ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 629.7

Электромагнитные волны в борьбе с обледенением летательного аппарата

Е.В. Малая, С.С. Колегай
Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Аннотация
Исследованы вихревые токи. Проанализирована работа противообледенительной системы летательного аппарата. Рассмотрены формы индукторов, функционирующих в различных условиях. Оценены материалы, способные выдерживать воздействие переменного тока высокой частоты. Выявлены принципы функционирования генераторов противообледенительной системы. Представлена основная структура защиты воздушных судов от обледенения.

Ключевые слова: в ихревые токи, электромагнитные поля, переменный ток, электромагнитная индукция

Для цитирования. Малая Е.В., Колегай С.С. Электромагнитные волны в борьбе с обледенением летательного аппарата. *Молодой исследователь Дона*. 2026;11(4):9–11.

Using Electromagnetic Waves to Fight Aircraft Icing

Elena V. Malaya, Sergey S. Kolegay
Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Abstract
The article studies the effect of eddy (Foucault) currents. Functioning of the aircraft anti-icing system has been analysed. The shapes of inductors operating under various conditions have been investigated. The materials capable of withstanding the high-frequency alternating current have been assessed. The operating principles of anti-icing system generators have been identified. The basic structure of an aircraft anti-icing system has been presented.

Keywords: eddy currents, electromagnetic fields, alternating current, electromagnetic induction

For Citation. Malaya EV, Kolegay SS. Using Electromagnetic Waves to Fight Aircraft Icing. *Young Researcher of Don.* 2026;11(4):9–11.

Введение. Исследование вихревых токов позволяет рассмотреть работу противообледенительной системы летательного аппарата, формы индукторов, функционирующих в различных условиях, а также материалы, способные выдерживать высокочастотный переменный ток. Выявлены принципы работы генераторов противообледенительной системы. Представлена основная структура защиты воздушных судов от обледенения.

Авиация является основой транспортной логистики. Благодаря высокой скорости и мобильности она занимает важное место в сфере перевозок. Самолеты позволяют за короткое время преодолевать значительные расстояния, что делает их незаменимыми в данной области. Развитие авиации способствует экономическому росту стран, что положительно влияет на прогресс многих сфер человеческой деятельности.

Применение авиации особенно важно для перевозки ценных и скоропортящихся грузов, включая свежую сельскохозяйственную продукцию, фармацевтические препараты и электронные изделия. Такой подход обеспечивает сохранение высокого качества товаров и своевременное удовлетворение потребительского спроса. Во время гуманитарных операций и чрезвычайных ситуаций самолеты используют для быстрой доставки помощи пострадавшим: эвакуации людей и транспортировки медицинского оборудования. Это помогает спасать жизни и минимизировать последствия катастроф.

Однако из-за ряда проблем авиационная транспортировка может быть затруднительной и даже опасной для жизни людей. Одной из таких проблем является обледенение летательного аппарата.

Обледенение ухудшает аэродинамические, летно-технические характеристики летательного аппарата, а также показатели устойчивости и управляемости на различных этапах полета.

https://mid-journal.ru

© Малая Е.В., Колегай С.С., 2026

В связи с этой проблематикой постоянно внедряются инновационные решения, демонстрирующие высокую эффективность и меньшую энергоемкость. Применение электромагнитных волн обосновывается низким энергопотреблением и высокой результативностью.

Основная часть. Токи Фуко (вихревые токи) — это замкнутые электрические токи, возникающие в массивном проводнике при изменении пронизывающего его магнитного потока. Они названы в честь французского физика Ж.Б.Л. Фуко, который в 1855 году обнаружил нагревание ферромагнитных сердечников электрических машин и других металлических тел в переменном магнитном поле и объяснил этот эффект возбуждением индукционных токов.

Исследование указанных явлений создает основу для гипотезы о целесообразности применения вихревых токов в различных сферах человеческой деятельности, связанных с удовлетворением широкого спектра потребностей. В настоящее время токи Фуко активно используются в различных областях практики, выступая эффективным средством решения прикладных задач.

Сведения об индукционных токах применяются в индукционной плавке металлов. Метод в этой области заключается в помещении металла в переменное магнитное поле, создаваемое током с частотой от 500 до 2000 Гц. Благодаря индукционному нагреву металл расплавляется, а тигель, в котором он расположен, остается холодным.

В сфере контроля качества продукции из различных материалов также используется метод вихревых токов. Вихретоковый способ помогает обнаруживать дефекты на поверхности и под ней (трещины, пористость, волосовины, шлаковые и другие неметаллические включения). Этот метод также применяют для измерения толщины покрытий или слоев, определения электрической проводимости и магнитной проницаемости материала, а также для оценки металлургических, механических и иных характеристик изделия.

В быту индукционные плиты используют электромагнитные волны для нагрева посуды. Принцип работы основан на создании переменного магнитного поля, которое индуцирует электрический ток в металлической посуде, вызывая ее нагрев.

Метод нагрева металла настолько широко применяется, что его внедрение в систему предотвращения обледенения летательных аппаратов приобретает актуальное значение. Однако для этого требуется целая система, которая будет работать автоматически, не отвлекая пилота от штурвала.

Электромагнитная система будет состоять из блока управления, генератора электрических импульсов, датчиков образования льда, индуктора и специальной обшивки.

Во-первых, блок управления данной системы выполняет задачу контроля всей работы. Главный элемент блока управления — современный микроконтроллер, который программируется под требуемую деятельность. Его функция — получать сигнал от датчиков образования льда о начале обледенения и запускать генератор электрических импульсов. Также он контролирует мощность, выделяемую генератором, и режим обогрева (циклический обогрев или постоянный). Блок управления фиксирует место обледенения и для экономии энергии может задействовать противообледенительную систему только там, где это необходимо.

Материалы, используемые для изготовления обшивки летательных аппаратов, должны обладать определенными свойствами, такими как прочность, легкость, устойчивость к внешним воздействиям. Однако для вихревых токов требуется особый материал. Чтобы создать вихревые токи с высоким коэффициентом полезного действия и обеспечить быстрый нагрев поверхности, необходим материал с малым удельным сопротивлением. Для обшивки летательных аппаратов часто используют алюминий. В авиации алюминий выделяется малой массой, прочностью и высокой электропроводностью. Из-за низкой температуры плавления алюминий нежелательно использовать при высоких температурах. Титановые сплавы отличаются высокой прочностью и коррозионной стойкостью, благодаря чему востребованы в авиастроении. Они обладают хорошей теплопроводностью, но их удельное сопротивление слишком высокое. При определенных условиях используют нержавеющую сталь, поскольку она отличается коррозионной стойкостью и механической прочностью. Для получения альтернативных вариантов применяют композитные материалы с металлическими добавками, например с алюминиевыми или титановыми волокнами, которые обеспечивают оптимальное сочетание малого веса и высоких тепловых характеристик.

Первый компонент, который необходимо рассмотреть в противообледенительной системе, — это индуктор. Индуктор — это пассивный электронный компонент, который создает электромагнитное поле при прохождении через него переменного электрического тока. Его конструкция обычно включает проводящую обмотку, намотанную в виде спирали и подключенную к источнику переменного тока. Протекание переменного тока через обмотку приводит к формированию вокруг нее переменного магнитного поля. Спиральная форма обмотки увеличивает электромагнитные характеристики индуктора. В качестве материала для обмотки часто исполь-

зуется медь благодаря ее высокой электропроводности и устойчивости к перегреву даже при значительных токах.

Обмотка индуктора должна быть изолирована для предотвращения утечки электричества, при этом и обмотка, и изолятор обязаны выдерживать значительные электрические нагрузки для эффективной передачи энергии. Применение ферромагнитного сердечника используют для усиления магнитного поля и повышения эффективности нагрева; их изготавливают из ферритов или железа с добавками никеля и кобальта. Для предотвращения перегрева, особенно при высокой мощности, индуктор часто оснащается системой охлаждения, которая может быть воздушной или жидкостной.

Принцип работы генератора основан на преобразовании постоянного напряжения бортового питания воздушного судна в импульсное напряжение с определенной частотой и амплитудой. Специальные электронные схемы создают короткие высокоамплитудные импульсы напряжения. Частота этих импульсов выбирается таким образом, чтобы максимизировать глубину проникновения магнитного поля и, соответственно, мощность индуцированных вихревых токов.

Заключение. Преимущества противообледенительных систем летательных аппаратов, основанных на методе индукционного обогрева (нагреве путем вихревых токов), заключаются в следующем. Метод индукционного обогрева обеспечивает практически мгновенную реакцию на обледенение опасных участков самолета. Как только датчики фиксируют наличие льда, начинается подача электрических импульсов, которые сразу же приводят к нагреву защищаемого участка. Это значительно сокращает время реакции системы и минимизирует риск образования толстого слоя льда.

При применении метода индукционного обогрева достигается высокая плотность теплового потока непосредственно на поверхности конструктивных элементов воздушного судна. Благодаря этому обеспечивается эффективное удаление льда даже при опасных температурах и скоростях полета. Использование индукционного метода позволяет оптимально распределять энергию именно там, где это необходимо. За счет точечного нагрева требуемые участки получают достаточную степень прогрева, что позволяет снизить общее потребление электрической энергии и повысить энергоэффективность всей системы.

Отсутствие подвижных деталей в индукционном оборудовании существенно повышает общую надежность и устойчивость к отказам. Износостойкость таких систем значительно выше, чем у традиционных механических устройств, что способствует увеличению срока службы оборудования и снижению затрат на техническое обслуживание. Индукционная технология подходит для широкого спектра типов покрытий и материалов. Она одинаково хорошо работает как на металлических поверхностях, так и на композитных материалах, что расширяет область ее применения в современной авиации.

Эти преимущества делают индукционную систему обогрева одним из наиболее перспективных методов борьбы с обледенением на борту воздушных судов, способствуя повышению безопасности полетов и улучшению технических характеристик самолетов.

Список литературы

1. Гольдштик, М.А. Вихревые потоки. Новосибирск. Наука, Сибирское отделение. 1981. 366 с.

Об авторах:

Елена Викторовна Малая, кандидат технических наук, доцент кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), elevicma@mail.ru

Сергей Сергеевич Колегай, магистрант кафедры «Техническая эксплуатация летательных аппаратов и наземного оборудования» Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), sergej.kolegaj@bk.ru

Конфликт интересов: **авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena V. Malaya, Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), elevicma@mail.ru

Sergey S. Kolegay, Master's Degree Student of the Department of Technical Operation of Aircraft and Ground Equipment, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), sergej.kolegaj@bk.ru

Conflict of Interest Statement: **the authors declare no conflict of interest.**

All authors have read and approved the final manuscript.