

Трансформаторный импульсный преобразователь

для авиакосмической силовой электроники

В статье описано нетрадиционное схемотехническое решение для трансформаторного импульсного преобразователя, входящего в состав электроэнергетических комплексов космических летательных аппаратов и авиабортовых резервно-аккумуляторных источников бесперебойного питания. Решение демонстрирует высокие показатели надежности, массо-энергетической и технологической эффективности и качества электропитания (включая малые помехоизлучения) преобразователя, а также его пригодность в качестве унифицированного модуля при реализации модульно-масштабируемой архитектуры.

Станислав Резников, д. т. н.
Игорь Харченко, к. т. н.
Андрей Сулаков, к. т. н.
Николай Жегов
Кирилл Храмцов

Введение

Отличительной особенностью электроэнергетических комплексов (ЭЭК) космических летательных аппаратов (КЛА) является отсутствие электромашинных генераторов и использование в качестве первичных источников электропитания относительно низковольтных солнечных, химических и/или суперконденсаторных (ионисторных) батарей. При этом для большого числа бортовых потребителей электроэнергии КЛА наиболее предпочтительными являются:

- повышенное переменное трехфазное напряжение стабильной частоты (например 400 или 1000 Гц);
- дифференциальные повышенные постоянные напряжения (например, ППН (0 ± 135) или (0 ± 270) В).

Первый вид питающего напряжения удобен благодаря простоте, надежности и массо-энергетической эффективности трансформации (для согласования и гальванической развязки), бездуговой коммутации и питанию нерегулируемых приводных асинхронных двигателей (гироскопических, насосных и др.). Второй вид напряжения (ППН) позволяет просто и надежно осуществлять параллельное включение нескольких каналов ЭЭК для повышения динамической устойчивости и качества электроэнергии, а также удобен для непосредственного питания регулируемых инверторов синусоидальных напряжений и токов (РИСН/Т), в частности полумостовых трехфазных, с заземленной нейтралью.

Из вышесказанного следует необходимость использования в ЭЭК КЛА вторичных источников электропитания (ВИЭП) с возможностью обратимых (двунаправленных) преобразований:

- постоянного низкого напряжения (ПНН) и дифференциальных повышенных напряжений (ППН), например ± 27 и (0 ± 135) В ((0 ± 270) В);
- ПНН в трехфазное переменное со стабильными или регулируемыми параметрами ($f, U = \text{const}$ или $f, U = \text{var}$);

- дифференциальных ППН в трехфазное переменное (с указанными в предыдущем пункте параметрами).

Аналогичные функции должны иметь также авиабортовые резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания (Р/А ИБП), входящие в состав ЭЭК с электромашинными генераторами (в частности, стартер-генераторами) в качестве первичных источников по числу маршевых и вспомогательной топливных силовых установок.

Разработка указанного ВИЭП наиболее целесообразна с использованием промежуточного звена высокой частоты (ЗВЧ) на базе согласующего и гальванически развязывающего многообмоточного трансформатора прямоугольного тока (ТПТ) с подключенными к нему двунаправленными инверторно-выпрямительными импульсными мостовыми коммутаторами (ИМК_{1,2}) и циклоконвертера (ЦК) — реверсивного выпрямителя.

Авторами предлагается нетрадиционное схемотехническое решение для указанного ВИЭП, защищенное приоритетом РФ и частично (фрагментарно) опубликованное в [1–3]. Основным достоинством предлагаемого решения, помимо многофункциональности (обратимой взаимосвязи трех внешних электроэнергетических каналов), является использование «трансформатора прямоугольного тока» в отличие от распространенного «трансформатора прямоугольного напряжения», требующего специальных дополнительных антинасыщающих симметрирующих устройств для быстродействующего выравнивания вольт-секундных параметров (интегралов) разнополярных прямоугольных питающих импульсов.

Вторым существенным достоинством решения является совмещение двухтактного трансформаторного и одноконтурного трансреакторного (прямо- и обратного) преобразования, обеспечивающего повышение КПД и удельной мощности ВИЭП. Помимо указанного, схема обеспечивает «мягкую» коммутацию модуляторных ключей (при нулевых токах или

напряжениях), снижающую коммутационные тепловые потери и помехоизлучения.

Силовая схема ВИЭП на базе трансформаторного импульсного преобразователя

Силовая схема двухтактного трансформаторного импульсного преобразователя (ТИП) в качестве ВИЭП в составе ЭЭК КЛА приведена на рисунке 1. Она содержит: низковольтный и высоковольтный импульсно-модуляторные коммутаторы (ИМК₁ и ИМК₂); трансформатор прямоугольного тока (ТПТ) с первичной (N₁), вторичной (N₂) и тремя фазными обмотками (N_{3A}, N_{3B}, N_{3C}); балластный двухобмоточный трансреактор (L_{Б1-2}); шины дифференциального звена постоянных повышенных напряжений (ДЗППН); трехфазный симисторный циклоконвертер (ЦК); однотипные по схемам стабилизатор напряжений (УДН), импульсный регулятор тока рекуперативного торможения (ИРТ_{РТ}); аккумуляторную батарею (АБ) с размыкающим контактором (K_{АБ}); стабилизатор напряжения U_{СБ} (СтU_{СБ}). В состав ЭЭК входят: исполнительный электродвигатель с рекуперативным торможением (ИЭД-РТ); распределительное устройство со стабильными частотой и амплитудой трехфазных напряжений (РУ f-const, U-const); контакторы (K_{РУ} и K_{ИЭД}); трехфазный индуктивно-емкостный фильтр низкой частоты (L_Ф-C_Ф).

Работа ИМК_{1,2}

В режиме прямого преобразования (от U_{АБ} к 0±U_d) первый коммутатор работает как вы-

соочастотный двухтактный инвертор прямоугольного тока (ИПТ), а второй — как диодный выпрямитель с дифференциальными выпрямленными напряжениями. При этом, в зависимости от соотношения напряжений на фильтровом конденсаторе C_{Ф1}(U_{АБ}) и суммарного напряжения на L_{Б1} и секции обмотки N₁ ТПТ (т. е. приведенного к ним через коэффициенты трансформации выпрямленного напряжения U_d), следует различать два возможных случая: «понижающая» и «повышающая» модуляция.

При «понижающей» модуляции ключи VT₁ и VT₂ включаются поочередно на время управляющего импульса t_и = γ_и T_{шмм}/2, где γ_и и T_{шмм} — регулируемая относительная длительность (коэффициент заполнения) импульса и постоянный период двухтактной широтно-импульсной модуляции.

При включении, например, ключа VT₁ полные потокосцепления L_{Б1-2} и ТПТ нарастают (dΨ/dt > 0) вместе с токами в цепях: C_{Ф1}-L_{Б1}-N₁'-VT₁-L_{Д1}-C_{Ф1} и N₂"-VD₄-C_{Ф2}-C_{Ф3}-L_{Д2}- (обратный диод VT₃)-N₂'-N₂" и L_{Б2}-C_{Ф3}-L_{Д2}- (обратный диод VT₃)-N₂'-L_{Б2} («прямоходовая» трансформация ЭДС L_{Б2}). После выключения ключа VT₁ и включения шунтирующего ключа VT_{Ш2} (через промежуток времени импульса t_и = γ_и T_{шмм}/2) указанные полные потокосцепления приблизительно сохраняются (dΨ/dt ≈ 0) вместе с токами в цепях: L_{Б1}-N₁"-VD₁-C_Б-L_{Б1} и L_{Б2}-N₂"-VD_{Ш3-4}-VT_{Ш2}-L_{Б2} (токозамыкающая пауза для повышения КПД передачи энергий индуктивностей рассеяния L_{Б1} и N₁' в буферный конденсатор C_Б для дальнейшей рекуперации в C_{Ф1} в течение длительности паузы Δt_п = γ_п T_{шмм}/2; N₂'-VD₃-C_{Ф2}-C_{Ф3}- (обратный

диод VT₄)-N₂"-N₂' и L_{Б2}-N₂'-VD₃-C_{Ф3}-L_{Б2} («обратноходовая» трансформация ЭДС в L_{Б2} в течение интервала времени T_{шмм}/2-Δt_п-t_и = (1-γ_и-γ_п) T_{шмм}/2). Затем на следующем полупериоде T_{шмм}/2 происходят аналогичные процессы, но с участием ключа VT₂ (второй такт питания ТПТ). Далее указанные процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются, осуществляя прямое преобразование с «понижающей» модуляцией.

При «повышающей» модуляции на первом полупериоде 0 ≤ t ≤ 0,5T_{шмм} сначала синхронно включаются оба ключа VT₁ и VT₂, что приводит к нарастанию в течение интервала t_и = γ_и T_{шмм}/2 полного потокосцепления L_{Б1-2} (dΨ/dt > 0) вместе с токами в цепях C_{Ф1}-L_{Б1}-(N₁'-VT₁)/(N₁"-VT₂)-L_{Д1}-C_{Ф1} (без потокосцепления ТПТ) и L_{Б2}-C_{Ф3}-L_{Д2}- (обратный диод VT₃)-N₂"//((обратный диод VT₄)-N₂"-L_{Б2}) («прямоходовая» трансформация ЭДС L_{Б2}). Затем одновременно выключается один из ключей VT₁ или VT₂ и включается шунтирующий ключ VT_{Ш2}, что приводит к передаче с высоким КПД основной части электромагнитной энергии из L_{Б1} в L_{Б2} с короткозамкнутым током в соответствующей цепи L_{Б2}-N₂"-VD_{Ш3-4}-VT_{Ш2}-L_{Б2} или L_{Б2}-N₂"-VD_{Ш3-4}-VT_{Ш2}-L_{Б2} в течение длительности паузы Δt_п = γ_п 0,5T_{шмм}. Затем ключ VT_{Ш2} выключается, и полные потокосцепления L_{Б1-2} и ТПТ частично (или полностью) спадают (dΨ/dt < 0) вместе с током в соответствующей цепи L_{Б2}-N₂'-VD₃-C_{Ф2}-L_{Б2} или L_{Б2}-N₂"-VD₄-C_{Ф2}-L_{Б2} («обратноходовая» трансформация ЭДС в L_{Б2}).

«Мягкая» коммутация модуляторных ключей ИМК_{1,2} (VT₁₋₄) обеспечивается с помощью не-

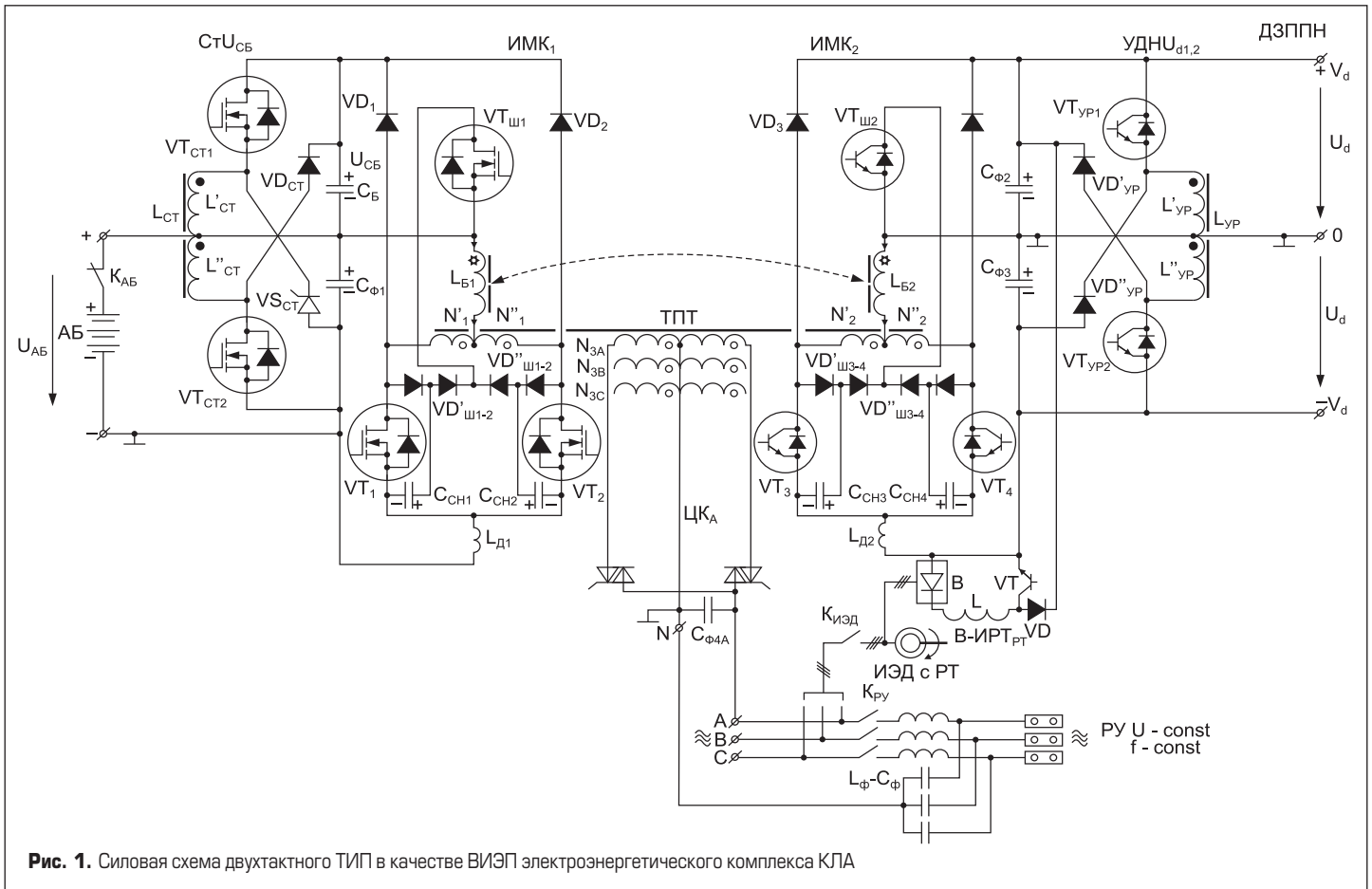


Рис. 1. Силовая схема двухтактного ТИП в качестве ВИЭП электроэнергетического комплекса КЛА

рассеивающих (тепла) демпферно-снабберных цепочек, состоящих из демпферных дросселей ($L_{д1,2}$), снабберных конденсаторов ($C_{СН1-4}$) и шунтирующих зарядно-разрядных двухдиодных стоек ($VD'_{ш1-2}, VD''_{ш1-2}, VD'_{ш3-4}, VD''_{ш3-4}$). Снабберные конденсаторы разряжаются через шунтирующие ключи ($VT_{ш1,2}$) на трансреактор ($L_{Б1,2}$) и ТПТ, передавая им накопленную энергию коммутации для дальнейшего ее использования в нагрузке. Этим обеспечивается снижение коммутационных тепловых потерь и помехоизлучений.

При работе ИМК_{1,2} в прямом и обратном направлениях преобразования в трех двухсекционных обмотках ТПТ (N_{3A}, N_{3B}, N_{3C}) формируются прямоугольные высокочастотные переменные токи, замыкаемые через соответствующие циклоконвертеры ($ЦК_{A, B, C}$) и выходные фильтровые конденсаторы ($C_{СНА, B, C}$) и образующие на выводах А, В, С и N трехфазную систему квазисинусоидальных переменных напряжений ($U_{A, B, C}$ с заземленной нейтралью (N)).

Состав и работа блоков $СтУс_Б$ и УДН $U_{д1,2}$

Указанные блоки почти однотипны по схеме (за исключением замены диодов на тиристоры) и представляют собой двунаправленные «транспортёры заряда» на базе полярно-инвертирующих обратимых импульсных конвертеров (ОИК). К основным достоинствам используемой схемы ОИК с двухсекционным балластным реактором (L_{CT} и L_{Yp}), помимо обратимости (двунаправленности) «транспортирования заряда», относятся:

- безынерционность переключения направлений тока благодаря отсутствию реверса полного потокосцепления реактора, обеспечивающая высокое качество переходных процессов в замкнутом контуре системы регулирования (стабилизации);
- исключение цепей для «сквозных сверхтоков» при несанкционированных включениях ключей (например, из-за воздействия электромагнитных импульсов молний на усилительно-формирующие драйверы);
- высокие КПД и удельная мощность благодаря использованию прямо- и обратнородовой трансформации тока;
- малые коммутационные тепловые потери и помехоизлучения благодаря «мягкой» коммутации ключей.

Пусть, например, требуется увеличить напряжение (или произвести начальную зарядку) буферного конденсатора $C_Б$ в ИМК₁. Тогда производится широтно-импульсно модулируемое высокочастотное управление ключом VT_{CT2} . При его очередном включении полное потокосцепление реактора L_{CT} нарастает вместе с токами в цепях $C_{Ф1}-L_{CT}-VT_{CT2}-C_{Ф1}$ и L_{CT}' (обратный диод VT_{CT1})- $C_Б-L_{CT}'$ («прямоходовая» трансформация тока). При последующем выключении VT_{CT2} указанное потокосцепление частично (или полностью) спадает вместе с токами в цепи $L_{CT}-VD_{CT}-C_Б-L_{CT}'$ («обратнородовая» трансформация тока). Далее указанные процессы высокочастотно-периодически качественно повторяются, заряжая $C_Б$ до требуемого напряжения.

Если требуется рекуперировать часть электроэнергии из буферного конденсатора $C_Б$ в аккумуляторную батарею, то воспроизводятся аналогичные процессы, но с модуляцией ключа VT_{CT1} и включениями вентиля VS_{CT} при выключениях VT_{CT1} .

В схеме УДН $U_{д1,2}$ вместо тиристора VS_{CT} применен диод (VD''_{Yp}), благодаря чему для автоматического самовыравнивания напряжений на фильтровых конденсаторах $C_{Ф2}$ и $C_{Ф3}$ ДЗППН достаточно с постоянной высокой частотой одновременно (синхронно) коммутировать оба ключа (VT_{Yp1} и VT_{Yp2}). При очередном таком включении полное потокосцепление реактора L_{Yp} нарастает с током в цепи $C_{Ф2}-VT_{Yp1}-L_{Yp}-VT_{Yp2}-C_{Ф3}-C_{Ф2}$. При этом благодаря идентичности секций L_{Yp} при нарушении равновесия напряжений $U_{д1} \neq U_{д2}$, возникает разбаланс нарастающих токов в цепях $C_{Ф2}-VT_{Yp1}-L'_{Yp}-C_{Ф2}$ и $C_{Ф3}-L''_{Yp}-VT_{Yp1}-C_{Ф3}$, стремящийся нивелировать разность $U_{д1}$ и $U_{д2}$. После их выключения, благодаря идентичности секций L_{Yp} и практически единичному коэффициенту электромагнитной связи (при намотке секций в два провода), происходит автоматическое перераспределение токов секций по цепям $L'_{Yp}-C_{Ф3}-VD''_{Yp}-L'_{Yp}$ и $L''_{Yp}-VD'_{Yp}-C_{Ф2}-L''_{Yp}$ с тем же вышеуказанным стремлением к самовыравниванию напряжений.

Через некоторое число таких циклов наступит практическое равновесие напряжений $U_{д1}$ и $U_{д2}$, после чего схема будет работать с квазистановившейся внутренней реактивной мощностью (в режиме квазистановившихся колебаний). Время переходного процесса самовыравнивания напряжений $U_{д1}$ и $U_{д2}$ определяется (при постоянной частоте коммутаций) начальным возмущением (разностью $|U_{д1}-U_{д2}|$), а также величинами и разбалансом активных нагрузок в плечах ДЗППН.

Цепь питания исполнительного электродвигателя с рекуперативным торможением

Питание исполнительного электродвигателя с рекуперативным торможением (ИЭД_{РТ}) осуществляется с помощью трех пар двухсторонних реверсивных выпрямителей, составляющих трехфазный ЦК. Каждый выпрямитель преобразует высокочастотный прямоугольный ток, трансформируемый в соответствующей фазной обмотке ($N_{A, B, C}$) ТПТ, в знакопеременное низкочастотное прямоугольное напряжение на выходном фильтровом конденсаторе ($C_{Ф4}$), которое формирует на соответствующем фазном выходе трехфазного низкочастотного Г-образного фильтра ($L_{Ф}-C_{Ф}$) фазное синусоидальное напряжение. Если замкнут контактор $K_{ИЭД}$, то это напряжение регулируется по частоте и амплитуде (последняя регулируется за счет управляемых пауз между импульсами выпрямленных напряжений) с целью управления электромагнитным моментом и скоростью вращения вала ИЭД. Для осуществления рекуперативного торможения ИЭД с помощью ЦК он вводится в режим генератора (синхронного или асинхронного), питающего мостовой

выпрямитель (В), а от его выхода — через повышающий импульсный регулятор тока (ИРТ) ДЗППН.

Примененный в схеме способ позволяет обеспечить рекуперативное торможение в широком скоростном диапазоне (вплоть до остановки). Если при торможении отсутствует (или мала по мощности) нагрузка ДЗППН, то энергия торможения с помощью ИМК₁ и ИМК₂ перекачивается в АБ.

Заключение

Предложенное нетрадиционное схемотехническое решение для трансформаторного импульсного преобразователя, входящего в состав электроэнергетических комплексов КЛА и авиаобортовых резервно-аккумуляторных ИБП, обеспечивает высокую надежность, массо-энергетическую и технологическую эффективность и высокое качество электроэнергии (включая малые помехоизлучения) преобразователя благодаря его многофункциональности (обратимой взаимосвязи трех внешних электроэнергетических каналов), трансформаторной гальванической развязке и согласованию по напряжениям каналов, высокому КПД за счет трансформаторного и трансреакторного преобразования, исключению цепей для «сквозных сверхтоков», защите от коммутационных перенапряжений и «мягкой» коммутации модуляторных ключей.

Схема представляется пригодной для использования в качестве унифицированного модуля многофункционального импульсного преобразователя при реализации электроэнергетических комплексов с модульно масштабируемой архитектурой (с гибким наращиванием мощности), обеспечивающей высокую эффективность в производственной, монтажной и эксплуатационной областях. Решение защищено приоритетом РФ и представляет интерес для широкого круга специалистов в авиакосмической силовой электронике и автономно-транспортных системах электроснабжения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках гранта Президента РФ № МК-8036.2016.5.

Литература

1. С. Резников, С. Климова, И. Харченко, В. Смирнов, В. Савостьянов. Резервно-аккумуляторные источники бесперебойного питания для автономных и сетевых систем электроснабжения со звеном постоянного повышенного напряжения // Силовая электроника. 2016. № 2.
2. Пат. на полезную модель № 145994 (РФ). Трансформаторный инвертор / С. Б. Резников, В. В. Бочаров, А. В. Лавринович, А. Б. Корнилов, Н. П. Черкашина // Бюлл. № 27 от 27.09.2014.
3. Резников С. Б., Бочаров В. В., Харченко И. А. Электромагнитная и электроэнергетическая совместимость систем электроснабжения и вторичных источников питания полностью электрифицированных самолетов. М.: Изд-во МАИ. 2014.