

МНОГОФАЗНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДЛЯ ПИТАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ПРОТИВООБЛЕДЕНИТЕЛЬНЫХ ВИБРАТОРОВ

Резников С.Б.^{1*}, Аверин С.В.^{1**}, Харченко И.А.^{2***},
Третьяк В.И.^{3****}, Коняхин С.Ф.^{3****}

¹ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия

² Центральный научно-исследовательский испытательный институт инженерных войск
Министерства обороны Российской Федерации,
«ЦНИИИ ИВ» МО РФ, Нахабино-2, Московская обл., 143432, Россия

³ Аэроэлектромаш,
ул. Б. Новодмитровская, 12, Москва, 127015, Россия

* e-mail: rez41@mail.ru

** e-mail: a_cb@mail.ru

*** e-mail: ihar@mail333.com

**** e-mail: aeroel@mail.ru

Рассматривается новое схемотехническое решение для реализации авиационно-бортовых и аэродромных электроимпульсных противообледенительных систем с высокими показателями надежности, электроэнергоэкономичности, монтажной технологичности и электромагнитной совместимости. Схемотехническое решение защищено приоритетом РФ. Работа представляет интерес для широкого круга специалистов в области конструирования электрооборудования летательных аппаратов, а также противообледенительного оборудования судов и наземно-стационарных объектов, например северных аэродромных радиолокационных и светосигнальных комплексов.

Ключевые слова: вторичный источник импульсного электропитания (ВИИЭП), противообледенительная система, обратимый импульсный конвертор, демпферно-снабберная нерассеивающая цепочка, электромеханический импульсный вибратор.

Введение. Существующие системы и постановка задач

Противообледенительные (антиобледенительные) системы (ПОС) являются важнейшим средством обеспечения безопасности полетов и нормального функционирования агрегатов летательных аппаратов (ЛА) [1–4]. Они играют существенную роль в обеспечении нормального функционирования оборудования и агрегатов судов и многих наземно-стационарных комплексов: аэродромных радиолокационных и светосигнальных, высоковольтно-энергетических, ветроэнергетических, антенно-фидерных, газотрубопроводных и др. (особенно — наружных, применяемых в зимних условиях или в северных областях).

Электроимпульсная ПОС (ЭИ ПОС) является разновидностью механических ПОС (альтернативной для пневматических и вибропневматических ПОС, существенно увеличивающих аэродинамическое сопротивление ЛА). ЭИ ПОС, разработанная советским инженером И.А. Левиным, впервые по-

явилась в качестве штатной системы на самолете Ил-86 [1–3]. Её действие заключается в создании в защищаемой обшивке повторяющихся импульсных (с длительностью 10^{-4} с) деформаций, разделенных паузами (длительностью 1...2 с). Возникающие при этом в элементах конструкции механические напряжения меньше предела усталости или предела циклической прочности материала, но достаточны для разрушения (скалывания) льда.

В настоящее время в авиации используется ЭИ ПОС, основанная на бесконтактном дистанционном воздействии на обшивку посредством электромагнитного индуцирования в ней вихревых импульсных токов с помощью электромагнитных индукторов — ЭМИ (катушек без подвижных сердечников), установленных вплотную или с некоторым зазором по отношению к обшивке. Вихревые токи, наводимые в участках поверхности обшивки (УПО) импульсными разрядными токами индукторных обмоток, взаимодействуют с магнитными полями последних и вызывают импульсные вибрации об-

шивки и скалывание ледяной пленки, уносимой затем воздушным потоком.

При изготовлении защищаемого участка агрегата ЛА из композиционных материалов (вместо металлических) на внутреннюю сторону обшивки в месте установки индуктора наклеивается электропроводный слой — так называемый «дублёр» из алюминиевой фольги [3].

Основным *преимуществом* ЭИ ПОС является малое потребление энергии — в десятки и даже сотни раз меньшее по сравнению с системами других типов.

К *общим недостаткам* этих систем относятся: низкая технологичность монтажа из-за большого количества индукторов, поскольку область их действия ограничена стыками обшивки и элементами силового набора агрегата; наличие остаточных льдообразований при относительно большой зоне улавливания (воздействия); необходимость повышения мощности импульса по мере возрастания жесткости конструкции (например на легких и средних самолётах); сложность и низкая надёжность конструкции применительно к композиционным материалам (в частности — отрыв «дублёров») [1–3].

Частично указанные недостатки компенсируются при использовании электромеханических вибраторов с введением в область индукторных обмоток подвижного и неподвижного магнитопроводящих сердечников [4]. При этом подвижный сердечник может быть приклеен или приклёпан к поверхности обшивки или, имея ударный выступ, закреплён на пружине вблизи индукторной обмотки (наподобие конструкции бытового электровозонка). Но в таком варианте происходит усиление акустических возмущений (звуковых помех).

К указанным общим недостаткам существующих ЭИ ПОС следует отнести и некоторые специфические принципиально устранимые недостатки:

- большая энергоёмкость ($W_n = \frac{C_n \cdot U^2}{2}$) нако-

пительного конденсатора, а следовательно — большие его масса и габариты, пропорционально зависящие от требуемой мощности импульсного тока и среднециклической потребляемой мощности ($P_{ср.ц} = W_n / T_{цикла}$);

- большая установочная масса низкочастотного трансформатора тока, существенно увеличивающая взлётную (стартовую) массу ЛА;

- большие возмущающие импульсные воздействия на качество питающей электроэнергии (из-за периодических низкочастотных закорачиваний выхода вторичного источника импульсного электропитания на разряженный накопитель);

- высокий уровень импульсных помехоизлучений типа dU/dt и dI/dt из-за многочисленных и протяжённых цепей разрядки высоковольтных накопителей;

- высокая требуемая электрическая прочность изоляции кабелей, вызывающая либо снижение функциональной надёжности, либо повышение установочной массы кабелей;

- низкая технологичность монтажа системы, требующей экранирования многочисленных высоковольтных кабелей с относительно малым сечением жил (для снижения массы).

Для полного или хотя бы частичного устранения всех вышеперечисленных недостатков представляется необходимым разработка новых принципов и схемотехнических решений для реализации ЭИ ПОС, попытке которой и посвящена настоящая статья.

Новые принципы построения и функционирования электромеханических вибраторов

Как указано во введении, рациональным известным способом отказа от индукционно-вихревого взаимодействия между индукторной катушкой вибратора и обшивкой является использование пары неподвижного и подвижного сердечников, второй из которых закреплён на пружине и снабжён ударным выступом для соударений с обшивкой (в том числе и с низкой электропроводимостью — композитной через металлические «дублёры»).

При этом представляется целесообразным, во-первых, использовать парные конструкции вибраторов (с синхронным или противофазным действием), а во-вторых, использовать пружинно-спусковые вибраторы (П/СВ), осуществляющие периодическое относительно плавное отклонение ударного выступа при медленно нарастающей деформации пружины с последующим резким высвобождением пружины от деформирующих сил, соответствующим ускоренным разгоном выступа и, как следствие, большим по величине отрицательным ускорением выступа при ударе. Ток в каждой индукторной обмотке вибраторов должен иметь пилообразную периодическую форму с длительным (пологим) фронтом нарастания и резким (крутым) спадом до нуля, с соответствующими горизонтальными участками (паузами) после нарастания и после спада. Учитывая нелинейные зависимости сил притяжения сердечников от величин тока в обмотке и зазора в цепи магнитопроводов, а также линейную зависимость сил упругости пружины от величины её деформации (по закону Гука), можно констатировать, что оптимальная по КПД форма нараста-

ния тока в индукторной обмотке может сильно отличаться от прямолинейной и требует специального расчёта с учётом конкретной конструкции вибратора и параметров его элементов. По мере уменьшения зазора между сердечниками требуемый для их притяжения ток индуктора может быть существенно уменьшен (с целью снижения тепловых потерь и ускорения процесса спада) или, по меньшей мере, стать практически постоянным I_{max} с момента окончания интервала времени фронта t_{ϕ} в течение длительности паузы $t_{п}$, как показано на рис. 1. По окончании паузы необходимо резко (кратковременно, в течение времени спада $t_{сп}$, рис. 1) обнулить ток индуктора и тем самым высвободить пружину вибратора из под сжимающих сил, что приведёт к её ускоренному растяжению и к удару выступа по фрагменту обшивки, вызывающему скалывание льда.

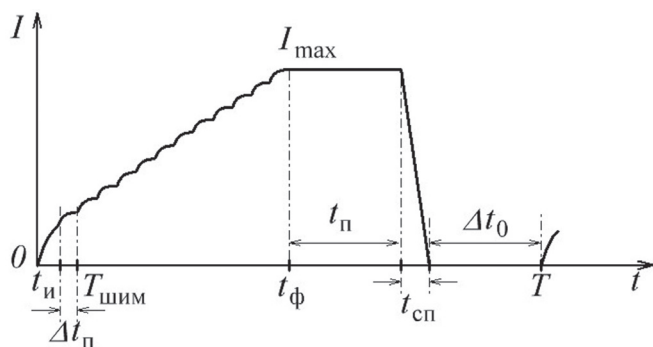


Рис. 1. Типовая временная диаграмма выходного тока вторичного источника импульсного электропитания

Из вышесказанного следуют три обстоятельства: 1) плавное нарастание тока в индукторе, позволяющее, используя широтно-импульсный транзисторный модулятор питающего постоянного напряжения любого уровня (от 27 В до 270 В и выше), уменьшить периодические возмущения качества питающей электроэнергии без применения энергоёмких электролитических емкостных накопителей и связанные с их разрядкой мощные электромагнитные помехоизлучения, а также высоковольтные пробои изоляции; 2) необходимость обеспечения относительно резкого (крутого) спада тока индуктора, вызывающего на его выводах повышенную импульсную ЭДС самоиндукции ($-L \cdot \frac{dI}{dt}$), требующую также учёта при выборе изоляции подводящих проводов; это обстоятельство определяет следующее направление поиска рационального схемотехнического решения при реализации ЭИ ПОС ЛА: желательное пространственное приближение вторичных источников импульсного электропитания к электромеханическим импульсным вибраторам и соответствующее группирование последних (по меньшей мере — попарное); 3) необходимость обеспечения сдвига (многофазное исполнение) между накопительными циклами расщеплённых ВИИЭП.

Вторичный источник импульсного электропитания для противообледенительных вибраторов

На рис. 2 приведена силовая схема ВИИЭП для противообледенительных вибраторов с первичным

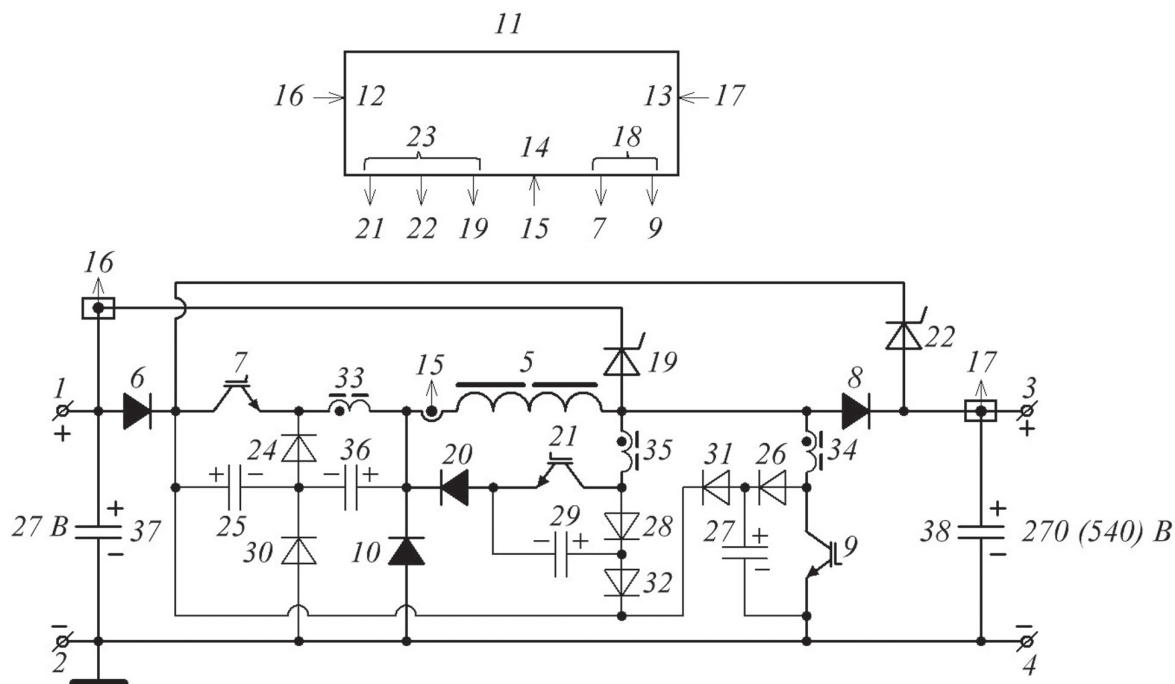


Рис. 2. Силовая схема вторичного источника импульсного электропитания для противообледенительных вибраторов

питанием от низковольтной сети постоянного тока (27 В). Схема представляет собой обратимый (двунаправленный) понижающе-повышающий импульсный конвертор (ОИК) с реакторным накопителем (индуктивной катушкой 5) и демпферно-снабберными нерассеивающими цепочками для «мягкой» коммутации модуляторных ключей 7, 9, 21, что выгодно отличает его от приведённых в аналоге и прототипе [6, 7].

К входным выводам 1-2 подключают низковольтную сеть постоянного напряжения (27 В) с резервной аккумуляторной батареей. К выходным выводам 3-4 можно подключить сеть повышенного постоянного напряжения (270 или 540 В). При достаточной энергоёмкости выходного емкостного накопителя 38 выводы 3-4 могут оставаться не подключёнными к сети, так как конвертор способен зарядить накопитель 38 до требуемого напряжения и постоянно его поддерживать.

Функциональной задачей устройства в рассматриваемом примере является низкочастотно-периодическое относительно плавное регулируемое наращивание тока I (потокосцепления $\Psi = L_5 \cdot I$) в реакторном накопителе 5 (на интервале от 0 до t_{ϕ} , рис. 1) с последующим (через интервал t_{π} , рис. 1) относительно резким его обнулением с возвратом (рекуперацией) накопленной электромагнитной

энергии $\left(L_5 \cdot \frac{I_m^2}{2} \right)$ в источник электропитания и/

или во входной емкостный накопитель 37 (на интервале $t_{\text{сп}}$, рис. 1). Регулирование тока (линейное нарастание) производится блоком управления 11 с помощью эталонного сигнала, цепей обратных связей 12, 13, 14 и широтно-импульсной модуляции высокочастотных импульсов управления с постоянным периодом $T_{\text{шим}}$, формируемых на его основных и дополнительном импульсно-модуляторных выходных выводах 18, 19 и 23.

На каждом произвольном периоде $T_{\text{шим}}$ в процессе наращивания тока I последовательно чередуются три этапа (интервала): а) этап нарастания тока I ($dI/dt > 0$) с длительностью управляющего импульса $t_{\text{и}} = \gamma_{\text{и}} T_{\text{шим}}$, где $\gamma_{\text{и}}$ — относительная длительность (коэффициент заполнения) импульса; б) этап приблизительного сохранения тока ($dI/dt \approx 0$) с длительностью токозамыкающей паузы $t_{\text{п}} = \gamma_{\text{п}} T_{\text{шим}}$, где $\gamma_{\text{п}}$ — относительная длительность паузы; в) этап частичного спадания тока ($dI/dt < 0$) с подзарядкой емкостного накопителя 38 в течение длительности

$$T_{\text{шим}} - t_{\text{и}} - \Delta t_{\text{п}} = (1 - \gamma_{\text{и}} - \gamma_{\text{п}}) T_{\text{шим}}$$

I. Процесс зарядки выходного емкостного накопителя 38

Если выходные выводы 3-4 не подключены к сети повышенного напряжения, то сначала заряжается выходной емкостный накопитель 38 до заданного напряжения (например 270 или 540 В). При этом в начале зарядки схема работает в режиме по-

нижения напряжения $\left(U_{1-2} > U_{3-4} = \frac{\gamma_{\text{и}}}{1 - \gamma_{\text{п}}} \cdot U_{1-2} \right)$:

а) на этапе $dI/dt > 0$ цепь нарастания тока:

37-6-7-33-5-8-38-37;

б) на этапе $dI/dt \approx 0$ цепь сохранения тока:

5-35-21-20-5;

в) на этапе $dI/dt < 0$ цепь частичного спадания тока:

5-8-38-10-5.

При близких значениях U_{1-2} и U_{3-4} схема работает в режиме дозирования энергии — понижающе-

повышающем $\left(U_{3-4} = \frac{\gamma_{\text{и}}}{1 - \gamma_{\text{и}} - \gamma_{\text{п}}} \cdot U_{1-2} \right)$:

а) на этапе $dI/dt > 0$ цепь нарастания тока:

37-6-7-33-5-34-9-37;

б) на этапе $dI/dt \approx 0$ цепь сохранения тока:

5-35-21-20-5;

в) на этапе $dI/dt < 0$ цепь частичного спадания тока:

5-8-38-10-5.

В течение основной стадии зарядки 38 схема работает в режиме повышения напряжения

$\left(U_{3-4} = \frac{1 - \gamma_{\text{п}}}{1 - \gamma_{\text{и}} - \gamma_{\text{п}}} \cdot U_{1-2} \right)$:

а) на этапе $dI/dt > 0$ цепь нарастания тока:

37-6-7-33-5-34-9-37;

б) на этапе $dI/dt \approx 0$ цепь сохранения тока:

5-35-21-20-5;

в) на этапе $dI/dt < 0$ цепь частичного спадания тока:

5-8-38-37-6-7-33-5.

II. Номинальный циклический режим

При напряжении U_{3-4} , достаточном для осуществления относительно резкого обнуления тока I

реакторного накопителя 5, устройство работает в номинальном циклическом режиме с периодом повторяющихся циклов:

$$T_{ц} = t_{фр} + t_{стаб} + t_{сп} + t_{рек},$$

где $t_{фр}$, $t_{стаб}$, $t_{сп}$ — интервалы фронта нарастания, стабилизации и спада тока I от максимального I_m до нуля; $t_{рек}$ — интервал рекуперации дозы энергии

$$L_5 \cdot \frac{I_m^2}{2} \text{ в источник и в } 37.$$

1. *Интервал фронта нарастания* тока I ($t_{фр}$):

а) на этапах $dI/dt > 0$ цепь нарастания тока:

$$37-6-7-33-5-34-9-37$$

в течение длительности импульса $t_{и} = \gamma_{и} T_{шим}$;

б) на этапах $dI/dt \approx 0$ цепь сохранения тока:

$$5-35-21-20-5$$

в течение длительности $T_{шим} - t_{и} = (1 - \gamma_{и}) T_{шим}$.

2. *Интервал стабилизации* тока I ($t_{стаб}$) качественно аналогичен первому (п. 1).

3. *Интервал резкого спада (обнуления)* тока I ($t_{сп}$) — цепь спадания тока:

$$5-8-38-10-5.$$

4. *Интервал регулируемой рекуперации дозы энергии*

$$L_5 \cdot \frac{I_m^2}{2} \text{ в источник и в } 37 \text{ } t_{рек}:$$

а) на этапах $dI/dt > 0$ цепь нарастания тока:

$$38-22-7-33-5-34-9-38;$$

б) на этапах $dI/dt \approx 0$ цепь сохранения тока:

$$5-35-21-20-5;$$

в) на этапах $dI/dt < 0$ цепь спадания тока:

$$5-19-37-10-5.$$

Во всех рассмотренных режимах и на всех этапах осуществляется «мягкая» коммутация электронных ключей (включение при нулевых токах и выключение при нулевых напряжениях) благодаря наличию демпферных дросселей и снабберных конденсаторов. Кроме того, исключён инверсно диодный «сверхток», протекающий при инерционном восстановлении электрической прочности запирающегося дополнительного диода 10 по цепи:

$$37-6-7-33-10-37.$$

При этом дополнительный снабберный конденсатор 36 заряжается по цепи:

$$33-36-24-33,$$

а затем разряжается через реакторный накопитель 5 по цепям:

$$36-5-8-38-30-36 \text{ и } 36-5-34-9-30-36.$$

Каждый из снабберных конденсаторов 25, 27 и 29 заряжается на этапе выключенного состояния шунтируемого им ключа, а разряжается на этапе его включённого состояния через реакторный накопитель 5 по одной из цепей с разрядными снабберными диодами:

$$25-7-33-5-34-9-30-25;$$

$$27-31-7-5-34-9-27;$$

$$29-32-7-33-5-35-21-29.$$

На интервале резкого обнуления тока реакторного накопителя 5 за время $t_{сп} \approx \frac{L \cdot I_m}{U_{3-4}}$ происходит

индуцирование вихревых токов в металлической поверхности фрагмента обшивки летательного аппарата, расположенного в зоне магнитного поля накопителя (индукторной катушки). В результате взаимодействия вихревых токов с магнитным полем катушки возникает силовой вибрационный импульс и скалывание льда, уносимого затем воздушным потоком. Далее все рассмотренные процессы циклически повторяются, обеспечивая противообледенительные вибрационные импульсы. При этом затраты электроэнергии источника питания относительно малы благодаря рекуперации доз энергии реакторного накопителя 5 обратно в источник и во входной емкостный накопитель 37 и благодаря снижению коммутационных потерь при «мягкой» коммутации ключей. Кроме того, исключаются коммутационные перенапряжения на ключах и инверсно-диодные «сверхтоки», а также уменьшается уровень коммутационных высокочастотных помехоизлучений.

Выводы

Рассмотренное новое схмотехническое решение для реализации авиационно-бортовых и аэродромных электроимпульсных противообледенительных систем обеспечивает расширение функциональных возможностей устройства за счёт двунаправленного преобразования электроэнергии, в частности её рекуперации, а также повышение КПД, показателей надёжности и электромагнитной совместимости за счёт исключения коммутационных перенапряжений, диодно-инверсных сверхтоков и снижения коммутационных тепловых потерь и уровня помехоизлучений устройства. Схмотехническое решение защищено приоритетом РФ. Работа представляет интерес для широкого круга специалистов в области конструирования электрооборудования летательных аппаратов, а также противообледенительного оборудования судов и наземно-ста-

ционарных объектов, например северных аэродромных радиолокационных и светосигнальных комплексов.

Библиографический список

1. Егер С.М., Матвеев А.М., Шаталов И.А. Основы авиационной техники / Под ред. И.А. Шаталова. — М.: Изд-во МАИ, 1999. — 576 с.
2. Электрооборудование летательных аппаратов: Учебник для вузов: В 2-х т. / Под ред. С.А. Грузкова. Т. 2. Элементы и системы электрооборудования — приёмники электрической энергии. — М.: Издательский дом МЭИ, 2008. — 552 с.
3. Акопов М.Г. и др. Системы оборудования летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1986. — 368 с.
4. Васильев Н.К., Моисеев В.И., Сокуров В.И., Шаталина И.Н., Бакавичус Н.С., Васильев К.Н. Электроимпульсная противообледенительная система. Патент RU № 2406655. Бюл. № 35 от 20.12.2010 г.
5. Коныхин С.Ф., Резников С.Б., Бочаров В.В., Сыроежкин Е.В., Харченко И.А. Критерии оптимальности и примеры синтеза структуры комбинированной системы электроснабжения переменного-постоянного тока для перспективных летательных аппаратов с полностью электрифицированным оборудованием // Электроника и электрооборудование транспорта. 2013. № 2. С. 2-10.
6. Резников С.Б., Бочаров В.В., Ермилов Ю.В., Руруа К.С., Харченко И.А. Обратимый импульсный конвертор. Патент на полезную модель № 126230. Бюл. № 8 от 20.03.2013 г.
7. Резников С.Б., Бочаров В.В., Харченко И.А., Ермилов Ю.В., Лавринович А.В. Импульсные вторичные источники питания с повышенным качеством входных и выходных токов // Силовая электроника. 2013. № 2. С. 74-80.

MULTIPHASE PULSE TRANSDUCER FOR AIRCRAFT ANTI-ICE VIBRATOR FEEDING

Reznikov S.B.^{1*}, Averin S.V.^{1**}, Kharchenko I.A.^{2***},
Tret'yak V.I.^{3****}, Konyakhin S.F.^{3****}

¹ Moscow Aviation Institute (National Research University),

MAI, 4, Volokolamskoe shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia

² Central Research and Development Testing Institute of the Engineering Troops of the Ministry of Defense of the Russian Federation,

“CRDTI ET” the Russian Defense Ministry,

Nakhabino-2, Moscow region, 143432, Russia

³ Aeroelektromash,

12, B. Novodmitrovskaya str., Moscow, 127015, Russia

* e-mail: rezn41@mail.ru

** e-mail: a_cb@mail.ru

*** e-mail: ihar@mail333.com

**** e-mail: aeroel@mail.ru

Abstract

New circuit approach to aircraft on-board and airfield electro-pulse anti-ice systems with high reliability, electric power efficiency, assembly processability as well as electromagnetic compatibility is examined.

Anti-ice systems represent a key facility for flight security and aircraft installations normal operation. They play an important part providing successful operation of following. They provide successful operation of the following on-board & ground-based equipment: air-field radar, light signal, high voltage, wind-driven, antenna feeder, gas-piping and etc. (especially for facilities that

are operated out-door under winter conditions or in the north regions).

Electro-pulse anti-ice system (EP AIS) represents a certain variety of mechanical anti-ice setup. It provides repetitive pulse impacts in a protected cover. At present the electro-pulse anti-ice systems based on remote contactless impact on the cover is used in aeronautics. They induce pulse eddy currents by means of dedicated EM inductors. These eddy currents induced in certain cover surface areas interact with magnetic field of the latter and produce the pulse vibrations of the cover, and, split off of an ice layer. The debris carried away by the air stream.

The main EP AIS advantage is its low power consumption - ten and even hundred times less than other systems energy consumption.

The general shortcomings of such systems are as follows: low system assembly processability due to bulk inductors for various parts of the cover (their area of action is limited by surface junctions and device reinforcing elements), residual ice formation under relatively large exposed area; the necessity of pulse power boost in case of higher rigidity of construction; structural complexity and its low reliability for composites.

There is a reasonable way to reject the induction vortex interaction between vibrator inductor coil and the cover: the usage of the pair of cores - fixed and movable one. The latter is fixed on the spring and is supplied with a percussion lug for knocking the cover (including materials with low electro-conductivity - composite via metallic substitutes).

The power stage of the secondary pulse power source for anti-ice vibrators with primary supply from low-voltage DC mains network (27 V) is presented in this article.

The circuit represents a reversible (bidirectional) step-down / step-up pulse converter with reactor integrator and a damper-slabber non-dissipating circuit for modulator switch «soft» commutation.

The power taken from the power source is relatively small due to energy batch recuperation from reactor integrator back to power source and to input C-integrator as well as due to commutation loss reduction by “soft” key switching. In addition the switch commutatin overstress and inversely-diode overcurrent are eliminated. Moreover, the HF commutation noise emission is also reduced.

The new circuit solution examined in this article is intended for on-board and airfield electro-pulse anti-ice system design. It provides the equipment functional capabilities enhancement due to bidirectional energy conversion, particularly its recuperation, as well as efficiency and reliability enhancement, EM compatibility improvement thanks to switching overstress and inversely-diode overcurrent elimination as well as switching heat loss

The presented circuit solution is protected by Russian Federation priority. The research presents interest for a wide circle of specialists in the field of aircraft electrical equipment design as well as anti-ice equipment for ships and stationary installations, used for instance in airfield radar and lighting equipment in the north.

Keywords: secondary pulse power supply source, anti-ice system, reversible pulse convertor, damper-slabber non-scattering circuit, electro-mechanical vibrator.

References

1. Eger S.M., Matveenko A.M., Shatalov I.A. *Osnovy aviatsionnoi tekhniki* (Basics of aeronautical engineering), Moscow, MAI, 1999, 576 p.
2. Gruzkov S.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov* (Electrical equipment of aircraft), Moscow, Izdatel'skii dom MEI, 2008, vol. 2, 552 p.
3. Akopov M.G., Bekasov V.I., Evseev A.N., Matveenko A.M. *Sistemy oborudovaniya letatel'nykh apparatov* (System of equipment for aircraft), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 368 p.
4. Vasil'ev N.K., Moiseev V.I., Sokurov V.I., Shatalina I.N., Bakavichus N.S., Vasil'ev K.N. *Patent RU № 2406655*, 20.12.2010.
5. Konyakhin S.F., Reznikov S.B., Bocharov V.V., Syroezhkin E.V., Kharchenko I.A. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta*, 2013, no. 2, pp. 2-10.
6. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Ermilov Yu.V., Rurua K.S., Kharchenko I.A. *Patent RU № 126230*, 20.03.2013.
7. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kharchenko I.A., Ermilov Yu.V., Lavrinovich A.V. *Silovaya elektronika*, 2013, no. 2, pp. 74-80.