

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ОБЛЕДЕНЕНИЯ САМОЛЕТА

Аннотация: Рассматриваются вопросы создания современных систем контроля обледенения самолета. Приведен обзор существующих технических средств и методов борьбы с обледенением летательных аппаратов.

Ключевые слова: современные системы контроля, электроимпульсные противообледенительные системы, индуктор импульсов, характеристики импульсного воздействия.

Введение

Опыт эксплуатации авиационной техники показывает, что обледенение летательного аппарата (ЛА) наряду с турбулентностью атмосферы, электрическими разрядами, возможностью столкновения с птицами является одним из наиболее опасных воздействий естественной внешней среды, которое существенно влияет на безопасность полета.

Так образование ледяной корки на крыльях влечёт за собой изменение их профиля и, как следствие, весьма значительное уменьшение подъёмной силы. Это приводит к ухудшению аэродинамических характеристик ЛА. В случае интенсивного образования льда может происходить значительное уменьшение критических значений углов атаки несущих поверхностей. Возникающий вследствие этого преждевременный срыв потока может послужить причиной аварии или катастрофы ЛА на взлетно-посадочных режимах полета.

Образование льда на входных кромках воздухозаборников двигателей, на воздушно-нагнетательном аппарате или первых ступенях компрессора приводит к уменьшению КПД двигателя, его перегреву, помпажу, а в случае самопроизвольного сброса льда в воздушный тракт двигателя - его остановке, повреждению и даже разрушению.

Обледенение воздушных винтов турбовинтового двигателя снижает их КПД и увеличивает расход топлива для поддержания заданного режима полете. Возникающие в условиях обледенения винта вибрации и тряски могут привести к разрушению опорных подшипников вала и к его заклиниванию.

Образование льда на остекление кабины экипажа, обтекателей радиолокационных и радиосвязных антенн, датчиков навигационно-пилотажных приборов ухудшает условия пилотирования и навигации [2].

Таким образом, борьба с обледенением самолёта является актуальной проблемой, напрямую связанной с безопасностью воздушного транспорта.

Постановка задачи

Исследовать существующие технические средства и методы борьбы с обледенением летательных аппаратов и предложить пути повышения эффективности их использования.

Системы защиты ЛА от обледенения

Современный уровень развития авиационной техники исключает возможность использования “пассивного” метода борьбы с обледенением, сводящегося к стремлению избежать при полете таких метеорологических условий, которые могут вызвать обледенение.

Требование эксплуатации ЛА в любых метеорологических условиях предусматривает разработку эффективных и надежных противообледенительных систем (ПОС), позволяющих не только контролировать степень обледенения самолета, но и защищать его от обледенения.

В настоящее время все ЛА, как правило, оборудуются устройствами для защиты от обледенения. Однако, повышение их эффективности, как показывает опыт, продолжает оставаться фактором, от которого существенно зависит безопасность и регулярность полетов [3].

По характеру работы различают ПОС непрерывного и циклического действия. Системы непрерывного действия, как правило, не допускают образования льда на защищаемой поверхности; системы же циклического действия допускают образование льда определенной толщины, а затем удаляют его.

ПОС можно также классифицировать по месту их установки: ПОС крыла, хвостового оперения, остекления кабины экипажа и т. д. [4].

Принцип действия используемых ПОС основан на одном из следующих способов защиты: механическом, физико-химическом, тепловом.

Механические ПОС. Относятся к системам циклического действия, допускающим образование на защищаемой поверхности слоя льда определенной толщины. Эта толщина выбирается таким образом, чтобы лед не оказывал заметного влияния на летные характеристики и безопасность полета ЛА. Допустимая толщина льда является индивидуальной характеристикой конкретного ЛА и составляет в среднем 4 - 6 мм.

Цикл работы механической ПОС можно разбить на три этапа: образование слоя льда допустимой толщины; разрушение его с помощью силового воздействия; удаление обломков под действием набегающего потока.

К механическим системам относятся пневматические и электроимпульсные ПОС [1].

Пневматические ПОС. Принцип действия пневматической ПОС следующий: на носке крыла (или оперения) устанавливается протектор из эластомерного материала. Внутри протектор имеет ряд камер, к которым в определенном порядке подается сжатый воздух от компрессора двигателя или специального компрессора, установленного на коробке приводов двигателя. Поочередно надуваясь, камеры протектора разламывают образовавшийся на защищаемой поверхности лед, который уносится набегающим потоком (рис. 1).

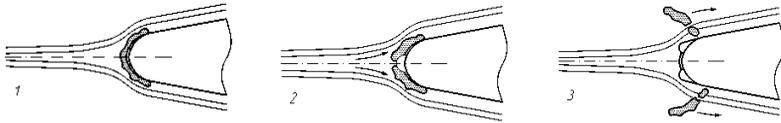


Рис. 1 – Сброс льда с помощью последовательно наполняемых камер пневматической ПОС: 1, 2, 3 – последовательные стадии работы системы.

К преимуществам пневматических ПОС относится малая энергоемкость системы – расход воздуха составляет всего около 30 кг/ч, а также малая удельная масса – около 30 кг/м.

Недостатками такой системы является увеличение сопротивления крыла (примерно на 5-6 % в нерабочем состоянии протектора и на 100-110 % в рабочем состоянии), а также довольно быстрое старение эластомеров под воздействием переменных температур и солнечной радиации, приводящее к растрескиванию и разрушению протектора.

В отечественной авиации пневматические ПОС в настоящее время не применяются, в то время как за рубежом они широко используются на малых ЛА (ЛА административного класса) [3].

Электроимпульсные ПОС. Действие электроимпульсной ПОС (ЭИ ПОС) заключается в создании в защищаемой обшивке и слое льда, находящегося на ней, повторяющихся импульсных деформаций, разделенных паузами. Возникающие при этом в элементах конструкции напряжения меньше предела циклической прочности материала, но достаточны для разрушения льда.

В настоящее время в авиации используется система, основанная на бесконтактном дистанционном воздействии с помощью электромагнитной индукции. Рабочим элементом ЭИ ПОС в этом случае является индуктор, установленный вплотную или с некоторым зазором по отношению к защищаемой обшивке. При подаче импульса напряжений на индуктор в последнем возникает кольцевой ток и возбуждается электромагнитное поле. По закону электромагнитной индукции (закон Ленца) в обшивке также возбуждаются кольцевые токи и возникает свое электромагнитное поле. Так как эти поля имеют одну направленность, обшивка будет "отгалкиваться" от индуктора и в ней будут возникать упругие деформации и соответственно напряжения, под действием которых будет происходить разрушение ледяного нароста (рис. 2). Продолжительность импульсов составляет около 4-10 сек, а период их следования – 1-2 сек. Как показывает практика, серии из трех последовательных импульсов достаточно для эффективного удаления льда.

Электроимпульсные системы могут применяться не только в случае изготовления защищаемого агрегата ЛА из металлических конструкционных материалов, но и при использовании композиционных материалов. При этом в месте установки индуктора на внутреннюю сторону об-

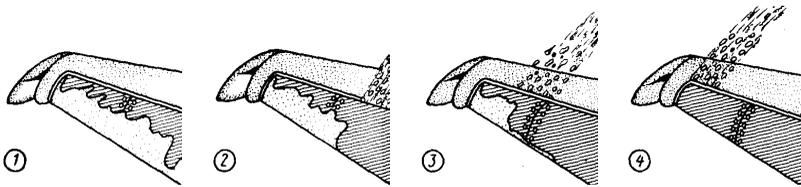


Рис. 2 – Последовательные фазы работы электроимпульсных ПОС

шивки необходимо наклеить электропроводный слой – так называемый "дублер" из алюминиевой фольги.

Для более эффективного удаления льда и рационального использования энергии индукторы целесообразно соединять в группы.

Основным преимуществом электроимпульсных ПОС является крайне малое потребление энергии – в десятки и даже сотни раз меньше по сравнению с системами других типов.

К недостаткам этих систем относится: большое количество индукторов, поскольку область их действия ограничена стыками обшивки и элементами силового набора агрегата; наличие остаточных льдообразований в случае, если зона улавливания составляет более 2% хорды по верхней или нижней поверхности профиля; необходимость повышения мощности импульса по мере возрастания жесткости конструкции (этим, в частности, объясняется тот факт, что данные системы не находят применения на легких и средних ЛА) [3].

Физико-химические ПОС. Основной разновидностью физико-химических ПОС, находившей достаточно широкое применение в отечественной и зарубежной авиации, является жидкостная система.

Противообледенительная жидкость, запас которой находится в баке, под действием напора, создаваемого насосом постоянной подачи, по системе трубопроводов подается к передним кромкам крыла и оперения. На защищаемой поверхности противообледенительная жидкость смешивается с переохлажденными каплями, образуя незамерзающую пленку. Под действием набегающего потока эта пленка растекается по поверхности, а затем сдувается с нее. Таким образом, жидкостная ПОС предотвращает образование ледяного нароста.

В качестве рабочей жидкости в этих системах используются смеси на основе этилового и изопропилового спиртов и моноэтиленгликоля. Жидкости на спиртовой основе не растворяют лед, вернее растворяют его очень медленно, поэтому системы, использующие такие жидкости, должны включаться заблаговременно, до входа в зону обледенения.

Жидкости на основе моноэтиленгликоля лед растворяют, и в системах, использующих эти жидкости, возможны циклические режимы работы. В этом случае аналогично механическим ПОС происходит удаление уже образовавшегося льда.

Эффективность защиты зависит как от вида используемой жидкости, так и от конструкции рабочей части, т. е. способа подачи жидкости к

защищаемой поверхности. Чем равномернее жидкость распределяется по защищаемой поверхности, тем эффективнее осуществляется защита от обледенения.

Одним из наиболее совершенных вариантов конструкции рабочей части системы является вариант, в котором используется обшивка из пористой коррозионно-стойкой стали (рис. 3). Под обшивкой располагается слой пористого полимерного материала, к которому под давлением подается жидкость. Слой пористого материала способствует равномерному распределению жидкости в пределах защищаемого агрегата, а затем эта жидкость равномерно поступает на наружную поверхность.

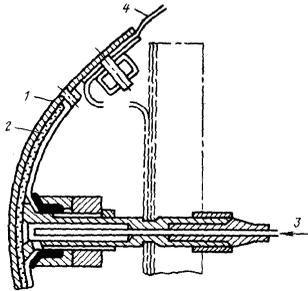


Рис. 3 – Конструкции рабочей части жидкостной ПОС. 1 – обшивка из пористого металла; 2 – пористый полимерный металл; 3 – подача противообледенительной жидкости; 4 – обшивка носка крыла

К преимуществам систем такого типа относятся: отсутствие остаточных льдообразований; хорошие массовые характеристики (многие компоненты системы изготавливаются из полимерных материалов); малые потребляемые мощности (жидкостные системы американской фирмы TKS, используемые на ЛА Short “Skyvan” и SD3-30, потребляют всего около 50 Вт); экономичное расходование жидкости; большой ресурс, соизмеримый с ресурсом планера.

Однако жидкостные ПОС имеют существенные недостатки: время работы системы зависит от запаса жидкости на борту, эффективность в случае тяжелого обледенения недостаточны, системы пожароопасны [4].

Тепловые ПОС. В настоящее время для защиты ЛА от обледенения в подавляющем большинстве случаев применяются тепловые ПОС, которые делятся на две большие группы – воздушно-тепловые и электротепловые. В основу такого деления положен источник энергии, от которого питается ПОС. Кроме того, в отдельных случаях, главным образом для защиты силовой установки, применяются противообледенители, использующие горячее масло от двигателя.

Независимо от источника энергии все тепловые ПОС подразделяются на системы постоянного и циклического действия.

При постоянном обогреве капли воды, попадая на подогретую поверхность, не замерзая, растекаются по ней, постепенно испаряясь и частично сдуваясь набегающим потоком. Если протяженность зоны обогрева окажется недостаточной для полного удаления воды, то последняя замерзает на границе обогреваемой зоны в виде неудаленного барьерного льда.

Применение противообледенителей постоянного обогрева, полностью испаряющих воду, требует повышенных затрат энергии и связано с необходимостью защиты больших поверхностей. Поэтому такие противообледенители используют для защиты только тех частей ЛА, на которых недопустимо образование льда.

Существенную экономию энергии дает применение противообледенителей циклического обогрева. В этом случае вся защищаемая поверхность разбивается на отдельные секции, обогреваемые поочередно. На поверхности образуется лед допустимой толщины, который при очередном нагреве секции должен сбрасываться. Для того чтобы после выключения обогрева лед опять не примерзал к поверхности, на передней кромке есть узкая полоса, обогреваемая постоянно. Это так называемый "тепловой нож", который разделяет лед на две части, легко удаляемые набегающим потоком после того, как в результате нагрева и подтаивания льда изнутри резко уменьшаются силы его сцепления с обшивкой (рис. 4).

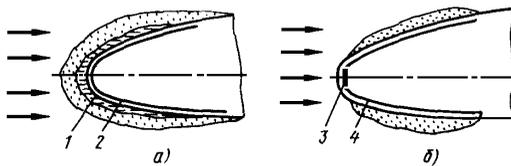


Рис. 4 – Действие теплового ножа. а) работа противообледенителя без теплового ножа; б) работа противообледенителя с тепловым ножом; 1 – пленка воды; 2, 4 – НЭ, работающая в циклическом режиме; 3 – тепловой нож.

ПОС циклического действия применяют для защиты только тех поверхностей, сброс льда с которых не может привести к опасным последствиям. Например, их нельзя применять для защиты входных кромок воздухозаборников или центропланной части крыла, если двигатели установлены в хвостовой части фюзеляжа.

Воздушно-тепловые ПОС постоянного действия – наиболее распространенные и простые системы. Основным источником горячего воздуха для них является компрессор ГТД (газотурбинного двигателя), но могут находить применение и калориферные обогреватели и теплообменники, обогреваемые выхлопными газами (на ЛА с поршневыми двигателями).

Однако в большинстве случаев ПОС циклического действия – это электротепловая система. Применение электротепловых ПОС чаще всего

обусловлено высокой чувствительностью двигателей к отбору воздуха, а также удобством передачи энергии к защищаемой поверхности. Кроме того, для ряда агрегатов ЛА, например воздушных винтов, применение систем других типов просто невозможно. Источником питания электро-тепловой ПОС является самолетная сеть переменного трехфазного тока напряжением 115/208В.

Сигнализаторы обледенения

Эффективность защиты ЛА от обледенения в значительной степени зависит от своевременного включения ПОС. С этой целью на борту ЛА в местах с наименьшим искажением набегающего потока воздуха, обычно в носовой части фюзеляжа, устанавливают сигнализаторы обледенения. В настоящее время сигнализаторы обледенения не только включают ПОС, но и осуществляют регулирование ее работы в соответствии с условиями обледенения и режимом полета ЛА.

Все существующие сигнализаторы обледенения можно разделить на две группы: сигнализаторы, регистрирующие условия, способствующие возникновению обледенения; сигнализаторы, регистрирующие наличие льда на поверхности ЛА, т. е. факт уже начавшегося обледенения.

Сигнализаторы первой группы реагируют на наличие в атмосфере переохлажденных капель воды, а принцип их действия может быть основан на регистрации электрического тока в цепи датчика или измерении таких параметров, как интенсивность теплообмена с окружающей средой и электропроводность датчика. Эти сигнализаторы отличаются высокой чувствительностью, однако могут давать ложные срабатывания, так как не отличают обычные капли воды от переохлажденных, обуславливающих обледенение. Для предотвращения этого явления сигнализаторы первой группы оснащаются датчиками температуры, блокирующими сигнал при положительных температурах окружающей среды.

Сигнализаторы второй группы реагируют непосредственно на слой льда, образовавшегося на датчике. Они несколько уступают в быстродействии сигнализаторам первой группы, так как для образования льда требуется время, но проще по конструкции, менее подвержены ложным срабатываниям.

К сигнализаторам обледенения независимо от того, к какой группе они относятся, предъявляется ряд требований: высокая надежность функционирования и достоверность информации; высокая чувствительность; сигнализация начала и конца обледенения и автоматическое управление работой ПОС; простота эксплуатации; минимальное аэродинамическое сопротивление, малые габаритные размеры и масса [4].

Тепловой сигнализатор-интенсиметр. Является типичным представителем сигнализаторов обледенения первой группы — реагирует на наличие в воздухе “свободной воды”. Предназначен для сигнализации условий обледенения и измерения интенсивности обледенения.

Принцип работы сигнализатора-интенсиметра обледенения основан на измерении разности величины теплоотдачи с нагретой до определенной температуры поверхности датчика в сухом воздушном потоке и в условиях обледенения. В комплект прибора входят: датчик, электронный и исполнительный блоки и указатель интенсивности обледенения.

Простейшим по конструкции сигнализатором второй группы является стандартный визуальный указатель обледенения типа штыря. Получили широкое распространение механические, электропневматические и наиболее совершенные из них радиоизотопные сигнализаторы обледенения.

Механический сигнализатор. Основан на механическом воздействии льда, оседающего на чувствительном элементе. Сигнализатор состоит из необогреваемого цилиндра и ножевидного скребка, установленного строго параллельно образующей цилиндра, с зазором между ним около 0,1 мм. Цилиндр имеет насечки и медленно вращается электродвигателем подвешенным на пружинах так, что он может поворачиваться на небольшой угол. При обледенении между скребком и вращающимся цилиндром создается трение, момент которого передается на корпус электродвигателя, последний поворачивается вокруг своей оси и замыкает контакт системы сигнализации. После прекращения обледенения электродвигатель под действием пружины возвращается в исходное положение и контакты размыкаются. Такой сигнализатор обладает удовлетворительной чувствительностью, просто конструкцией и не нуждается в обогреве.

В механических сигнализаторах обледенения могут использоваться также изменения частоты или амплитуды вибраций датчика при нарастании на нем льда, разность центробежных сил вращающихся и обогреваемых лопастей прибора, разница в аэродинамическом сопротивлении двух одинаковых обтекаемых профилей, на одном из которых оседает лед, изменение частоты при обледенении вибрирующей пластины и т.п.

Вибрационный сигнализатор. В настоящее время на серийных ЛА широкое распространение получили вибрационные сигнализаторы обледенения, относящиеся ко второй группе. Конструктивное исполнение этих сигнализаторов может быть несколько различным, но действуют они на одном и том же принципе.

Штырь сигнализатора сквозь отверстие в обшивке выходит в набегающий поток, содержащий переохлажденные капли воды. С помощью обмотки возбуждения, к которой подводится переменное напряжение, стержень приводится в колебательное движение вдоль своей оси. Образованная таким образом электромеханическая колебательная система колеблется с некоторой эталонной частотой f_3 . Вместе со стержнем колеблется жестко связанный с ним постоянный магнит, наводя в измерительной обмотке переменное напряжение U_p , имеющее частоту f_p . Эта частота регистрируется с помощью электронных устройств и сравнивается с эталонной. При отсутствии обледенения регистрируемая частота f_p совпадает с эталонной f_3 .

При образовании слоя льда изменяются масса и собственная частота колебаний стержня и соответственно – магнита. Возникающее рассогласование частот f_p и f_o , регистрируется электронным блоком, выдающим сигнал об обледенении. По величине рассогласования (1), можно судить об интенсивности обледенения.

$$\Delta f = f_o - f_p \quad (1)$$

Пневмоэлектрический сигнализатор. Предназначен для автоматической сигнализации о начале и окончании обледенения. В отдельных случаях может быть использован для автоматического включения противообледенительной системы. Это типичные представители сигнализаторов второй группы. Принцип работы их основан на изменении аэродинамического давления, вызванного закрытием при обледенении отверстий в заборнике воздуха. В качестве чувствительного элемента используются упругие свойства мембраны, замыкающей электрические контакты при уменьшении аэродинамического давления.

Существенным недостатком пневмоэлектрических сигнализаторов является появление ложных срабатываний при случайных засорениях рабочих отверстий приемников.

Радиоизотопный сигнализатор РОИ-3. Основное преимущество радиационного метода измерения - безконтактность. Этот метод может быть использован в сигнализаторе обледенения не только для обнаружения начала обледенения летательного аппарата, но и непрерывного измерения толщины льда, интенсивности обледенения и ряда других параметров, представляющих возможность обеспечить эффективность защиты от обледенения при применении тепловых ПОС пульсирующего действия.

Получившие в настоящее время широкое распространение в авиации радиоизотопные сигнализаторы обледенения (РИО-3) имеют чувствительность 0,3±0,1 мм льда, обеспечивают сигнализацию как начала, так и прекращения обледенения, а также непрерывную сигнализацию при полете в зоне обледенения. Они могут быть использованы в качестве исполнительных органов автоматического включения отдельных ПОС.

Принцип действия РИО-3 основан на ослаблении β -излучения радиоактивного изотопа слоем льда, образующегося на рабочей поверхности выносного штыря датчика. В качестве источника β -излучения в сигнализаторе использован стронций 90 и иттрий 90 (Sr90 и Y90), активностью 4 - 5 мкКи с периодом полураспада 28,4 года.

Радиоизотопный сигнализатор питается от бортовых сетей постоянного (+ 27,5 В) и переменного таков напряжением 115 В или 208 В 400 Гц. Для увеличения безотказности работы он может применяться в двух- или трехканальном исполнении [1].

Методы измерения температуры

Измерение температуры, в зависимости от ее диапазона и конкретных значений, проводится методами, использующие различные физические

эффекты.

В температурном диапазоне от - 60 °С до +100 °С наиболее часто применяются резистивные термометры сопротивления, термодпары, а также полупроводниковые термодатчики. Кроме того, в качестве датчиков можно использовать только те, которые имеют электрический выходной сигнал для удобства автоматизации процесса измерения. Российской промышленностью выпускаются авиационные датчики П-63, П69-2М, П-98, П-104 и др. с номинальным сопротивлением при нулевой температуре 46-100 Ом. Датчики имеют линейную характеристику на всем диапазоне измерения. Такие датчики помещаются в специальные механические конструкции, защищающие их от воздействия окружающей среды, а также позволяющие использовать их в тяжелых условиях эксплуатации, например, при повышенном давлении [5].

Полупроводниковые датчики отличаются большим многообразием по конструктивному исполнению и электрическим параметрам [6]. Наиболее распространены полупроводниковые линейные датчики, например WAD 405, STR35С фирмы “Linear Technology”, которые предназначены для работы в диапазоне температур от -50 до 125 градусов Цельсия. Нелинейность этих датчиков не превышает 0,1 %, погрешность измерения 0,2 град [7] Фирмой “Analog Devices” производит температурные контроллеры серии TMP, которые имеют выходной сигнал в виде ШИМ. Информативным параметром является длительность импульса при постоянном периоде их следования [8].

Существуют и температурные датчики с цифровым двухпроводным (или однопроводным) интерфейсом, что удобно для автоматизации измерений. Однако, стоимость их сравнительно высока.

Выводы

Приведенный обзор существующих технических средств и методов борьбы с обледенением ЛА показал, что наиболее перспективными для использования, ввиду малой энергоемкости, являются электроимпульсные ПОС. Для повышения эффективности их использования, они должны быть интегрированы в систему управления ЛА.

Управление такими ПОС должно осуществляться на базе применения средств вычислительной техники и предусматривать программное воздействие на характеристики подаваемых на индуктор импульсов. Важной задачей при этом является исследование влияния характеристик импульсного воздействия на обшивку самолета для определения наиболее оптимального закона их подачи.

Литература

1. Мещерякова Т.П. Проектирование систем защиты самолетов и вертолетов: Учебное пособие для вузов. - М.: Машиностроение, 1977. - 232 с.

2. Тенишев Р.Х., Строганов Б.А., Савин С.В. и др. Противообледенительные системы летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1967. - 390 с.
3. Трунов О.К. Обледенение самолетов и средства борьбы с ним. - М.: Машиностроение, 1965. - 247 с.
4. Зинченко В.П., Зинченко С.В. Об оптимальном программном управлении технологическими модулями Prometheus // XXXIII Междунар. симпозиум “Вопросы оптимизации вычислений”. - НАН Украины: ИК им. В.М. Глушкова. - пгт. Кацевели, 2007. – С. 90-91.
5. Зинченко В.П., Зинченко С.В. Алгоритмы и базовые программные модули для управления технологическими модулями Prometheus // УСМ, 2007. - 5. – С. 52–60.
6. Хвоц С., Амаду Х. Х. Промышленные сети на базе стандарта MIL-STD-1553В/ - Современные Технологии Автоматизации 4, 1999 – 23-26с.
7. Зинченко В.П., Зинченко С.В., Шиков М.В., Концепция системы контроля обледенения самолета // IX Міжнар. науково - техніч. конф. “Приладобудування 2010 – стан і перспективи”. Зб. тез допов. – К.: НТУУ “КПІ”, ПБФ, 2010. – С. 112.–113.
8. Шиков М.В., Зинченко С.В. Система контроля обледенения самолета // Наук.– технік. конф. виклад., науковців, аспірантів та студентів ФАКС 17–19 травня 2010 року. Зб. тез доп. – К.: НТУУ “КПІ”, ФАКС, 2010. - С. 29–30.

Отримано 11.03.2011 р.