# КОНЯХИН Сергей Федорович

# ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА БОРТОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ С МНОГОКАНАЛЬНЫМ ПРЕОБРАЗУЮЩИМ ТРАКТОМ

#### Специальность:

05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

## АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре "Электротехнические комплексы автономных объектов – ЭКАО" ГОУ ВПО "Московский энергетический институт - МЭИ (Технический университет – ТУ").

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мыцык Геннадий Сергеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор

Пречисский Владимир Антонович, доктор технических наук, профессор Резников Станислав Борисович

Ведущая организация: ФГУП "ГОКБ "Прожектор"

Защита диссертации состоится декабря 2009 г. на заседании диссертационного совета Д212.157.07 в Московском авиационном институте (Государственном техническом университете) по адресу: 125993 г. Москва, А-80, ГСП-3 Волоколамское шоссе, д. 4, ученый совет МАИ.

С диссертацией можно знакомиться в библиотеке Московского авиационного института (Государственного технического университета).

Отзыв на автореферат в одном экземпляре, заверенный печатью организации просим направить по указанному выше адресу.

Автореферат разослан

2009 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.157.07 к.т.н., доцент

А. Б. Кондратьев

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Периодическая смена поколений техники является закономерностью развития технических устройств и систем. Учет этого закона требует непрерывного совершенствования их показателей качества, поскольку только непрерывное движение в этом направлении может обеспечить развитие и конкурентоспособность продукции.

Актуальность проблемы. Трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ), совершенствованию которых посвящена настоящая работа, по масштабам применения занимают заметное место в системах электроснабжения летательных аппаратов (ЛА) различных типов. В зависимости от типа ЛА единичная мощность этого электротехнического устройства может доходить до 10 кВт и более. Практика показала, что наиболее приемлемым решением здесь является схема ТВУ с двухканальным преобразующим трактом (L=2) с суммированием токов каналов, обеспечивающая (в идеале) пульсность выпрямленного напряжения  $m_{13}=12$ . Особенностью ТВУ авиационного применения является повышенное значение вольт на виток во вторичных обмотках трансформаторного узла. При практической реализации фактор целочисленности витков затрудняет точное выполнение проектных условий, обеспечивающих требуемые параметры двух 3-х фазных систем напряжений – их фазовый сдвиг на угол  $\pi/6$ , а также равенство амплитуд напряжений и модулей фазных сопротивлений каналов. В результате, как установлено в настоящей работе, в практических решениях из-за этих факторов может возникать глубокая разбалансировка токов каналов, которая проявляется в перегрузке одного из каналов и разгрузке другого и которая возрастает с увеличением мощности ТВУ. Это явление, в конечном счете, приводит к ухудшению его удельного массового показателя, КПД и качества, как выходного, так и входного токов. Поэтому повышение эффективности таких решений путем выявления и устранения всех разбалансирующих факторов является актуальной задачей.

**Целью работы и задачами исследования** являются исследование возможностей улучшения показателей качества одного класса электротехнических устройств авиационного применения — трансфрматорно-выпрямительных устройств (ТВУ), разработка на этой основе более эффективных решений, создание для них информационно-модельного описания, необходимого для проектирования, и внедрение этих решений в практику.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач используются: концепция многоканального преобразования энергетического потока, методы технического творчества, общие положения теории электрических цепей, математический аппарат рядов Фурье, разделы дифференциального и интегрального исчисления, имитационное компьютерное моделирование, физическое (натурное) моделирование.

При структурном и параметрическом синтезе используется критериальный базис, принятый в авиационной электротехнике.

Достоверность основных положений диссертации подтверждается тем, что они не противоречат основным положениям электротехнических знаний, и хорошим совпадением теоретически полученных результатов с результатами имитационного и физического моделирования.

## Научная новизна работы.

- 1. На основе обзора, систематизации и сопоставительного анализа известных решений бортовых ТВУ показано, что все они имеют тот или иной недостаток, отрицательно влияющий на их удельный массовый показатель и не позволяющий получить "идеальный конечный результат" в соответствии с проектным замыслом.
- 2. Показано, что в идеале при выполнении проектных условий по симметрии двух систем напряжений на входе двух выпрямительных мостов, наименьшую суммарную габаритную (типовую) мощность имеют ТВУ с двумя вторичными обмотками с топологией "звезда" и "треугольник" и с двухобмоточным уравнительным реактором (трансфильтром) в цепи постоянного тока  $(L-TBV(+TF_{2=}))$ . Это решение по показателям качества и по совокупности существенных признаков является ближайшим прототипом по отношению к разработанному в настоящей работе новому, более эффективному решению.
- 3. Впервые установлено, что реально, при практической реализации известного решения-прототипа ТВУ из-за практически неустранимой амплитудной асимметрии напряжений и из-за неравенства сопротивлений каналов, происходит сильная разбалансировка токов каналов разгрузка по току одного канала и перегрузка другого. Имитационным моделированием и экспериментально показано, что при реальных значениях ассимметрирующих факторов (АФ) коэффициент перегрузки (разбалансировки  $K_{\Pi(Id)}$ ), определяемый как отношение большего тока (одного канала  $I^{o}_{d0}$ ) к меньшему току (другого канала  $I^{m}_{d0}$ ), может превышать значение  $K_{\Pi(Id)} = I^{o}_{d0} / I^{m}_{d0} = 3$ .
- 4. Представлены результаты аналитического исследования влияния АФ на уровень разбалансировки токов каналов и показана невозможность обеспечить симметрию работы каналов параметрическим способом.
- 5. Разработана серия новых решений L-ТВУ с канальностью L=2, L=3, L=4, в которых явление разбалансировки токов каналов принципиально устранено. При L=2 существо технического решения заключается в установке трех однофазных (двухобмоточных  $3TF_{2\approx}$ ) трансфильтров на входе мостов, вместо однофазного (двухобмоточного  $TF_{2=}$ ) на их выходе. Новизна и полезность решений подтверждена патентами.
- 6. На основе имитационного компьютерного моделирования нового L-ТВУ (с L=2 и  $3TF_{2\approx}$ ) детально исследована и описана физика происходящих в нем новых рабочих процессов, на этой основе разработано необходимое при проектировании модельное описание трансфильтра нового типа и предложена методика его проектирования и ТВУ в целом.
- 7. Показано, что новое L-ТВУ характеризуется наименьшей суммарной габаритной мощностью моточных изделий (трехфазного трансформа-

тора и трансфильтра) в сравнении со всеми альтернативными вариантами.

## Практическая ценность.

- 1. Предложенное новое ТВУ обеспечивает выполнение возложенной на него функциональной задачи и имеет при этом наименьшую (теоретическую) установленную мощность оборудования (моточных изделий и диодов) и, как следствие, наилучший удельный массовый показатель.
- 2. По точности выполнения функциональной задачи разработанные и исследованные решения ТВУ целесообразно использовать не только в авиационной электротехнике, где в наибольшей мере проявляется их эффективность, но и во всех других областях, где они применяются.

Новые решения ТВУ, как наиболее эффективные, по сути, могут успешно заменить широко описанные в технической литературе, включая учебники, известные ТВУ многоканального типа (с уравнительными реакторами на выходе мостовых выпрямителей).

## Реализация результатов работы.

L-ТВУ с L=2 и трансфильтром  $3TF_{2\approx}$  принято к внедрению в ОАО АКБ "Якорь": разработка прошла стадию ОКР, изготовлена опытная партия ТВУ, проведены предварительные испытания.

Разработанное информационно-модельное описание и методика проектирования нового двухканального L-ТВУ используются в учебном процессе на кафедре "Электротехнические комплексы автономных объектов — ЭКАО" Московского энергетического института — МЭИ (ТУ) и могут быть использованы в инженерной практике.

Апробация работы. Основное содержание работы докладывалось и обсуждалось: На X1 Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов "Радиоэлектроника, электротехника и энергетика" (Москва, МЭИ, 2005г.); на научно-технической конференции "Системы и источники вторичного электропитания и элементная база для них" (Санкт-Петербург, 2005 г.); на 11 научно-технической конференции "Системы и источники вторичного электропитания и элементная база для них" (Санкт-Петербург, 2006 г.); на расширенном заседании кафедры "Электротехнические комплексы автономных объектов — ЭКАО" Московского энергетического института (Технического университета).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ (среди них 1 патент на полезную модель и 3 патента на изобретение).

#### Основные положения, выносимые на защиту.

- 1. Результаты сопоставительного анализа известных решений ТВУ с многоканальным преобразующим трактом по габаритной мощности трансформаторов и трансфильтров.
- 2. Результаты исследования влияния ассимметрирующих факторов на несимметричную загрузку (разбалансировку) токов каналов
- 3. Новая структурно-алгоритмическая организация ТВУ, по эффективности превосходящая известные решения.
- 4. Модельное описание разработанного решения ТВУ как расчетно-информационный базис для его проектирования.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава первая. Для выявления объекта, подлежащего приоритетной модернизации, в первой главе проведены обзор, систематизация и классификация электротехнических комплексов, применяемых в бортовых авиационных системах электроснабжения (СЭС). Показано, что основой вторичных СЭС летательных аппаратов (ЛА) являются универсальные преобразователи общего назначения - статические инверторы и трансформаторно-выпрямительные устройства. Приведен обзор преобразователей, используемых в настоящее время во вторичных СЭС ЛА различного назначения. Показано, что значительный процент в системах такого рода занимают трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ). Приведены критерии проектирования и совершенствования бортовых статических преобразователей:

- рациональный компромисс между минимумом массы и габаритов (при использовании микро- и миниатюризации и принудительного охлаждения) и минимумом тепловых потерь (максимумом КПД);
- минимум влияния на питающую сеть (электроэнергетическая совместимость ЭЭС).

Систематизированы основные направления и методы обеспечения электромагнитной и электроэнергетической совместимости преобразователей с питающей бортовой сетью.

Установлено, что выпускаемые в настоящее время ТВУ, находящие наибольшее применение во вторичных СЭС ЛА, по техническим показателям не соответствуют современным требованиям и значительно отстают уровня, достигнутого ведущими зарубежными производителями. По этой причине задача совершенствования бортовых ТВУ, как целостных взаимосвязанных устройств, представляется весьма своевременной и актуальной. В конце главы формулируются подлежащие решению конкретные задачи.

Во второй главе обосновывается выбор базовой структуры ТВУ с двухканальным преобразующим трактом, в наибольшей мере удовлетворяющей стандартам бортовых СЭС. Показано, что мостовая схема Ларионова не может быть использована здесь в качестве базовой. На практике используются более сложные решения, характеризуемые использованием в них нескольких (L) мостов Ларионова совместно с фазосдвигающими трансформаторами напряжения. В технической литературе они обозначаются по-разному, например, как многопульсные или многомостовые схемы. ТВУ такого типа по своей сути являются устройствами с многоканальным преобразованием - МКП-ТВУ. Представляется, что терминологически это наиболее адекватное и информативное представление о данном классе устройств, позволяющее упорядочить большое их схемотехническое многообразие. Одним из основных свойств МКП-ТВУ является уменьшение искажений качества энергетического потока по входу и выходу с увеличением канальности преобразования L. Это дает основание обозначать их также и как малоискажающие L- ТВУ (далее просто - L-ТВУ). Входные и

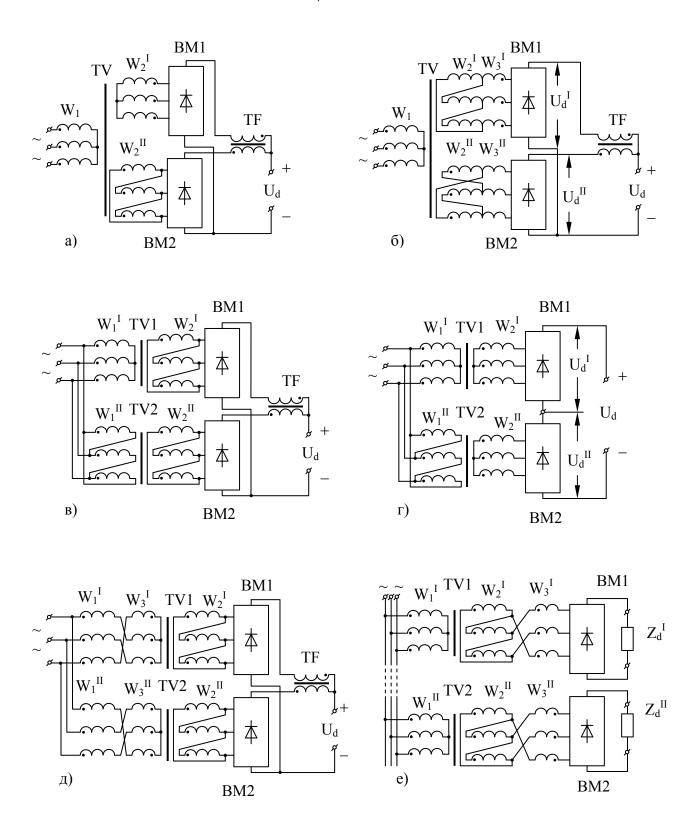


Рис.2.1. Примеры структурно-параметрической организации двухканальных малоискажающих трехфазных выпрямителей пассивного типа — 2-МИТВУ с использованием фазосдвигающих трансформаторов напряжения - ФСТН (в различных вариантах их реализации) и двух трехфазных мостовых схем выпрямления - ВМ1, ВМ2. При параллельном соединении выходов ВМ1, ВМ2 используется трансфильтр — ТF (обозначавшийся ранее как уравнительный реактор).

выходные цепи L-ТВУ могут быть организованы по схемам суммирования напряжений (СН) или суммирования тока (СТ). Последняя структура обеспечивают лучший КПД, и поэтому ей здесь отдается предпочтение. Независимо от структурных модификаций все 12-пульные схемы (при L=2) имеют одно и то же значение коэффициента искажения синусоидальности входного тока  $K_I \approx 15\%$ , а значение коэффициента пульсаций в реальных условиях наихудшего питания составляет 3,3 %.

Проведены систематизация и классификация совокупности известных решений L-ТВУ (с L=2), отличающихся способом организации относительного фазового сдвига между двумя трехфазными системами напряжений, подаваемыми на входы выпрямительных мостов, и схемой соединения (СН или СТ) их выходов – рис.2.1. Дан сопоставительный их анализ по критерию габаритной мощности трансформаторных узлов и по устойчивости к ассимметрирующим факторам (АФ). Показано, что при отсутствии АФ наилучшие показатели имеет широко описанное в технической литературе L-ТВУ с одним трансформатором с топологией вторичных обмоток "звезда" и "треугольник". Проблематичность его использования в данном применении заключается в том, что реально неустранимые АФ, делают это решение практически непригодным. Это решение выбрано за прототип и поставлена задача его модернизации путем нейтрализации АФ. Поиск путей модернизации L-ТВУ был начат с детального изучения явления токового разбаланса в его каналах и анализа наиболее простых параметрических способов его устранения.

Третья глава посвящена анализу природы ассимметрирующих факторов (АФ), которые вызывают разбалансировку токов каналов и исследованию возможности их устранения. Опыт автора по проектированию и испытанию преобразователей показывает, что построение L-ТВУ с рассмотренными в главе 2 "традиционными" структурами, точно отвечающих указанным выше признакам, практически невозможно. В реальных устройствах мощности не делятся пополам между каналами, фазовый сдвиг не всегда равен 30°, а амплитуды фазных напряжений не равны между собой. Это крайне неблагоприятно сказывается на режимах работы ТВУ, их параметрах и характеристиках. Бортовые ТВУ работают в условиях воздействия двух групп АФ - внешних и внутренних. Внешние АФ обусловлены допускаемыми ГОСТ 19705-89 перекосами углов между векторами фазных напряжений и их амплитудной несимметрией. При правильно спроектированном устройстве внешние АФ сказываются лишь на качестве его выходной электроэнергии и не должны влиять на режимы работы и воздействовать на внутренние электромагнитные процессы L-TBУ.

Природа внутренних АФ заложена в *modus operandi L*-ТВУ - способах деления мощности по каналам и организации фазового сдвига. Кроме того, существенную роль играют параметры комплектующих и материалов, используемых в схемах и конструкциях, а также конструктивно-технологические особенности. В данной главе дается анализ основных внутренних

 $A\Phi$  и их влияния на работу и характеристики L-ТВУ.

**Первый фактор** - неравенство напряжений каналов, присущ L-ТВУ с так называемой здесь базовой структурой "звезда — треугольник". Для симметричной работы каналов необходимо обеспечение точного равенства отношения витков вторичных обмоток  $W2'/W2''=\sqrt{3}$ . Число  $\sqrt{3}$  является иррациональным и в силу этого не может быть выражено в виде отношения двух целых чисел. В инженерных расчетах с достаточной точностью можно считать  $\sqrt{3}$ , равным 1,732. Тем не менее, даже такая придаваемая числу  $\sqrt{3}$  "рациональность", в данном конкретном применении не позволяет обеспечить необходимую симметрию каналов.

Особенностью ТВУ систем электроснабжения ЛА является относительно низкое выходное напряжение при достаточно высоком входном напряжении повышенной частоты. Это обстоятельство определяет специфику трансформаторов, используемых в бортовых ТВУ, а именно, большие значения коэффициента трансформации и "маловитковость" их вторичных обмоток с сильно выраженной дискретностью значений "Вольт на виток". Масса ТВУ в значительной степени определяется массой используемого в нем трансформатора, которая, в свою очередь, зависит от массы обмоток последнего - массы "меди". Стремление к минимизации массы ТВУ ведет к необходимости применения в трансформаторах магнитопроводов из магнитных материалов с повышенным значением индукции насыщения. В трансформаторах бортовых ТВУ применяются витые ленточные магнитопроводы из прецизионных сплавов типа 49КФ, 49К2Ф, 49К2ФА с индукцией насыщения до 2,25 Т и относительно низкими удельными потерями. Однако вытекающее из этого уменьшение числа витков, позволяющее снизить массу трансформатора, усугубляет отмеченную выше проблему дис-

кретности, увеличивая "цену" витка. Для оценки деления токов между каналами определены интервалы проводимости  $\Theta'$  и  $\Theta''$  1-го и 2-го каналов в пределах интервала повторяемости преобразования  $\Theta_{TR}$  (рис.3.1):

$$\Theta' = \theta_2 - \theta_1 = arctg \frac{C}{\sqrt{3} \cdot C - 2} - \pi - arctg \frac{C}{2 - C \cdot \sqrt{3}} . \tag{3-1}$$

$$\Theta'' = \theta_3 - \theta_2 = arctg \frac{C - \sqrt{3}}{\sqrt{3} \cdot C - 1} - arctg \frac{C}{\sqrt{3} \cdot C - 2} + \pi , \tag{3-2}$$

где  $C=V'_M/V''_M$  – коэффициент неидентичности напряжений каналов.

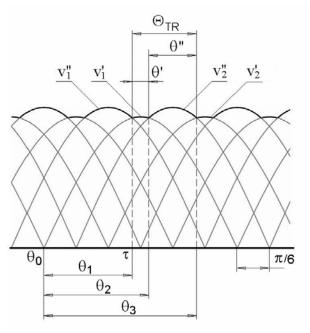


Рис.3.1. Выходное напряжение двухканального L-ТВУ при неравенстве напряжений каналов.

Символами (') и (") обозначены параметры 1-го и 2-го каналов соответственно.

Как следует из (3-1), (3-2) интервалы  $\Theta'$  и  $\Theta''$ , являются функциями параметра C. На основании этих моделей получены средние значения выходных токов каналов  $I_A' = f'(C)$  и  $I_A'' = f''(C)$ . Их отношение  $I_A'/I_A'' = g(C)$ 

также является функцией параметра C.

Функция g(C)описывает pacпределение токов каналам ТВУ и характеризует степень несимметрии его работы в зависимости от чисел витков вторичных обмоток W' и W''. Область допустимых значений аргумента Cв функции g(C)соответствует интервалу 0,866 < C < 1,1547. Вне ЭТОГО диапазона мгновенные значения напряжений одного из каналов будут всегда ниже значений мгновенных напряжений друканала, ГОГО схема L-ТВУ изменит свою структуру - из двухканальной превратится в одноканальную c 6пульсным выпрямлением. В работе показано, что увеличение

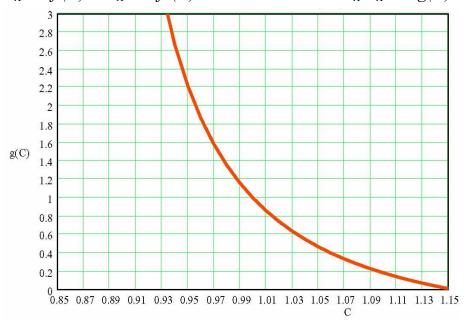


Рис.3.2. Зависимость отношения токов каналов g(C) двухканального L-ТВУ от параметра несимметрии напряжений каналов C.

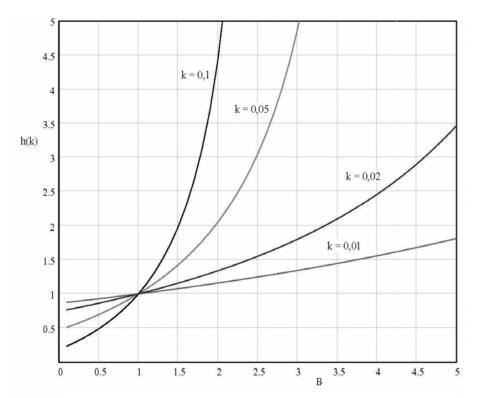


Рис.3.3. Зависимость отношения токов каналов двухканального L-ТВУ от отношения их внутренних эквивалентных сопротивлений  $B=r_{13}/r_{23}$  при различных значениях параметра  $k=r_{13}/R$ .

числа витков вторичных обмоток (уменьшение "цены дискреты") позволяет, хотя и не полностью, но достаточно точно уравнять токи каналов. Однако для бортовых ТВУ этот путь не приемлем. Это ведет при прочих равных условиях к значительному недоиспользованию магнитопровода по индукции, к увеличению массы " меди" и, как следствие, к ухудшению массогабаритных показателей ТВУ. Таким образом, реально выбор чисел витков вторичных обмоток трансформатора весьма ограничен. При этом значение их отношений не обеспечивает приемлемой симметрии работы каналов L-ТВУ.

В главе 3 исследовано также влияние на работу устройства второго  $\mathbf{A}\mathbf{\Phi}$  – неравенства внутренних эквивалентных сопротивлений каналов –  $r_{13}$ ,  $r_{23}$ , характеризуемого их отношением  $B = r_{13}/r_{23}$ . Искомые зависимости, полученные на основе сформированного модельного описания, представлены на рис.3.3. Попутно было исследовано влияние отношения входного активного сопротивления к сопротивлению нагрузки k = r/R на характеристики ТВУ. Нужно отметить, что исследование влияния внутренних сопротивлений источника питания на процесс выпрямления переменного напряжения для ряда схем выпрямителей уже проводилось рядом исследователей, в том числе Репиным А.М. (Белопольский И. И., Репин А. М., Христианов А. С. Стабилизаторы низких и миливольтных напряжений - Москва: Энергия, 1974). Ими были определены некоторые параметрические соотношения, которые обеспечивают режим удвоения пульсности выпрямленного напряжения. В диссертационной работе этот режим рассмотрен для трехфазной мостовой схемы Ларионова и для двухканального ТВУ на базе двух трехфазных мостовых схем. В частности показано, что для мостовой схемы режим удвоения пульсности выпрямленного напряжения имеет место при k=r/R=0,577.

В заключении главы делается вывод о невозможности устранения токовой разбалансировки токов каналов параметрическим способом.

**Четвертая** глава посвящена разработке и исследованию структурноалгоритмических способов нейтрализации ассимметрирующих факторов ( $A\Phi$ ) L-TBУ.

# Способ параметрического симметрирования

Предложенный и рассмотренный в работе способ выравнивания напряжений каналов с помощью "вольтодобавки" позволил приблизиться к решению проблемы симметрирования токов каналов L-ТВУ, однако оказалось, что он работоспособен только в условиях неизменной нагрузки.

Способ суммирования выходных напряжений каналов

Наиболее известно решение *L*-ТВУ с организацией выходов мостов по схеме СН, то есть с последовательным их соединением. Устройство может иметь как один, так и два трансформатора с различными вариантами организации фазового сдвига напряжений на вторичной стороне. В данном решении отпадает необходимость в трансфильтре. Независимая работа выпрямителей здесь обеспечивается самим принципом действия схемы – протеканием в выходной цепи общего тока, что и определяет ее имманент-

ное свойство. Несмотря на наличие у нее совершенно неоспоримых достоинств, использование данной структуры в качестве базового решения для построения низковольтных преобразователей, в том числе бортовых, неэффективно. Связано это, прежде всего, с увеличенными потерями, обусловленными протеканием полного тока нагрузки через четыре последовательно включенных выпрямительных диода.

вторичной стороне (с параллельным соединением выходов выпрямителей) - рис. 4.1. Независимая работа выпрямителей здесь обеспечивается также без использования трансфильтра.

По критериям проектирования бортового электрооборудования существенным недостатком данной структуры является необходимость конструктивного оформления всех выводов первичных обмоток одного из трансформаторов, что негативно сказывается на массогабаритных показателях *L*-ТВУ. Необходимо отметить и тот факт, что в силу чрезвычайной ограниченности номенклатуры трехфазных магни-

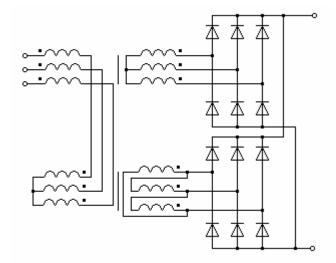


Рис.4-1. Вариант структурной организации двуканального двухтрансформаторного *L*-ТВУ с использованием способа принудительного (активного) симметрирования токов каналов.

топроводов, пригодных для применения в бортовой технике, практически невозможно так подобрать их типономиналы, чтобы два трансформатора были бы по совокупности энергетических и массогабаритных показателей эквивалентны одному трансформатору с двумя комплектами вторичных

обмоток, то есть при практической реализации теоретически возможный оптимум не достигается.

Способ структурноалгоритмического симметрирования Наиболее рациональным способом симметрирования работы *L*-ТВУ пред-

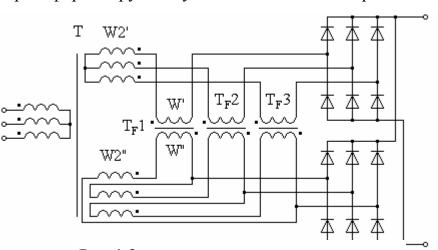


Рис.4-2. Вариант однотрансформаторного двухканального L-ТВУ со структурно-алгоритмическим симметрированием с помощью трех однофазных трансфильтров.

ставляется введение в его структуру элемента (элементов), так воздействующих на алгоритм работы каналов, чтобы при сохранении всех признаков L-канального преобразования сделать его индифферентным к разбалансирующему действию внутренних АФ. Такой способ симметрирования можно охарактеризовать как структурно-алгоритмический. Техническое решение, удовлетворяющее такой концепции построения было разработано при непосредственном участии автора. Один из доведенных до опытноконструкторской реализации вариантов показан на рис.4-2. Последующими детальными исследованиями была подтверждена высокая эффективность этого решения. На этом основании была предложена и защищена патентами (для различных применений) серия технических решений не только с канальностью L=2, но и с L=3 и L=4. Структурно-алгоритмическое симметрирование в L-ТВУ на рис.4-2 реализовано с помощью специально введенных трех однофазных двухобмоточных трансфильтров  $T_F1...T_F3$ , работающих на переменном токе. Обмотки трансфильтров W' и W'' включены последовательно с одноименными по фазе вторичными обмотками W2'и W2'' трансформатора. При этом, если обмотки W' и W2' включены встречно, то обмотки W'' и W2'' - согласно, и наоборот. Отношение числа витков обмоток трансфильтров таково, что  $W'/W'' = W2''/W2' = \sqrt{3}$ . Три однофазных трансфильтра могут быть объединены в один трехфазный. Показано, что описанный выше технический прием применим также и к двухтрансформаторным преобразователям, причем трансфильтры здесь могут быть установлены как на вторичной, так и на первичной сторонах трансформаторов. Серия новых решений запатентована. Поскольку рассматриваемое семейство преобразователей является новым, неизученным и достаточно сложным для анализа из-за многосвязности протекающих в схемах процессов, была поставлена задача создания соответствующего модельного описания, обеспечивающего их инженерное проектирование.

Надо отметить, что позднее была обнаружена схожая по структуре схема ТВУ (патент Великобритании № 2113927A, 1983 г.). Однако с учетом существа решаемой задачи совокупность существенных признаков рассматриваемого в диссертации решения и вариантность предложенных в нем структурных схем позиционируют его как самостоятельное самодостаточное решение, содержащее необходимый объем проектной информации, определяющей отличительные особенности процессов в ТВУ.

**Пятая** глава посвящена разработке модельного описания двухканальных L-ТВУ со структурно-алгоритмическим симметрированием. Под модельным описанием понимается необходимая для проектирования, прежде всего, количественная взаимосвязь между амплитудой линейной ЭДС  $E_{\mathit{Лm}}$  вторичной трехфазной обмотки и амплитудой выпрямленного напряжения  $U_{\mathit{dm}}$ , а также расчетное напряжение трансфильтров ( $T_{\mathit{F}\approx}$ ) и действующее значение тока в его обмотках. Из-за относительной сложности задачи, на первом этапе ее решения принят ряд традиционных допущений не учитываются второстепенные факторы: падения напряжения на диодах мостов, активные сопротивления обмоток трансформатора,  $T_{\mathit{F}\approx}$  и их индук-

тивности рассеяния, ток нагрузки считается идеально сглаженным. Исследовалась схема L-ТВУ с тремя однофазными  $T_{F\approx}$  переменного тока по рис.4.2. Установлено, что все напряжения на  $T_{F\approx}$  описываются четырьмя повторяющимися фрагментами тригонометрических функций — рис.5-1. Взаимосвязь между мгновенными значениями линейной ЭДС  $e_n(t)$ , линейного напряжения  $u_n(t)$  и напряжением на обмотке  $T_{F\approx}$  -  $u_{TF}(t)$ , например, для 2-го канала определяется выражением:

$$e_{n}(t) = u_{n}(t) + u_{TF}(t)$$
. (5-1)

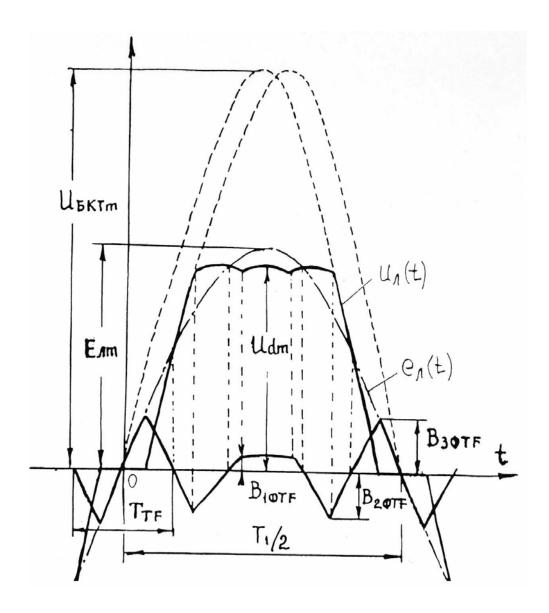


Рис. 5.1. Линейная ЭДС вторичной обмотки трансформатора -  $e_n(t)$ , линейное напряжение на входе мостов —  $u_n(t)$  и напряжение на обмотке трансфильтра —  $u_{TF}(t)$ .

Напряжение  $u_{TF}(t)$  на полупериоде напряжения питания L-ТВУ имеет 6 точек излома, которые характеризуется тремя значениями уровней (рис.5.1):  $A_{IЛТF}$ ,  $A_{2ЛТF}$  и  $A_{3ЛТF}$  - для линейных напряжений (в первом канале), и  $B_{I\Phi TF}$ ,  $B_{2\Phi TF}$  и  $B_{3\Phi TF}$  - для фазных напряжений (во втором канале). Точки излома соответствуют границам интервалов квантования. Изначально при реше-

нии предполагалось использовать традиционный путь - метод припасовывания (метод мгновенных значений). Найдя параметры функции  $u_{TF}(t)$ , можно затем найти и параметры функции  $u_{\pi}(t)$ . Оказалось, однако, что решить поставленную задачу, опираясь на эти исходные данные, не представляется возможным, так как на каждом интервале квантования из трех параметров функции  $u_{TF}(t)$  может быть определен лишь один из них (см. рис.5.1):

$$B_{3\Phi TF} = E_{Jlm} \cdot \sin \pi / 12 = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2 - \sqrt{3}} \cdot E_{Jlm}$$
 (5-2)

В результате был найден иной путь: в качестве исходной взята другая величина - линейное напряжение на входе мостов, имеющее квазитрапецеидальную форму (рис.5.1). Оно также характеризуется шестью интервалами квантования, три из которых, представляющие верхнее основание квазитрапеции, образованы тремя пульсами выпрямленного напряжения, один интервал является нулевым, а два интервала, представляющие боковые стороны квазитрапеции, как показано, описываются соответствующим по фазе фрагментом синусоиды с амплитудой:

$$U_{EKTm} = \sqrt{2 + \sqrt{3}} \cdot U_{dm} , \qquad (5-3)$$

Заметим, что при принятых допущениях амплитуда линейного напряжения на входе мостов  $U_{\mathit{Лm}}$  равна амплитуде выпрямленного напряжения  $U_{\mathit{dm}}$ :

$$U_{Im} = U_{dm} . ag{5-4}.$$

Ключевым при решении задачи этим способом является использование следующего физического факта. По принципу работы  $T_{F\approx}$  для основных гармоник напряжения и тока он является "прозрачным". Это означает, что потокосцепления двух обмоток, равные и противоположные по знаку, не создают в его магнитопроводе магнитного потока. Для строгости рассуждений заметим, что на первом этапе анализа приняты еще два допущения: отношение чисел витков обмоток точно равно  $\sqrt{3}$  (в последующем оно снято), а намагничивающий ток трансфильтра равен нулю. *Таким образом, содержание ЭДС Е*л<sub>т</sub> после прохождения ее через трансфильтр остается неизменным. Тогда искомую взаимосвязь между  $E_{Лm}$  и  $U_{Лm} = U_{dm}$  можно найти путем разложения в ряд Фурье линейного напряжения на входе мостов  $u_{\eta}(t)$ :

$$u_{\pi}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} b_{2k+1} \cdot \sin(2k+1) \cdot \omega t$$
 (5-5)

где  $U_{\it dm}$  - амплитуда выпрямленного напряжения.

и определения в нем содержания основной гармоники  $b_I = U_{\Pi(I)m}$ . Определив эту величину, однозначно можно утверждать, что это и есть амплитуда  $E_{IIm}$  искомой линейной ЭДС  $e_{II}(t)$ :

$$b_1 = U_{\pi(1)m} = E_{\pi m}.$$
 (5-6)

С учетом выбранного предела интегрирования  $(0...\pi/2)$  функция  $u_n(t)$  описывается тремя фрагментами трех синусоидальных функций (рис. 5.1). Поэтому коэффициент Фурье  $b_{2k+1}$  в (5-5) удобно представить в виде трех составляющих:

$$b_{2k+1} = b_{2k+1}^{(1)} + b_{2k+1}^{(2)} + b_{2k+1}^{(3)}. (5-7)$$

После их вычисления, для первой гармоники (при k=0) получим следующее выражение:

$$b_{1} = b_{1}^{(1)} + b_{1}^{(2)} + b_{1}^{(3)} =$$

$$= \left[ \left( 2 + \sqrt{3} \right) \cdot \left( \frac{1}{6} - \frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1}{2\pi} + \sqrt{3} \cdot \left( \frac{1}{6} + \frac{1}{2\pi} \right) + \frac{1}{\pi} \cdot \left( \frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \right) \right] \cdot U_{dm} =$$

$$= \left( \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{3} \right) \cdot U_{dm} = \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \cdot U_{dm} = 1,07735 \cdot U_{dm}$$
(5-8)

Таким образом, с учетом (5-6) искомая взаимосвязь между  $E_{Лm}$  и  $U_{dm}$  найдена. Результаты компьютерного моделирования подтверждают полученное соотношение с высокой точностью (не хуже 0,5%).

Наибольшее значение уровня напряжения в первой точке излома  $\theta_3$  определяется выражением (5-2). С учетом взаимосвязи (5-8) эту величину удобно выразить через амплитуду выпрямленного напряжения  $U_{dm}$ :

$$B_{3\phi TF} = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{2 - \sqrt{3}} \cdot \frac{2 + \sqrt{3}}{2\sqrt{3}} \cdot U_{dm} = 0,27884 \cdot U_{dm}. \tag{5-9}$$

Предложенная методика расчета  $T_{F\approx}$  основана на использовании именно этого параметра: в качестве расчетного взято напряжение треугольной формы с максимальным значением  $B_{3\Phi TF}$ , период которого описывается двумя наибольшими фрагментами напряжения  $u_{TF}(t)$ .

В главе 5 дана также оценка амплитудной несимметрии в напряжениях каналов на работу  $T_{F\approx}$ . Логика анализа при этом, как, впрочем, и ранее, базировалась на следующем факте, подтвержденном как экспериментально, так и компьютерным моделированием: линейные напряжения на входах выпрямительных мостов одинаковы как форме, так и уровню и равны полусумме исходных линейных напряжений каналов (до трансфильтров). Это значит, что при несимметрии полуразность ЭДС каналов (по основной гармонике)  $e_{TF(I)}(t)$  падает на обмотках трансфильтров каналов, причем в канале с меньшей ЭДС складываясь с ней, а в канале с большей ЭДС вычитаясь из нее:

$$e_{TF(1)}(t) = \frac{1}{2} \Delta e_{\pi(1)}(t) = \frac{1}{2} \cdot \left( e_{\pi(1)}^{11}(t) - e_{\pi(1)}^{1}(t) \right). \tag{5-10}$$

Следовательно,  $T_{F\approx}$  выравнивает не только токи, но и напряжения. Поэтому, если при полной симметрии напряжений каналов основная гармоника в спектре напряжения  $T_{F\approx}$  отсутствует, то при наличии асимметрии она появляется, и расчет  $T_{F\approx}$  должен вестись уже с учетом этого фактора.

На основе полученного модельного описания дается подход к расчету трансфильтра, в том числе с учетом последнего фактора.

**В** славе 6 представлены результаты разработки и экспериментального исследования двухканального *L*-ТВУ. Целью экспериментальных исследований являлось подтверждение достоверности и точности основных положений и соотношений, полученных в предыдущих главах настоящей рабо-

ты. При непосредственном участии автора в соответствии с реальным техническим заданием было разработано и испытано устройство ТВУ-6С мощностью 6 кВт, на базе которого были исследованы методы симметрирования, рассмотренные в главе 4, в том числе подтверждена высокая эффективность разработанного решения.

Особенностями проектирования и конструирования являются повышенная интенсивность использования материалов ТВУ — стали магнитопроводов и меди обмоток моточных изделий, обеспечивающая желаемое снижение массы, а также высокая плотность упаковки узлов ТВУ, обеспечивающая снижение его объема. Реализация этих особенностей достигается использованием принудительного воздушного охлаждения и использованием новых эффективных конструкторско-технологических решений, часть их которых разработана и запатентована при непосредственном участии соискателя. Среди них решения, связанные не только с технологией изготовлением трансформатора и трансфильтров, но и с охлаждением и рациональной компоновкой узлов, которые в совокупности позволили получить высокий удельный показатель ТВУ-6С — примерно 1кг/кВт.

#### Заключение

- 1. Для определения приоритетного направления модернизации выпускаемых бортовых электроэнергетических комплексов проведен их обзор. Приведены основные их показатели, создающие ориентиры для выявления резервов их совершенствования. Показано, что наибольшее применение на борту летательных аппаратов находят трансформаторно-выпрямительные устройства (ТВУ).
- 2. Проведены систематизация и классификация совокупности известных решений ТВУ с двухканальным преобразующим трактом (с пульсностью выпрямленного напряжения  $m_{13}=12$ ). Обоснована целесообразность использования структуры ТВУ с суммированием токов каналов. Все решения ТВУ этой группы обеспечивают малый уровень пульсаций выпрямленного напряжения (< 3,5%), малое значение коэффициент гармоник потребляемого из сети тока ( $K_{\Gamma(i)} \le 0.15$ ) и высокое содержание постоянной составляющей выпрямленного напряжения ( $U_{d0}$ =0,9886· $U_{Jm}$ , где  $U_{Jm}$  – амплитуда линейного напряжения на входе мостовых выпрямителей). С целью упорядочения информации и для упрощения изложения материала эти устройства предложено обозначать как 3-х фазные выпрямители с двухканальным преобразующим трактом и с трансфильтром в цепи постоянного тока – L-ТВУ(+Т $F_{2}$ =), где L – в общем случае целое число, а в рассматриваемом случае L=2; нижний индекс "2" при TF означает – двухобмоточный. По качеству преобразования, определяющему электроэнергетическую совместимость, устройства этого типа являются малоискажающими.
- 3. Сопоставительный анализ решений этой группы показал, что минимальные габаритную мощность и массу трансформаторного узла без учета ассимметрирующих факторов ( $A\Phi$ ) имеет решение 2- $TBY(+TF_{2=})$  с одним

трансформатором и с двумя вторичными обмотками с топологией "звезда" и "треугольник".

- 4. На основе практического опыта применения 2-ТВУ(+ТГ₂=) впервые выявлена значительная (до 50% и более) токовая несимметрия в каналах, обусловленная практически неустранимой неидентичностью параметров каналов − напряжений и сопротивлений вторичных обмоток трансформатора. Этот органически присущий данному решению недостаток в данном применении приводит к существенному ухудшению технических и энергетических показателей ТВУ.
- 5. Экспериментально выявленный факт послужил основой для проведения теоретического исследования влияния  $A\Phi$  на разбалансировку токов каналов и на показатели качества 2-ТВУ(+TF<sub>2=</sub>). Получено необходимое модельное описание, подтверждающее этот факт и сделаны необходимые для проектирования выводы и рекомендации.
- 6. Одним из новых, практически значимых результатов выполненного теоретического исследования является также установление факта удвоения пульсности выпрямленного напряжения при соответствующем для конкретной схемы выпрямления отношении входного активного сопротивления r выпрямителя к его выходному сопротивлению R. Этот факт предложено использовать для построения безынерционных датчиков 3-х фазного напряжения. Применение их в системах автоматической стабилизации напряжения генерирующих систем позволяет улучшить их динамические характеристики.
- 7. В поисках технического решения, устраняющего недостатки традиционного решения группы 2-ТВУ(+ $TF_{2=}$ ), при непосредственном участии соискателя *разработано новое ТВУ*, характеризуемое тем, что взамен трансфильтра в цепи постоянного тока предложено использовать 3 трансфильтра в цепи переменного тока. *Решение запатентовано*. Высокая эффективность нового ТВУ подтверждена имитационным компьютерным моделированием (ИКМ) и последующим натурным моделированием. В рамках используемой терминологии новое решение обозначено как 2- ТВУ (+ $3TF_{2\approx}$ ).
- 8. Найденный эффективный принцип синтеза был распространен на ТВУ многоканального типа с большей пульсностью  $m_{I\ni}$  =18 (обозначение: 3-ТВУ(+3ТF<sub>3≈</sub>)) и  $m_{I\ni}$  =24 (обозначение: 4-ТВУ(+3ТF<sub>2≈</sub>+3ТF<sub>2≈</sub>)). Эти два решения (с модификациями) также запатентованы. Их целесообразно использовать при больших мощностях преобразования в десятки и сотни кВт соответственно.
- 9. На основе ИКМ и теоретических исследований *разработано модельное описание нового 2-ТВУ(+3ТF*<sub>2≈</sub>), создающее основу для проведения процедуры параметрической его оптимизации. В частности, показано, что суммарная габаритная мощность трансформаторных узлов в предложенном решении 2-ТВУ(+3 $TF_{2\approx}$ ) не превышает суммарной габаритной мощности прототипа 2-  $TBY(+TF_{2=})$ .
  - 10. Завершающим этапом работы является практическая реализация по-

лученных в проведенном исследовании результатов. Содержание работы здесь может быть охарактеризовано как конструкторско-технологическая оптимизация новой разработки. Достаточно высокие показатели качества реализованного ТВУ - его КПД  $\eta_{msy} \approx 0.85$  и удельная масса, равная примерно  $g_{msy} \approx 1 \ \kappa z/\kappa Bm$ , достигнуты за счет совокупности новых конструкторско-технологических решений и находятся на уровне лучших зарубежных достижений.

11. Научно-технический и конструкторский опыт, приобретенный в конкретной области (авиационной электротехники) при решении частной задачи модернизации ТВУ, может быть использован при разработке и модернизации не только ТВУ, но и других классов устройств силовой электроники (например, инверторов), причем не только в рассматриваемой области, но и в других областях, включая области общепромышленного применения.

## Основное содержание диссертации опубликовано в следующих публикациях:

- 1. Войтович И.А., Коняхин С.Ф., Цишевский В.А. Современные статические преобразователи шкалы "Б" // Практическая силовая электроника. -2005. №19. С. 33 37.
- 2. Войтович И.А., Коняхин С.Ф., Цишевский В.А. Статические преобразователи систем электроснабжения летательных аппаратов // Силовая интеллектуальная электроника. 2005. №1. С. 31 34.
- 3. Коняхин С.Ф., Мыцык Г.С. // Влияние уровня развития элементной базы на схемотехнику бортовых статических преобразователей напряжения // "Радиотехника, электротехника и энергетика": Тез. докл. Х1 Международной научн.-техн. конф. студентов и аспирантов 2-3 марта 2005 г. в Москве. М.: Моск. энерг. ин.-т, 2005. Том 2. С. 87 88.
- 4. Коняхин С.Ф. Электролитические конденсаторы для преобразовательной техники // Практическая силовая электроника. 2005. №19. С. 47 51.
- 5. Коняхин С.Ф., Михеев В.В., Мыцык Г.С., Цишевский В.А. О новой возможности улучшения технических показателей трансформаторновыпрямительных устройств с улучшенной электромагнитной совместимостью // Электрическое питание. Специальный выпуск (Системы и источники вторичного электропитания и элементная база для них): Сб. докл. научн.-техн. конф. в Санкт-Петербурге, 2005г.: Санкт-Петербург, 2005. С. 45 58.
- 6. Коняхин С.Ф., Сенцов А.А., Мыцык Г.С. Трансформаторновыпрямительное устройство с двухканальным преобразующим трактом и улучшенными характеристиками // "Радиотехника, электротехника и энергетика": Тез. докл. X1 Международной научн.-техн. конф. студентов и аспирантов 2-3 марта 2005 г. Москва: Моск. энерг. ин.-т, 2005. Том 2. С. 88 89.

- 7. Пунгин Н.А., Коняхин С.Ф., Цветков А.Н. // Оптимальный теплоотвод от силовых элементов источника питания // Электрическое питание, 2006, №1. С. 79 81.
- 8. Коняхин С.Ф., Мыцык Г.С., Цишевский В.А. О влиянии соотношения входного и выходного активных сопротивлений на режим работы многофазных выпрямительных схем // Электрическое питание. Специальный выпуск: Сб. докл. 11 научн.-техн. конф. по источникам вторичного электропитания и элементной базе для них в Санкт-Петербурге. Санкт-Петербург, 2006. С. 10 22.
- 9. Трехфазное трансформаторно-выпрямительное устройство с двух-канальным преобразованием (варианты): Патент на изобретение №2280311 РФ / С.Ф.Коняхин, В.В.Михеев, Г.С.Мыцык, В.А.Цишевский. 2004134707/22; Заявл. 30.11.04; Опубл. 20.07.06. Бюл.№20. 12с.
- 10. Трехфазное трансформаторно-выпрямительное устройство с двух-канальным преобразованием: Патент на полезную модель №44900 РФ / С.Ф. Коняхин, В.В.Михеев, Г.С.Мыцык, В.А.Цишевский. 2004137984/22; Заявл. 27.12.04; Опубл. 27.03.05. Бюл. № 9. 4 с.
- 11. Устройство для выпрямления трехфазного напряжения с четырех-канальным преобразованием энергетического потока: Патент на изобретение №2282298 РФ / С.Ф. Коняхин, В.В.Михеев, Г.С.Мыцык, В.А.Цишевский. 2005106695/09; Заявл. 14.03.05; Опубл. 20.08.06. Бюл. №23. 12 с.
- 12. Устройство для выпрямления трехфазного напряжения с трехканальным преобразованием энергетического потока (варианты): Патент на изобретение №2282311 РФ / С.Ф. Коняхин, В.В.Михеев, Г.С.Мыцык, В.А. Цишевский. 20005106713/09; Заявл. 15.04.05; опубл. 30.09.06. Бюл. №.24. 13 с.
- 13. Коняхин С. Ф. "Элементная база перспективных бортовых систем генерирования электроэнергии" / Электроника и электрооборудование транспорта, № 5, 2008.
- 14. Коняхин С. Ф., Мыцык Г. С., Цишевский В. А "Удвоение пульсности выпрямленного напряжения в мостовой схеме выпрямления" / Вестник МЭИ, № 4, 2007.