приняты допущения о мгновенной коммутации идеализированных полупроводниковых приборов и об отсутствии пульсации напряжения на входных конденсаторах. Указанные допущения позволили провести анализ рассматриваемого трехфазного преобразователя посредством простых идеализированных схем замещения, которые отражают электромагнитные процессы реального устройства в необходимой для практики мере.

При определении спектрального состава кривых выходного фазного и линейного напряжений рассматриваемого преобразователя использовано разложение функции в тригонометрический ряд Эйлера – Фурье. В результате найдены расчетные выражения для вычисления амплитудных значений гармонических составляющих:

$$U_{mi} = \begin{cases} \frac{2 \cdot U_s}{\pi \cdot i} \cdot \left[2v \cdot \left(1 - \cos \frac{\pi \cdot i}{9} \right) + \cos \frac{\pi \cdot i}{9} \right] & \text{при } i = |6n \pm 1| \\ 0 & \text{при } i = 3n \\ 0 & \text{при } i = 2n \end{cases}$$

и коэффициента искажения синусоидальности кривой выходного напряжения:

$$K_{gi} = \sqrt{\frac{24 \cdot v^2 + 30}{28.99 + 7.46 \cdot v + 0.48 \cdot v^2}} - 1.$$

В целом гармонический анализ показал, что в спектральном составе выходного напряжения предложенного преобразователя отсутствуют четные и кратные трем гармоники, а на амплитудные значения гармоник с порядковыми номерами $9(2n+1) \pm 4$ и $9(2n+1) \pm 2$ существенное действие оказывает амплитуда v выходного напряжения вспомогательного преобразователя. Причем при $v = 0.074$ в спектре выходного напряжения преобразователя отсутствуют гармоники с номерами $9(2n+1) \pm 4$, а при значении v равном 0.217 отсутствуют гармоники с номерами $9(2n+1) \pm 2$. Соответственно относительная амплитуда v выходного напряжения вспомогательного преобразователя также влияет и на коэффициент K_{gi} . На рис. 4 и в табл. 2 приведены значения K_{gi} , полученные в ходе расчета.

Таблица 1

v	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
K_{gi}	0,187	0,154	0,13	0,118	0,123	0,141	0,169

Как видно из представленной зависимости рассматриваемый коэффициент имеет явно выраженный минимум. С целью определения минимально возможного значения коэффициента K_{gi} расчетное выражение было продифференцировано относительно v и приравнено к нулю. В результате определено, что оптимальное качество выходного напряжения трехфазного преобразователя достигается при относительной амплитуде v

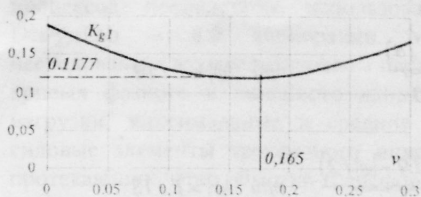


Рис. 4

равной 0,165. В этом случае относительный коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения на 18 % ниже требуемого значения, а коэффициент K_{g1} искажения синусоидальности кривой имеет минимальное значение равное 0,1177. При этом отклонение v от оптимальной величины

допускается в весьма широких пределах. Так при изменении v в диапазоне от 0,12 до 0,2 коэффициент K_{g1} изменяется всего на 0,005 единиц, что является допустимым отклонением.

Следует отметить, что при оптимальном значении амплитуды U_d вспомогательного преобразователя коэффициенты синусоидальности и формы кривых фазного и линейного напряжений трехфазного преобразователя не более чем на 1 % и 1,7 % отличаются от соответствующих коэффициентов идеальной синусоидальной кривой. Данный фактор отражает высокую степень синусоидальности кривых синтезируемого выходного напряжения преобразователя.

Оптимальный спектральный состав высших гармоник выходного фазного напряжения преобразователя при минимальном значении K_{g1} представлен на рис. 5 и в табл. 2.

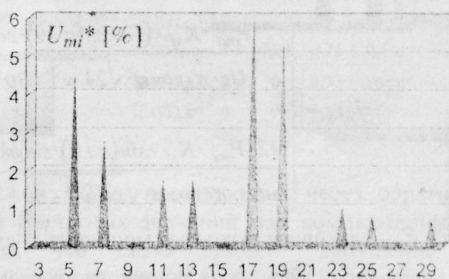


Рис. 5

Таблица 2

i	5	7	11	13	17	19	23	25	29
U_{mi}^*	4.44%	2.72%	1.72%	1.72%	5.89%	5.27%	0.97%	0.75%	0.65%

В ходе исследования рабочих процессов выведены параметры кривых фазного и линейного напряжений, действующие значения токов нагрузки, максимальные и средние значения токов, протекающих через силовые элементы трехфазного инвертора, действующие значения токов, протекающих через обмотки трансформатора TV1, и т. п. В частности,

получены расчетные выражения для вычисления средних значений токов, протекающих через силовые транзисторы VT1...VT6:

$$I_{avVT} = \begin{cases} \frac{6 \cdot P_{out} \cdot K_{sf} \cdot \sin(\pi/18)}{U_s \cdot \pi \cdot \sqrt{24 \cdot v^2 + 30}} & \text{при } |\varphi| \leq T/18 \\ \frac{6 \cdot P_{out} \cdot K_{sf} \cdot \sin^2(4\pi/9 - |\varphi|/2)}{U_s \cdot \pi \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{24 \cdot v^2 + 30}} & \text{при } |\varphi| > T/18 \end{cases}$$

протекающих через силовые диоды VD1...VD6:

$$I_{avVD} = \begin{cases} 0 & \text{при } |\varphi| \leq T/18 \\ \frac{6 \cdot P_{out} \cdot K_{sf} \cdot \sin^2(|\varphi|/2 - \pi/18)}{U_s \cdot \pi \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{24 \cdot v^2 + 30}} & \text{при } |\varphi| > T/18 \end{cases}$$

и протекающих через дополнительные ключи S1...S3 переменного тока:

$$I_{avS} = \begin{cases} \frac{12 \cdot P_{out} \cdot K_{sf} \cdot (1 - \cos(\pi/9) \cdot \cos \varphi)}{U_s \cdot \pi \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{24 \cdot v^2 + 30}} & \text{при } |\varphi| \leq T/18 \\ \frac{12 \cdot P_{out} \cdot K_{sf} \cdot \sin(\pi/9) \cdot \sin|\varphi|}{U_s \cdot \pi \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{24 \cdot v^2 + 30}} & \text{при } |\varphi| > T/18 \end{cases}$$

где P_{out} — активная выходная мощность трехфазного преобразователя;
 $\cos \varphi$ — коэффициент мощности нагрузки.

Анализ рабочих процессов показывает, что при снижении коэффициента мощности нагрузки ($\cos \varphi$) амплитуда мгновенного тока силовых обратных диодов сравнивается с амплитудой мгновенного тока (I_{mVT}) силовых транзисторов, а амплитуда мгновенного тока дополнительных ключей переменного тока даже превышает I_{mVT} . В тоже время амплитуды мгновенного тока транзисторов и диодов вспомогательного преобразователя с понижением коэффициента мощности сравниваются. Также с уменьшением коэффициента мощности и среднее значение тока силовых обратных диодов и других силовых элементов по отношению к среднему значению тока силовых транзисторов повышается. Поэтому к данным факторам необходимо внимательно относиться при проектировании трехфазного преобразователя.

В четвертой главе проведено компьютерные исследования рабочих процессов посредством использования пакета прикладных программ DesignLab – 8.0 корпорации MicroSim®. Посредством DesignLab исследованы и проанализированы параметры и гармонические составляющие кривых фазного и линейного напряжений, действующие значения токов нагрузки, максимальные и средние значения токов, протекающих через силовые элементы трехфазного инвертора, действующие значения токов, протекающих через обмотки трансформатора TV1, и т. п.

Полученные результаты были сопоставлены с результатами, вычисленными с помощью выведенных в третьей главе расчетными выражениями при различных значениях относительной амплитуды U выходного напряжения вспомогательного преобразователя и различных значениях коэффициента мощности нагрузки. В качестве примера, на рис. 6 и рис. 7 представлены результаты компьютерного моделирования и расчета средних значений токов IVT,k и IVT,p , протекающих через силовые

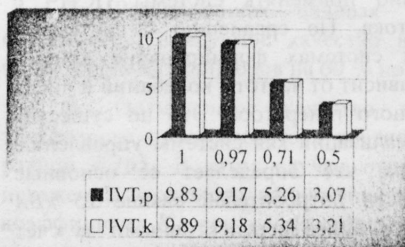


Рис. 6

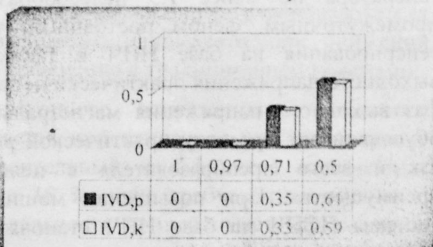


Рис. 7

транзисторы VT1...VT6, и IVD,k и IVD,p , протекающих через обратные диоды VD1...VD6. Превышение расчетных значений над компьютерными результатами объясняется тем, что было принято допущение о синусоидальной форме фазного тока и отсутствии пульсации напряжения на входных конденсаторах и падения напряжения на полупроводниковых элементах. Однако с учетом абсолютных величин полученные расхождения являются незначительными с точки зрения инженерного проектирования и выбора силовых элементов. В целом анализ рабочих процессов силовой схемы преобразователя, проведенный посредством DesignLab – 8.0, подтвердил правильность основных теоретических положений и выведенных выражений для инженерного расчета.

Также в третьей главе описан предложенный расчетный алгоритм эскизного проектирования силовой схемы трехфазного преобразователя. Посредством разработанного алгоритма был рассчитан ряд трехфазных преобразователей и спроектирован макетный образец с выходной мощностью 2 кВА. Проведенные на макетном образце экспериментальные исследования подтвердили работоспособность разработанной силовой схемы

и справедливость расчетно-теоретических положений диссертационной работы. Максимальное расхождение между расчетными и экспериментальными значениями не превышает 6-8 %.

В заключении сделаны основные выводы по результатам проделанной работы.

1. Существующие системы генерирования ЛА переменного тока постоянной частоты из-за неудовлетворительного современному уровню быстродействия, высокой стоимости изготовления, установки и проведения регламентных работ, относительно низкой надежности гидромеханических и турбомеханических приводов постоянной скорости все в большей мере начинают не удовлетворять современным авиационным требованиям;

2. На малых ЛА, имеющих общую мощность потребителей не более 15 кВА и кратность изменения скорости вращения ротора магистрального генератора не менее 1.5 целесообразно применять системы ПСПЧ с промежуточным звеном постоянного тока. По сравнению с системами генерирования на базе НПЧ в таких системах формирование кривых выходного напряжения практически не зависит от частоты колебаний и числа фаз выходного напряжения магистрального генератора. Это по существу обуславливает простоту практической реализации как системы управления, так и всего преобразователя в целом, что определяет ее основные преимущества. При повышении мощности потребителей свыше 15 кВА системы ПСПЧ на базе НПЧ становятся более перспективными за счет однократного преобразования электрической энергии;

3. Применительно к малым ЛА рационально принять за базу такие требования к форме кривой выходного напряжения, при которых основные потребители электрической энергии имеют дополнительные потери от гармонических составляющих не больше заданного уровня. При этом необходимое качество питающего напряжения для остальных потребителей, имеющих сравнительно небольшую входную мощность, необходимо обеспечивать с помощью дополнительных входных фильтров;

4. При установленном качестве формы кривой выходного напряжения ($K_g^* < 1.1$) в системах ПСПЧ с промежуточным звеном постоянного тока эффективно использовать преобразователь с амплитудно-импульсной модуляцией, который при заданных условиях имеет потенциально малые динамические потери электрической энергии по сравнению с преобразователем с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Причем в случае повышения требований к качеству формы кривой бортового переменного напряжения очевидно эффективным становится применение ШИМ преобразователя;

5. С целью повышения надежности, улучшения массогабаритных показателей и снижения стоимости технического обслуживания целесообразно в перспективной системе ПСПЧ использовать генератор с возбуждением от постоянных магнитов. При этом стабилизацию постоянного напряжения промежуточного звена рационально осуществлять посредством дополнительного канала с понижающим конвертором, который последовательно включен с основным каналом передачи электрической энергии;

6. Среди различных схмотехнических решений построения силовой схемы преобразователя с АИМ предпочтение дано тому, в котором основная часть электрической энергии осуществляется с помощью классической трехфазной мостовой схемы, а требуемое качество выходного напряжения обеспечивается посредством маломощного вспомогательного устройства, содержащего минимальное количество ключевых полупроводниковых приборов;

7. Разработанная силовая схема трехфазного преобразователя обеспечивает требуемое качество выходного напряжения при снижении числа ключевых приборов на 60 % по сравнению с традиционными схемами;

8. Оптимальное качество выходного напряжения статического трехфазного преобразователя достигается при относительной амплитуде u равной 0,165. В этом случае относительный коэффициент нелинейных искажений выходного напряжения на 18 % ниже требуемого значения, а коэффициент K_{gi} искажения синусоидальности кривой имеет минимальное значение равно 0,1177.

9. Компьютерное исследование посредством использования пакета прикладных программ DesignLab – 8.0 и экспериментальные исследования на макетном образце подтверждают правильность основных теоретических положений диссертационной работы и выведенных выражений для инженерного расчета;

10. Анализ результатов, полученных посредством применения разработанного расчетного алгоритма эскизного проектирования показывает, что предложенный подход к проектированию статического преобразователя для систем генерирования малых ЛА позволяет снизить потери мощности в разрабатываемом устройстве на 20-30 % и повысить коэффициент использования ключевых приборов на 10-22 %, что определяет достоинства его использования.

Таким образом, применительно к малым ЛА, имеющих общую мощность потребителей не более 15 кВА и кратность изменения скорости вращения ротора магистрального генератора не менее 1,5, подтверждена перспективность системы генерирования переменного тока постоянной

частоты, в которой генерирование электрической энергии осуществляется посредством магистрального генератора с возбуждением от постоянных магнитов, стабилизация постоянного напряжения промежуточного звена осуществляется посредством дополнительного канала с понижающим конвертором, а формирование выходного трехфазного напряжения осуществляется посредством АИМ преобразователя. Подобные системы при заданном качестве переменного выходного напряжения также целесообразно использовать в автономных ветроэнергетических и дизель-генераторных установках наземного назначения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Раххаль А. Трехфазный преобразователь напряжения для бортовых систем электроснабжения // Радиоэлектроника и электротехника в народном хозяйстве: Материалы пятой международной науч.-техн. конф. студентов и аспирантов вузов России. - М., 1999. - С. 50-51.
2. Раххаль А., Вольский С. И., Ломонова Е. А. Новый подход к проектированию статических преобразователей систем генерирования малых летательных аппаратов // Электротехнические комплексы автономных объектов: Материалы науч.-техн. конф. - М., 1999. - С. 67-68.
3. Rahhal A., Volsky S. I., Lomonova E. A., Klaassens J. B. New family of power converters with reduced harmonic distortion of output voltage // Proceedings conference PCIM-99.- Nurnberg, (Germany), 1999. - P. 433 - 441.
4. Volsky S. I., Rahhal A., Lomonova E. A. Development and test of the power multilevel converter for aircraft power system // Proceedings conference PCIM-2000. - Nurnberg, (Germany), 2000. - P. 460 - 469.
5. Раххаль А. Статический преобразователь напряжения с амплитудно-импульсной модуляцией для систем электроснабжения ЛА // Силовая электроника: Материалы международного науч.-техн. семинара - М., 2000 - С. 170-171.

Подписано к печати 27.10.2000г.

Бум. офсетная. Формат 60х84 1/16.

Усл. печ. л. 1.16. Уч. - изд. л. 1.12. Тираж 50.

Зак. 722

Бесплатно.

Типография

МГТУ им. Н. Э. Баумана