Кравченко Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники Украины, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ». Специалист в области электромагнитной совместимости ТС и молниезащиты ЛА.

Князев Владимир Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ». Специалист в области электромагнитной совместимости ТС и молниезащиты ЛА.

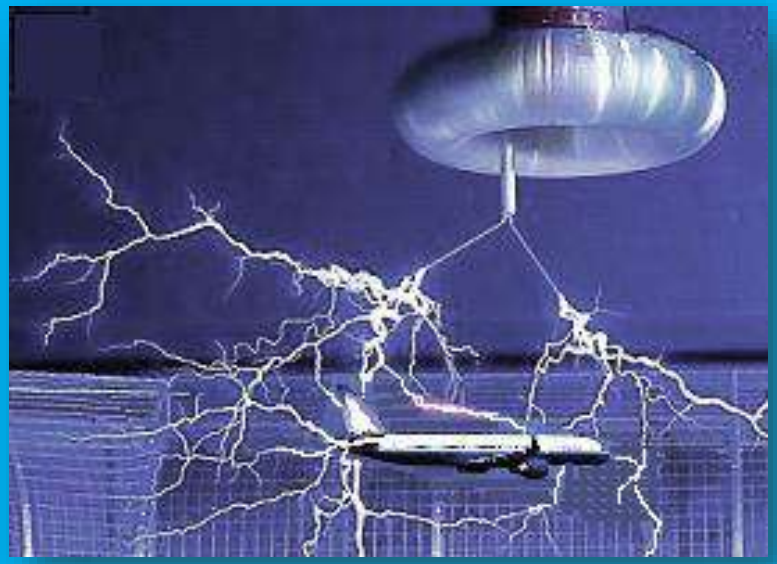
Лесной Иван Петрович, заведующий лабораторией Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ». Специалист в области проведения сертификационных испытаний на соответствие требованиям электромагнитной совместимости ТС и молниезащиты ЛА.

Немченко Юрий Семенович, лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заведующий лабораторией, главный метролог Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» НТУ «ХПИ». Специалист по метрологическому обеспечению испытаний в области электромагнитной совместимости ТС и молниезащиты ЛА.

МОЛНИЯ И ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ Том 3

В.И. Кравченко, В.В. Князев,
И.П. Лесной, Ю.С. Немченко

МОЛНИЯ И ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ



3

Министерство образования и науки Украины

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский
институт «Молния»

**В.И. Кравченко, В.В. Князев,
И.П. Лесной, Ю.С. Немченко**

МОЛНИЯ И ЛЕТАТЕЛЬНЫЕ АППАРАТЫ

Монография в трех томах

Под общей редакцией проф. В.И. Кравченко

Том 3

Испытания на молниестойкость

Харьков 2021

УДК 551.594.221; 623.746
К78

Р е ц е н з е н т ы:

А.А. Серков, д. т. н., проф., (проф. Кафедры «Системы информации» НТУ «ХПИ»), Заслуженный изобретатель Украины;

Г.А. Маймур, к. т. н, главный научный сотрудник ГП «КБ «Южное», лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники;

И.И. Чернявский, заместитель начальника отдела комплектно-электронного оборудования и систем ГП «Антонов», лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники.

Публикуется по решению Ученого совета НТУ «ХПИ»
(Протокол № 6 от 13 ноября 2020 г.)

Кравченко В. И., Князев В. В., Лесной И. П., Немченко Ю.С.
К78 **Молния и летательные аппараты.** В трех томах. Том 3. Испытания на молниестойкость / В. И. Кравченко, В.В. Князев, И.П. Лесной, Ю.С. Немченко. – Харьков. Издатель: О. А. Мирошниченко, 2021. – 364 с.

ISBN 978-617-7618-80-4.

Рассмотрены современные подходы к методам испытаний летательных аппаратов на соответствие требованиям молниестойкости. Содержатся материалы по методикам испытаний, описанию высоковольтного испытательного оборудования и метрологического обеспечения проведения испытаний.

Для инженерно-технических работников, разрабатывающих и эксплуатирующих летательные аппараты и студентов соответствующих специальностей. Также книга может быть полезна широкому кругу читателей.

Ил. 175. Табл. 36. Библ.: 115

ISBN 978-617-7618-80-4 **УДК 551.594.221; 629.7.018**

© В.И. Кравченко,
В. В. Князев, И. П. Лесной,
Ю. С. Немченко, 2021

ISBN 978-617-7618-80-4

СОДЕРЖАНИЕ

Введение…….. 7

ГЛАВА 1. Испытания летательных аппаратов на соответствие требованиям молниестойкости…….. 12

1.1 Виды испытаний ЛА на молниестойкость…….. 12

1.2 Нормативные документы в области обеспечения требований молниестойкости ЛА……... 18

1.3 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений прямого поражения молнией ЛА …….…… 20

1.3.1 Нормированные значения идеализированных форм и амплитудно-временных параметров испытательных импульсов высокого напряжения ……. 22

1.3.2 Нормированные значения идеализированных форм и амплитудно-временных параметров тока молнии полного воспроизведения ……... 26

1.3.3 Нормированные значения форм и амплитудно-временных параметров тока молнии частичного воспроизведения ……..... 32

1.4 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров ВВФ ЭМП грозовых разрядов …….. 38

1.5 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ТС и ЛА при воздействии грозовых разрядов …….. 43

1.5.1 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ТС при воздействии грозовых разрядов ……. 43

1.5.2 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ЛА при воздействии грозовых разрядов ……. 47

1.5.3 Нормированные значения основных испытательных форм и амплитудно-временных параметров электростатических разрядов, воздействующих на ЛА ……..... 59

Литература к главе 1 ……. 62

ГЛАВА 2. Методы испытаний летательных аппаратов на соответствие требованиям молниестойкости …… 64

2.1 Планирование, подготовка и проведение испытаний ЛА на воздействие молнии ……... 64
2.1.1 Программа проведения испытаний ……. 65
2.1.2 Методика испытаний ……. 67
2.1.3 Степень жесткости и оценка результатов испытаний… 72
2.2 Испытания самолетов и вертолетов на молниестойкость….. 74
2.2.1 Испытания на прямое воздействие молнии …… 74
2.2.1.1 Испытания на попадание высоковольтного разряда ……..... 76
2.2.1.2 Испытания на физическое повреждение сильными токами ……. 102
2.2.1.3 Измерение переходных процессов, наведенных в устанавливаемом снаружи оборудовании ……..... 112
2.2.2 Испытания на косвенные воздействия молнии …….. 116
2.2.2.1 Испытания ЛА в целом ……. 117
2.2.2.2 Испытания оборудования и систем …… 140
2.2.2.3 Выбор форм испытательных сигналов ……..... 150
2.3 Испытания объектов ракетно-космической техники …….. 153
2.3.1 Мировая практика в подходах к испытаниям на молниестойкость объектов РКТ …….. 153
2.3.2 Специфика испытаний объектов РКТ на молниестойкость ……... 154
2.3.2.1 Подходы к испытаниям объектов РКТ с учет условий их реальной эксплуатации ……. 154
2.3.2.2 Испытания на молниестойкость в целом объектов вооружения ракетной техники ……. 157
2.3.2.3 Методы испытаний объектов вооружения ракетной техники на воздействие прямых и близких разрядов молнии …….. 159
2.3.2.4 Опыт наземных испытаний в целом объектов ракетной техники воздушного базирования на молниестойкость ……..... 166
2.3.2.5 Опыт испытаний систем подвижного грунтового ракетного комплекса на молниестойкость ……. 176
Литература к главе 2 ……. 193
Приложение к главе 2 ……... 194
Литература к приложению главы 2 ……. 223

ГЛАВА 3. Испытательное оборудование …… 226

3.1 Генераторы импульсных напряжений ……..... 226
3.2 Генераторы импульсных токов …… 230
3.3 Генераторы импульсных электромагнитных полей ……..... 233
3.4 Генераторы наведенных токов и напряжений в цепях бортового оборудования ЛА …… 238
3.4.1 Испытания цепей бортового оборудования ЛА методом «контактного ввода» …….. 244
3.4.2 Испытания цепей бортового оборудования ЛА методом «кабельной инжекции» …….. 247
3.4.3 Испытания цепей бортового оборудования ЛА методом «ввода в заземление» …… 249
3.5 Требования к испытательным площадкам на молниестойкость ЛА ……. 250
3.5.1 Открытые испытательные площадки …….. 251
3.5.2 Закрытые испытательные площадки (высоковольтные залы) ……. 260
Литература к главе 3 ……. 270
Приложение к главе 3 ……... 271

ГЛАВА 4. Метрологическое обеспечение испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости …… 289

4.1 Основы метрологического обеспечения испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости …….. 289
4.2 Метрологические требования к средствам измерительной техники при проведении испытаний ЛА по параметрам молниестойкости …… 291
4.3 Методы измерения регистрируемых параметров молниестойкости ЛА при испытаниях ……. 295
4.3.1 Методы измерения высоких импульсных напряжений …… 295
4.3.2 Методы измерения больших импульсных токов ……..... 303
4.3.3 Методы измерения импульсных электрических и магнитных полей ……..... 318
4.3.3.1 Измерение напряженности электрических полей ……..... 319
4.3.3.2 Измерение напряженности магнитных полей…. 324
4.3.4 Особенности измерения электрических и магнитных полей в корпусах-экранах ТС ……... 329

4.3.5 Методы измерения токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ТС ЛА при косвенном ударе молнии …….. 331
4.3.5.1 Средства измерения наведенных импульсов напряжения …… 333
4.3.5.2 Средства измерения наведенных импульсов тока ……. 333
4.3.6 Обеспечение помехозащищенности измерительных трактов при испытаниях на молниестойкость …… 334
4.3.6.1 Рекомендуемая схема заземления элементов измерительного комплекса ……..... 337
4.3.6.2 Рекомендации по защите измерительного оборудования от влияния мощного электромагнитного излучения грозовых разрядов …….. 340
Литература к главе 4 ……. 353
Приложение к главе 4 ……... 354
Литература к приложению 4 …… 362

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение требований молниестойкости летательных аппаратов (ЛА) многогранная проблема, включающая в себя комплекс задач по определению факторов грозовой электромагнитной обстановки, оказывающей неблагоприятное воздействие на эксплуатацию ЛА, анализ взаимодействия этих факторов с элементами конструкций и оборудованием объектов ракетно-космической техники, самолетов и вертолетов, обеспечения эффективных мер защиты ЛА от поражающих воздействий токов молнии и дестабилизирующих влияний электромагнитных полей излучения грозовых разрядов, а, также, проведения их испытаний на молниестойкость.

В соответствии с требованиями международной авиационной организации ИКАО, ни один самолет не может быть принят к эксплуатации и допущен для пассажирских перевозок без детальных испытаний на молниестойкость. Методики этих испытаний базируются на требованиях нормативных документов (НД), регламентирующих искусственное воспроизведение условий эксплуатации ЛА в грозовой обстановке и последствий воздействия на летательные аппараты прямого удара молнии с предельно допустимыми параметрами. Требования по процедуре испытаний настолько жесткие, что до сих пор их организация и практическая реализация создают большие проблемы, а их результаты далеко не всегда трактуются однозначно.

Таким образом, именно полномасштабные испытания на соответствие требованиям молниестойкости на сегодняшний день являются единственным критерием, определяющим возможность допуска к эксплуатации объектов ракетно-космической техники, самолетов и вертолетов.

При этом, практическая реализация проведения этих видов испытаний ЛА требует: *наличия нормативных документов, регламентирующих требования и методики проведения испытаний ЛА на молниестойкость*; *оснащения испытательных лабораторий (ИЛ) уникальным высоковольтным оборудованием для проведение комплексных испытаний, регламентированных НД в этой области*; *метрологической базы для проведения калибровки средств измерительной техники, используемых для данного вида испытаний*, *аккредитации ИЛ соответствующими национальными службами.*

Все вышеперечисленное является необходимым условием для полной реализации легитимных испытаний ЛА на молниестойкость.

Так, технические требования на проведения испытаний ЛА на воздействие имитированной молнии с нормированными параметрами изложены в большом числе документов, применимость которых определяется видом ЛА, сферой его применения, районом использования. Наибольшее распространения имеют требования, сформулированные в нормативных документах, разработанных в США Обществом Инженеров Самодвижущегося Транспорта (SAE) «Рекомендуемая Практика Авиационно-Космических Работ» (ARP), в том числе SAE ARP5412, SAE ARP5413, SAE ARP5414 и SAE ARP5416, а также военных стандартах США MIL-STD-461G, MIL-STD-464C, MIL-STD-1757A. Основные требования для ЛА гражданской авиации объединены в стандарте RTCA DO 160G, гармонизированном в Европейском Союзе под номером ED14G. Требования к военным ЛА отражены в стандартах НАТО: NATO STANDARD AECTP-500 и NATO STANDARD AECTP-250, которые приняты в Украине методом подтверждения и введены в действие с 01.02.2021.

С целью выявления реального влияния внешней среды на безопасность полетов проводится статистический анализ авиационных происшествий на основании материалов ICAO, FAA, Национального Комитета безопасности перевозок США (NTSB), бюллетеня инспекции БП Укравиатранса.

При детальном анализе НД обращает внимание на себя тот факт, что не все параграфы требования Федерального управления гражданской авиации США (FAR) и Европейской объединенной авиационной администрации (JAR) идентичны, несмотря на их схожесть, объясняемую начиная с 1970 года продолжающимися усилиями по гармонизации, предпринимаемыми Европейской объединенной администрацией летной годности. Европейская объединенная администрация летной годности позже была преобразована в Объединенную авиационную администрацию (JAA), являющуюся ассоциированным органом Европейской конференции по гражданской авиации (ECAC). Этот орган в настоящее время передает часть обязанностей Европейскому агентству по безопасности в авиации (EASA). Стандарты государственной организации США, занимающейся исследованием космоса (NASA), используемые для космических аппаратов

многоразового использования, также могут содержать современные требования по молниестойкости, распространяющиеся на летательные аппараты, оборудованные электроникой.

Также обращает внимание на себя тот факт, что жесткость требований по молниестойкости ЛА военного назначения ниже чем для воздушных судов гражданского применения. Это объясняется различием катастрофических последствий, связанных с людскими жертвами, которые в первом случае исчисляются единицами, а во втором могут достигать сотен пассажиров и членов экипажа.

Нормативные документы на проведение испытаний ЛА по параметрам молниестойкости должны содержать в себе научно обоснованные, экспериментально- и практически подтвержденные значения предельных параметров внешних воздействующих факторов электромагнитных полей, токов и напряжений испытательных импульсов натурных грозовых разрядов, перечень рекомендуемого испытательного оборудования, и приборов по метрологическому обеспечению проведения испытаний, а также методики проведения испытаний в этой области.

Перечень стран, имеющих центры по проведению полномасштабных испытаний объектов ракетно-космической техники, самолетов и вертолетов на молниестойкость и оснащенных высоковольтным испытательным оборудование, невелик. К ним относятся США, КНР, Франция, Германия, Россия и Украина.

США представлена двумя организациями: *Lightning Technologies, Inc.,* которая проводит моделирование и испытания на воздействие молний, с целью обеспечения исследований, разработки, проектирования и сертификационных испытаний самолетов на молниестойкость; *NTS Pittsfield,* которая является базовым мировым центром и международным лидером в разработке сложных систем молниезащиты для клиентов в аэрокосмической промышленности, разработки и проверки систем молниезащиты крупных самолетов, космических аппаратов и пусковых установок, включая космические аппараты НАСА и пусковые комплексы KSC.

Российская Федерация представлена Федеральным государственным унитарным предприятием «Летно-исследовательским институтом им. М.М. Громова».

Основные направления работы института связаны с обеспечением молние-электростатической защиты летательных аппаратов отраженных для гражданских летательных аппаратов в

требованиях нормативно-методических документов, прежде всего Квалификационным требованиям КТ-160G, введенных с 2015 года.

Украина представлена Научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Институт оснащен уникальной экспериментальной базой – объектом Национального достояния Украины, для проведения полномасштабных сертификационных испытаний на молниестойкость объектов аэрокосмической техники и летательных аппаратов как в сборе, так и их отдельных составных частей, блоков и узлов на соответствие требованиям нормативной документации: RTCA/DO-160G, SAE ARP5412, ARP5414, ARP5416, MIL-STD-461G, а также ГОСТ 30586 – 98, ОСТ 1 01160-88.

Неотъемлемой частью проведения испытаний ЛА на молниестойкость является метрологическое обеспечение испытаний, осуществляющих регистрацию и измерение амплитудно-временных параметров моделируемых грозовых электромагнитных факторов. Особые проблемы метрологического обеспечения испытаний в этой области составляют конструирование преобразователей больших импульсных токов и высоких импульсных напряжений молнии с предельными параметров, которые были бы способны рассеивать в процессе их эксплуатации большие энергии без существенных изменений своих передаточных характеристик в пределах допусков, регламентированных НД. Опыт метрологического обеспечения испытаний свидетельствует, что для регистрации основных функциональных параметров испытуемых объектов применяются стандартизованные средства измерения и контроля режимов их работы. В остальных случаях, как правило, приходится использовать не стандартизованные, серийно не выпускаемые средства измерения.

Представляемый читателю третий том трехтомника этой серии посвящен комплексной проблеме обеспечения проведения испытаний летательных аппаратов на соответствие требованиям молниестойкости. В нем с современных позиций и подходов рассмотрен и проанализирован опыт ведущих стран мира по процедурам проведения испытаний в этой области. Также здесь содержатся материалы по анализу основных видов испытаний на молниестойкость ЛА.

В основу представленного во третьем томе материала положен более чем 50-летний личный опыт авторов по испытаниям на соответствие требованиям молниестойкости различных видов объектов ракетно-космической техники, самолетов и вертолетов, а также результаты более чем полувековой работы в этой области коллектива Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (Украина).

Авторы выражают надежду, что данная книга будет полезна специалистам в области обеспечения требований молниезащиты летательных аппаратов, электромагнитной совместимости и стойкости их радиоэлектронного, электронного и электротехнического оборудования, а также интересна широкому кругу читателей.

Авторы с благодарностью примут критические замечания и пожелания, которые просят направлять по адресу: 61013, Украина, г. Харьков, ул. Шевченко, 47, НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» или по электронной почте tc22@i.ua.

Глава 1. ИСПЫТАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ

1.1 Виды испытаний ЛА на молниестойкость

Летательные аппараты должны сохранять работоспособность и требуемое, по условиям эксплуатации, качество функционирования в условиях активной грозовой деятельности, при поражающем воздействии и дестабилизирующем влиянии на эти средства или их системы, блоки и узлы больших токов, высоких напряжений (перенапряжений) и электромагнитных полей грозового формирования. С этой целью ЛА необходимо подвергать испытаниям на соответствие требованиям электромагнитной совместимости и стойкость к воздействиям поражающих факторов грозовых разрядов с регламентированными значениями параметров, приведенных в НД.

По правилам международной авиационной организации ИКАО ни один самолет не может использоваться для пассажирских перевозок без испытаний на молниестойкость. Их методика имитирует последствия воздействия на летательный аппарат прямого удара молнии с предельными параметрами. Требования к процедуре испытаний настолько жесткие, что до сих пор их организация создает большие проблемы, а результаты далеко не всегда трактуются однозначно.

Экспериментальное определение стойкости ЛА к грозовым воздействиям (испытания на молниестойкость) является наиболее объективным, а зачастую и единственным способом, который позволяет [1.1]:

- учесть влияние на молниестойкость ЛА большинства реально существующих в природе и на практике факторов;
- выявить и по возможности снизить критичность к грозовым воздействиям основных функциональных связей между отдельными устройствами, блоками и узлами этих средств;

- определить конструктивные, монтажные, технологические и другие особенности ЛА, проявляющиеся в условиях грозовой деятельности;

- улучшить защитные свойства и существенно повысить стойкость ЛА к грозовым воздействиям;

- дать окончательное заключение о надежности, пригодности к безопасной эксплуатации, работоспособности и электромагнитной стойкости ЛА как в сложной грозовой электромагнитной обстановке, так и прямом поражении этих средств молнией;

- осуществить сертификацию ЛА на соответствие требованиям электромагнитной совместимости и стойкости к воздействию грозовых разрядов.

Для испытания ЛА на молниестойкость необходимо решить ряд основных задач, связанных, прежде всего, с выбором вида грозовых испытаний этих средств и определением основных параметров грозовых факторов, которые непосредственно или косвенно воздействуют на ЛА в процессе их эксплуатации.

Как следует из [1.1 - 1.9] воздействия молнии, которым подвергается ЛА и воздействия, которые должны быть воспроизведены при лабораторных испытаниях с использованием имитации форм сигналов молнии, можно разделить на *прямые и косвенные* (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Поражающие воздействия молнии на ЛА [1.9].

Виды повреждений	Сопровождающие эффекты
1	2
Прямые воздействия: *включают в себя горение, эродирование, разрыв и деформации конструкции, вызванные касанием электрической дуги молнии, а также ударные волны высокого давления, магнитные силы и тепловые воздействия, вызванные связанными с молнией сильными токами.*	
Пробой диэлектрика	Пробой диэлектрической оболочки, покрывающей токопроводящие элементы может привести к возникновению отверстий малого и большого диаметра. Эти отверстия могут приводить к прямому соприкосновению канала молнии с находящимся под этой оболочкой оборудованием. Вероятность пробоя является функцией расстояния до находящегося под диэлектриком проводника, толщины и электрической прочности диэлектрика оболочки, состояния поверхности диэлектрика и близости других токопроводящих компонентов. Пробой диэлектрической оболочки обычно возникает, если напряжение пробоя диэлектрика в какой-либо точке не является существенно превышающим, то напряжение, которое необходимо для разряда по поверхности к ближайшей токопроводящей точке на конструкции ЛА.

Продолжение табл. 1.1

1	2
Термическое повреждение и нагрев основания электрической дуги	В основании электрической дуги могут возникнуть прогар и эрозия материала. Для металла это зависит от силы тока и времени. В области основания электрической дуги имеется большой подвод тепла от самой дуги, а также концентрация омического нагрева из-за больших плотностей тока. Большая часть энергии образуется на поверхности металла или в непосредственной близости к ней. Если количество тепла, образующееся непосредственно в области основания электрической дуги, превышает ту величину, которая может быть поглощена металлом за счет проводимости, то избыток тепла либо расходуется на плавление и парообразование, либо на обратное излучение. Существует минимальная величина переноса заряда за минимальное время для заданной толщины любого конкретного металла, ниже которой не происходит проплавление металла. Для композиционных материалов на основе углеродного волокна тепловые воздействия более резко выражены. Теплопроводность и электрическое сопротивление вызывает плавление и испарение смолы, а также расслоение. Это приводит к увеличению «площади поражения» по отношению к глубине повреждения. Напряжение прожига электрической дуги для углепластика выше, чем для металла. Данный факт в сочетании с высоким объемным удельным сопротивление приводит к образованию большего количества тепла непосредственно в области основания электрической дуги и более длительному сохранению участков перегрева, чем для большинства металлов. Для металлических поверхностей главным образом промежуточный этап вспышки молнии может превышать минимально необходимые условия по силе тока и продолжительности для прогара или сильной эрозии. Однако для композиционных материалов на основе углеродного волокна к подводу большого количества тепла приводят как короткие сильнодействующие импульсы, так и слаботочные длительные импульсы. Таким образом, все этапы вспышки молнии существенны. *Образование участков перегрева.* Участки перегрева могут возникать на внутренней поверхности обшивки ЛА, противоположной точке соприкосновения с молнией. Воздействие участков перегрева является существенным в основном в отношении возгорания топлива и других легковоспламеняющихся паров. *Омический нагрев.* Энергия рассеивания тепла в проводнике, по которому протекает ток, определяется «интегралом действия импульса тока молнии». Омический нагрев, порожденный всем импульсом молнии, представляет собой произведение активного сопротивления пути прохождения молнии через ЛА на интеграл действия импульса и измеряется в Дж или Вт с. При грозовом разряде этапы вспышки молнии с высоким интегралом действия являются слишком короткими для того, чтобы за счет омического нагрева в конструкции ЛА выделилось какое-либо тепло для существенного рассеивания. *Взрывающиеся проводники (Силы пробоя).* Проводники могут взрывообразно испаряться, если площадь их поперечного сечения недостаточна для того, чтобы проводить токи молнии. Сопутствующая этому ударная волна может приводить к серьезному повреждению, особенно в ограниченном пространстве. Данный механизм повреждения особенно важен для электропроводки, подсоединенной к внешнему оборудованию, например: навигационные огни, антенны, нагревательные элементы противообледенительной системы ППД и т. д. Они могут представлять существенную опасность, если они плохо защищены и граничат или проходят через замкнутые отсеки в ЛА.

Продолжение табл. 1.1

1	2
	Искрообразование. Различают два типа искрообразования: термическое искрообразование и электрическое искрообразование. Термические искры возникают при прохождении тока через соединение двух деталей при недостаточной для проведения тока площади поперечного сечения. Электрические искры возникают тогда, когда напряжение между двумя не связанными электродами превышает уровень напряжения пробоя и приводит к электрическому разряду. Электрические искры обычно порождаются напряжением, наведенным в конструкции или проводке. В большинстве случаев термическое искрообразование возникает возле краев участков перегрева на сопрягаемых поверхностях при давлении в области контакта равном нулю или близком к нулю. Основными причинами являются высокая плотность тока и недостаточные площадь контакта и давление. Термические искры состоят из горящего материала электрода.
Повреждение акустической ударной волной	Взаимодействие электрической дуги с поверхностью ЛА может также породить ударную волну. Серьезность удара зависит как от максимальной величины тока, так и от скорости нарастания тока. В общем случае повреждение акустической ударной волной незначительно для металлических обшивок. На металлических обшивках могут образовываться вмятины, но обычно не образуются пробоины. В обшивках из жесткого композиционного материала могут возникать трещины и разрывы.
Магнитные силы	Для токов молнии, текущих в ЛА, эти силы могут проявлять себя различным образом. В одном случае это сила на поверхности проводника, проводящего ток молнии. Данное воздействие можно объяснить тем, что элемент тока на одной части проводника порождает магнитное поле, в котором все другие элементы тока подвергаются воздействию силы. Это уравнение дает значение силы, направленной внутрь со всех сторон проводника. Эта сила существенна только в тех случаях, когда поверхностная плотность тока превышает несколько килоампер на миллиметр. В некоторых случаях даже относительно малые силы могут быть существенными. Таким примером может служить металлическая оплетка, из которой делают перемычки металлизации. Она может быть обжата до состояния, при котором ее можно рассматривать как сплошной проводник, становится хрупкой, что приводит к последующему механическому разрушению. Другой более общий случай, когда значительные магнитные силы могут возникать от тока, текущего в отдельных проводниках или в различных участках одного и того же проводника, в которых ток молнии идет в разном направлении. Действие этой силы заключается в притягивании отдельных проводников друг к другу или в распрямлении одного проводника. Данная сила также возникает между токами, текущими в ЛА, и каналом электрической дуги. Эта сила существенна только в тех случаях, когда ток молнии заключен в проводниках малого поперечного сечения, что характерно для некоторого монтируемого извне оборудования. Окончательное влияние на испытываемый объект зависит от механических характеристик испытываемого объекта.

Окончание табл. 1.1

1	2
Косвенные воздействия: *представляет собой результат взаимодействия электромагнитных полей, сопутствующих молнии, с электрическим/электронным оборудованием ЛА. Эти поля являются результатом увеличения апертурной связи и конструктивного напряжения IR (произведения тока на сопротивление) за счет наличия токов молнии в ЛА.*	
Апертуры	Апертуры определяются как отверстия в конструкции, через которые проходит электромагнитное поле. Примером являются окна, фонарь кабины, обтекатели радиолокационной антенны, зазоры, непроводящие ток панели и т.д. Наведение напряжений и токов во внутренней проводке порождается полями, проникающими через отверстия.
Диффузия	Процесс проникновения электромагнитного поля сквозь толщину токопроводящего материала. Она приводит к возникновению внутренних полей, отражающих удлиненную форму сигнала внешнего тока, действующего на летательный аппарат. Для конструкций с высокой проводимостью, таких, например, как алюминиевые, она обычно приводит к возникновению (во внутренней проводке) наведенных токов несущественной амплитуды. Для материалов с более высоким сопротивлением, например, композитов на основе углеродного волокна, амплитуда наведенного тока может быть значительной.
Падения напряжения на элементах конструкций ЛА	Эти падения напряжения возникают в результате протекания электрического тока через полное сопротивление конструкции между двумя концами электрической цепи. Для конструкций с высокой проводимостью, таких, например, как алюминиевые, величина этих напряжений обычно незначительна. Для конструкций с более высоким сопротивлением, например, композитов на основе углеродного волокна, амплитуда этого напряжения может быть значительной.
Проникновения через проводящие пути	Любой проводник, частично выступающий из конструкции или частично утопленный в нее, может образовывать путь для прямого прохождения тока внутрь летательного аппарата. Примером может служить проводка от внешних элементов, таких как антенны, бортовые огни и нагревательные элементы, механическая тросовая проводка или трубопроводы, которые являются токопроводящими. Если эти пути проникновения не заземлены или не изолированы в точках их выхода наружу, они могут проводить значительные токи внутрь летательного аппарата.

В отдельных случаях некоторые элементы конструкции могут подвергаться как прямым, так и косвенным воздействиям. Примером является разряд молнии на антенну, при котором повреждается антенна, а также разрушающие напряжения, возникающие из-за наличия электромагнитной энергии, подаются в передатчик или приемник, подключенные к антенне. В данном документе физическое повреждение антенны рассматривается как прямое

воздействие, в то время как напряжение и/или ток от антенны к радио/радиолокационному оборудованию рассматривается как косвенное воздействие.

В связи с вышеизложенным, можно выделить два основных вида испытаний ЛА на соответствие требованиям грозовой электромагнитной стойкости:

- воспроизведение основных поражающих факторов грозовых разрядов;
- имитирование напряжений и токов, возникающих в опасных трактах радио- и электротехнического оборудования ЛА в процессе грозовых воздействий.

Испытания ЛА на молниестойкость на основе *воспроизведения основных поражающих факторов грозовых разрядов* заключаются в имитировании в лабораторных условиях разрядов молнии и сопровождающих эти разряды процессов, которые вызывают дестабилизацию функционирования или выход из строя ЛА.

Эти поражающие факторы включают в себя токи молнии, протекающие по ее каналу в процессе разряда и связанные с ними напряжения, сильные электрические и магнитные поля, к которым относятся электрические поля предгрозового периода и лидерной стадии молнии, импульсные электрические и магнитные поля, создаваемые грозовым разрядом, включая электромагнитные поля излучения - ГЭМИ, а также магнитные поля токов молнии протекающих по молниеотводам.

Ввиду того, что грозовые разряды носят случайный характер и не могут быть в полной мере использованы для натурных грозовых испытаний ЛА, воспроизведение в лабораторных условиях основных поражающих факторов грозовых разрядов остается на сегодняшний день основополагающим методом испытаний ЛА на молниестойкость.

При этом проведение таких испытаний требует наличия уникального высоковольтного и энергоемкого дорогостоящего оборудования, которым оснащаются только специальные высоковольтные лаборатории, количество которых существенно ограничено [1.10 – 1.15].

В тех случаях, когда нет возможности воспроизвести поражающие факторы грозовых разрядов, используют такой вид испытаний как *имитирование напряжений и токов в опасных*

трактах ЛА. В его основе лежит способ генерирования напряжений и токов с такими амплитудно-временными характеристиками, появление которых в виде наводок можно ожидать в опасных трактах радио- и электротехнического оборудования ЛА при всех видах грозовых воздействий.

Следовательно, чтобы испытать ЛА в целом на молниестойкость данным методом необходимо на входные цепи этих средств подать от имитаторов наведенных напряжений и токов электрические сигналы, соответствующие по своим амплитудно-временным характеристикам тем наводкам, которые возникают во внешних цепях ЛА при грозовых воздействиях.

Метод имитированных напряжений и токов более экономичный и простой по сравнению с методом воспроизведения грозовых поражающих факторов, так как для его реализации не требуется дорогостоящего уникального оборудования. Единственное условие его успешной реализации - однозначное определение (нормирование) основных параметров напряжений и токов, наводимых во внешних цепях ЛА, критичных к грозовым воздействиям.

1.2 Нормативные документы в области обеспечения требований молниестойкости ЛА

Основные требования и параметры, связанные с обеспечением испытаний ЛА на молниестойкость содержатся в нормативных документах (НД). Обязательными к применению в этой связи являются национальные НД, а на территории стран СНГ еще и межгосударственные НД.

В Украине кроме Державних стандартів України (ДСТУ) и стандартов организаций (СОУ), частично используются документы бывшего СССР: отраслевые стандарты (ОСТ), руководящие технические материалы (РТМ), межведомственные технические требования (МТТ), хотя в официальном перечне действующих нормативных документов их уже нет.

Межгосударственные стандарты (ГОСТ) используются на территории стран СНГ, подписавших соответствующее Межгосударственное соглашение о едином нормативном

пространстве, для осуществления взаимных поставок и признания результатов испытаний. Таким образом, НД серии ГОСТ также применяются в Украине.

В связи с законодательно принятым решением о гармонизации нормативной базы Украины с нормативной базой Европейского союза и НАТО, ввод в действие новых стандартов осуществляется путем признания с последующим переводом на украинский, по мере необходимости и финансовых возможностей. Однако, такое развитие логично прослеживается только в части стандартов, которые включены в перечни, под соответствующие Директивы ЕС, в том числе Директива ЕС 2014/30/EU касающаяся электромагнитной совместимости оборудования общегражданского применения. Требования по ЭМС для объектов вооружения и военной техники, включая летательные аппараты, регламентируются соответствующими стандартами НАТО, которые будут упомянуты далее. Что касается гражданской авиации, то официального решения на государственном уровне пока нет. До последнего времени руководствовались квалификационными требования КТ-160D, разработанными в 2004 году на базе соответствующего стандарта RTCA DO 160D с некоторыми изменениями. Решением АРМАК в странах СНГ с 2015 года действует новая редакция КТ-160G, принятая путем перевода аналогичной последней редакции RTCA DO 160G:2011. В Украине, в системе Минтранс принято решение руководствоваться стандартом RTCA DO 160G:2011, которое, однако, не обличено в какую-либо законодательную форму (по крайней мере, она не известна авторам). В связи с выше изложенным, описание требований НД, касающихся летательных аппаратов, приведено на основе широко применяемых в мире стандартов США и НАТО.

Перечень этих основных НД следующий:

AC №. 20-53A. Protection of Airplane Fuel Systems against Fuel Vapor Ignition due to Lightning.

RTCA ARP 5412. Aircraft Lightning Environment and Relative Test Waveform. -2005. -56 p.

RTCA ARP 5414. Aircraft Lightning Zoning. -2005. -33p.

RTCA ARP 5416 Aircraft Lightning Test Methods. 2005. -145 p.

RTCA DO-160G /ED-14D. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. -2011. -438 p.

MIL-STD-461G Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems and Equipment. -2015, -280 p.

MIL-STD-464C. Department of Defense. Interface Standard Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. -2010.-165 p.

MIL-STD-1757A. Lightning Qualification Test Techniques for Aerospace Vehicles and Hardware. -1983. – 95 p.

MIL-STD-331C Department Of Defense. Test Method Standard. Fuze and Fuze Components, Environmental and Performance Tests for. -2009.-286 p.

NATO STANDARD AECTP-500. Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1. DECEMBER 2016, 1125 p.

NATO STANDARD AECTP-250. Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version 1. December. - 2014, 253 p.

1.3 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений прямого поражения молнией ЛА

Формы сигналов внешних воздействующих факторов молнии представляются в виде идеализированных импульсных воздействий, которым подвергается самолёт в целях анализа и испытаний. Формы сигналов не предназначены для повторения специфических случае ударов молний, а предназначены как основные формы сигналов, которые воздействуют на самолёт и которые ожидаются от воздействия естественной природной молнии как среднестатистические.

Стандартные внешние воздействующие факторы молнии состоят из индивидуальных форм сигналов напряжения и форм сигналов составляющих тока, которые представляют важные характеристики разрядов природной молнии.

Далее приведены формы сигналов представляющие особую важность с точки зрения их воздействия (прямого или косвенного). Так, для оценки прямого воздействия молнии такие как амплитуда тока, интеграл действия и продолжительность являются параметрами первостепенной важности, а для оценки косвенного воздействия важными являются такие параметры, как скорость нарастания тока, скорость спада тока и амплитуда тока.

Не все поверхности самолёта должны быть сконструированы так, чтобы выдерживать угрозу поражения молнией. Ниже представлены формы сигналов и относящиеся к ним параметры, которые должны быть приложены к конструкции самолёта и устройствам защиты от ударов молнии оборудования самолёта с целью проверки эффективности их защиты. Прямое поражение молнией ЛА (прямой удар) представляет собой такой вид воздействия, при котором канал молнии непосредственно контактирует с элементами летательного аппарата. В результате этого ЛА будет подвергаться воздействиям тех поражающих грозовых факторов, которые связаны с процессом формирования, развития и протекания разряда молнии.

Разряды натурных молний в лабораторных условиях по техническим причинам на современном этапе не могут быть воспроизведены одновременно в полном объеме эффектов. Однако, большинство характеристик напряжений и токов, возникающих при разряде молнии, могут быть воспроизведены отдельно с помощью генераторов импульсных напряжений и токов, предназначенных для имитации разрядов молнии. Эти характеристики могут быть разбиты на две категории: напряжения, возникающие во время грозового разряда, и токи, протекающие по каналу молнии [1.16, 1.17]. При этом в подавляющем большинстве испытаний по техническим причинам и из экономических соображений воспроизводятся только наиболее важные, с точки зрения электромагнитных воздействий, части полной волны тока и напряжения натурной молнии. Таким образом, при определении уровней электромагнитной стойкости ЛА к прямым ударам молнии эти средства должны подвергаться испытаниям напряжениями и токами молнии.

Испытаниям на молниестойкость напряжениями и токами молнии подвергаются объекты:

- которые в процессе эксплуатации могут быть подвержены или подвергаются прямым поражениям (ударам) молнии;
- на которые стекают (ответвляются) токи с поражаемых молнией объектов и имеющих гальваническую связь с этими ЛА;
- на которые возможен искровой разряд или перекрытие изоляционных промежутков между пораженными молнией объектами и близко расположенными к ним ЛА.

При испытаниях ЛА на молниестойкость допускается основные характеристики напряжений и токов, сопровождающие разряд молнии и оказывающие поражающее воздействие и дестабилизирующее влияние на эти средства воспроизводить раздельно. В результате чего эти испытания включают в себя следующие виды [1.1, 1.5]:

- высоким импульсным напряжением;
- полным током молнии;
- токами молнии частичного воспроизведения.

Испытания высоким импульсным напряжением проводятся с целью определения наиболее вероятных точек поражения ЛА молнией, стримерных эффектов, путей внешних перекрытий и внутренних пробоев, включая испытание на импульсную электрическую прочность изоляции этих средств.

Испытания токами молнии полного и частичного воспроизведения проводятся с целью определения степени грозовых электромагнитных воздействий на обшивку ЛА, на выступающие элементы (например, антенны, сигнальные фонари), радио- и электротехническое оборудование ЛА.

1.3.1 Нормированные значения идеализированных форм и амплитудно-временных параметров испытательных импульсов высокого напряжения

Идеализированные формы сигналов напряжения представляют ту часть электрического поля, которая является важной для оценки касания конструкций самолёта молнией.

По классификации SAE ARP5412 [1.18] испытательные идеализированные формы импульсов напряжения делятся на такие формы: A, B, C и D (рис.1.1).

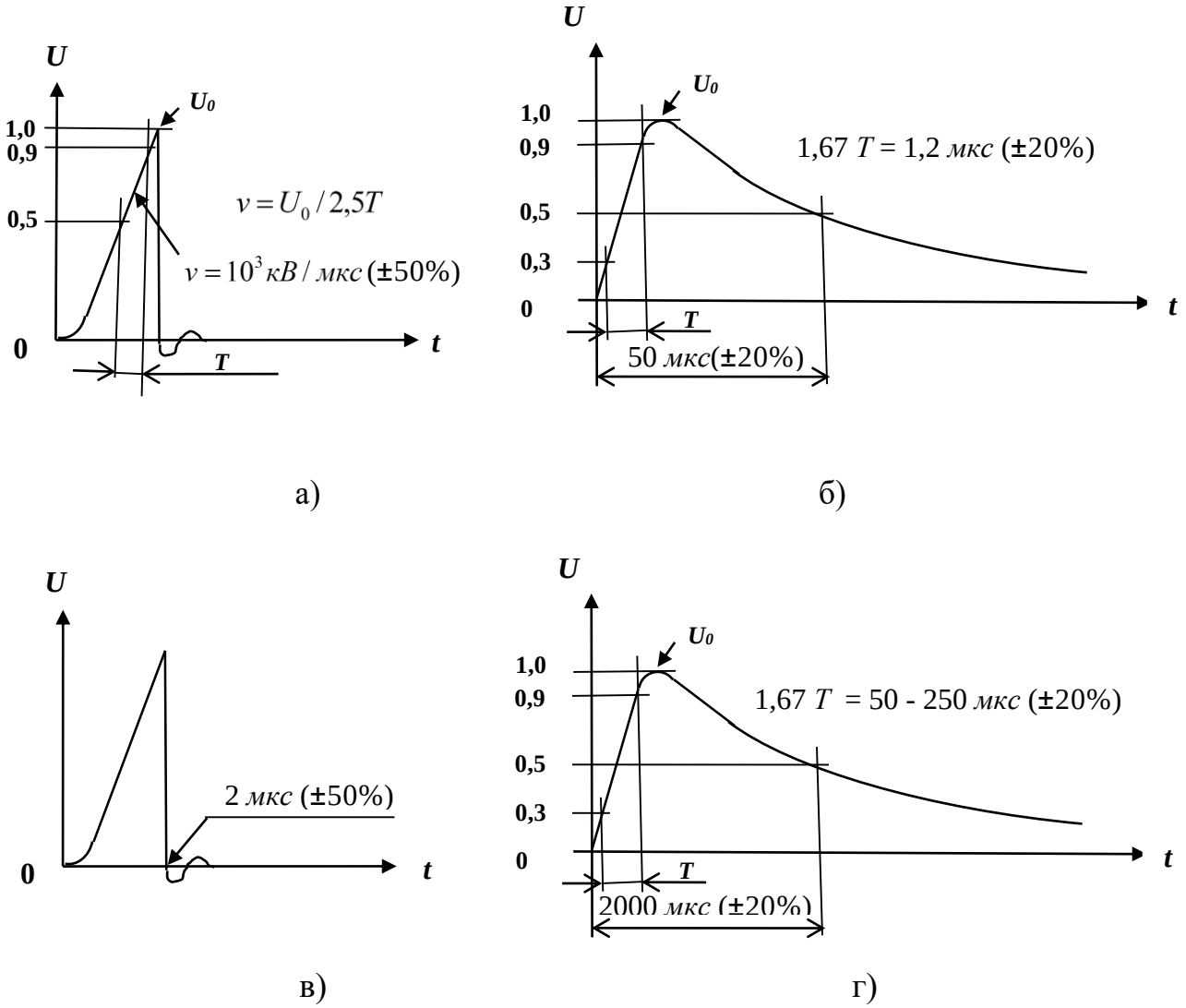


Рис. 1.1 - Формы импульсного напряжения, применяемые для грозовых испытаний [1.32]
а – форма А (основная);
б – форма В (полная);
в – форма С (модельная);
г – форма D (длинная - коммутационная)

Поскольку естественной природной молнией создаётся широкий диапазон возможных форм сигнала электрического поля, были выбраны и утверждены две формы сигналов напряжения, представляющие быструю и медленную скорости нарастания поля - это формы А и D сигналов. Они служат для определения критической амплитуды напряжения, при которой происходит пробой и который зависит как от скорости нарастания, так и от

скорости спада напряжения, и используются для определения прочности изоляции и определение точек, в которых на транспортном средстве появляются стримеры при приближении разряда молнии.

Две других формы сигнала высоковольтного напряжения, обозначенные как формы B и C соответственно. Первая является формой сигнала полного напряжения предназначенная для использования в тех случаях, когда требуется импульсное поле, не достигающее пробоя, например, при исследовании стримера. Вторая форма сигнала применяется для режима испытаний быстрого переднего фронта.

Форма напряжения сигнала D также может быть использована для режима испытаний медленного переднего фронта.

При лабораторных испытаниях было определено [1.18], что результаты исследований точки касания на моделях самолётов зависят от формы сигналов напряжения. Формы сигналов с быстрыми скоростями нарастания (длительность нарастания порядка нескольких микросекунд) создают относительно маленькое количество точек касания, обычно на участках и явно высоким уровне поля на модели, и могут представлять высокую вероятность пробоя диэлектрических поверхностей. Формы сигналов с медленными скоростями нарастания (длительность фронта порядка сотен микросекунд) создают значительно большее количество точек касания, включая касания и на участках с низким уровнем поля.

Основной вид напряжения, воздействию которого подвергается ЛА в процессе их прямого поражения молнией, имеет быстро нарастающую форму. Скорость нарастания этого напряжения зависит от процессов формирования разряда молнии. Как показывает анализ процессов формирования грозового разряда, эта скорость соответствует величинам 10^2-10^4 кВ/мкс [1.1, 1.2].

SAE ARP5412 [1.18] регламентирует эту форму основного сигнала как форму A (рис. 1.1 а) который нарастает со скоростью 1000 кВ/мкс (±50%) до тех пор, пока это нарастание не будет прервано пробоем через промежуточный воздушный зазор, в результате чего происходит прожог или пробой молнии сквозь объект, подвергающийся испытаниям. В этот момент напряжение падает до нуля. Скорость среза напряжения или время спада напряжения в том случае, если пробой не произойдёт (разомкнутая

цепь напряжения на генераторе напряжения молнии), не нормирована.

Форма B (рис. 1.1б) является формой сигнала грозового перенапряжения, которая была определена на основе многочисленных исследований и наблюдений, и рекомендована Международной электротехнической комиссией (МЭК) в качестве полной волны напряжения для испытаний на импульсный пробой диэлектрических элементов ТС и их изоляционных конструкций [1.4, 1.16, 1.17]. Этот сигнал возрастает до амплитудного значения за 1,2 мкс (± 20%) и спадает до половины его значения за 50 мкс (± 20%). Время нарастания сигнала до пика и время спада относятся к разомкнутой цепи напряжения генератора напряжения молнии и предполагается, что эта форма сигнала не ограничена прожогом или пробоем молнии сквозь объект, подвергающийся испытаниям.

Третий импульс формы C испытательного напряжения (модельная волна (рис. 1.1в)) отличается от первого импульса жесткой привязкой по времени к возникновению перекрытия промежутка между испытуемым объектом и высоковольтным электродом моделирующей установки, которое должно произойти через 2 мкс (±50%). Эта форма сигнала является напряжением укороченной (срезанной) формы, в которой пробой зазора между объектом, подвергающимся испытаниям, и испытательными электродами происходит за 2 мкс (± 50%). Амплитуда напряжения во время пробоя и скорость нарастания напряжения до пробоя не нормированы.

Форма сигнала D (рис. 1.1г) с медленным фронтом нарастания, имеющим продолжительность нарастания от 50 мкс до 250 мкс, что оставляет достаточное время для развития стриммера от объекта. Это должно создать высокую скорость удара молнии в ту зону, где вероятность попадания молнии ожидается ниже, чем в других зонах. Длительность времени до полуспада составляет 2000 мкс.

1.3.2 Нормированные значения идеализированных форм и амплитудно-временных параметров тока молнии полного воспроизведения

Внешние воздействующие факторы молнии, регламентированные SAE ARP5412 [1.18] включают в себя токовые составляющие **A, Ah, B, C, D** и **H**, а также пакеты форм сигналов множественных ударов и множественных вспышек. Множественные удары включают в себя составляющие **D** и **D/2**, а множественные вспышки включают в себя составляющую **H** последовательности импульсов.

Составляющие тока **A, B, C** и **D** включают в себя формы сигнала тока разряда молнии для оценки прямого воздействия молнии (рис. 1.2). Составляющие **A** и **D** тока и пакеты форм сигналов множественных ударов и множественных вспышек используются для оценки непрямого воздействия молнии (рис. 1.3, 1.4).

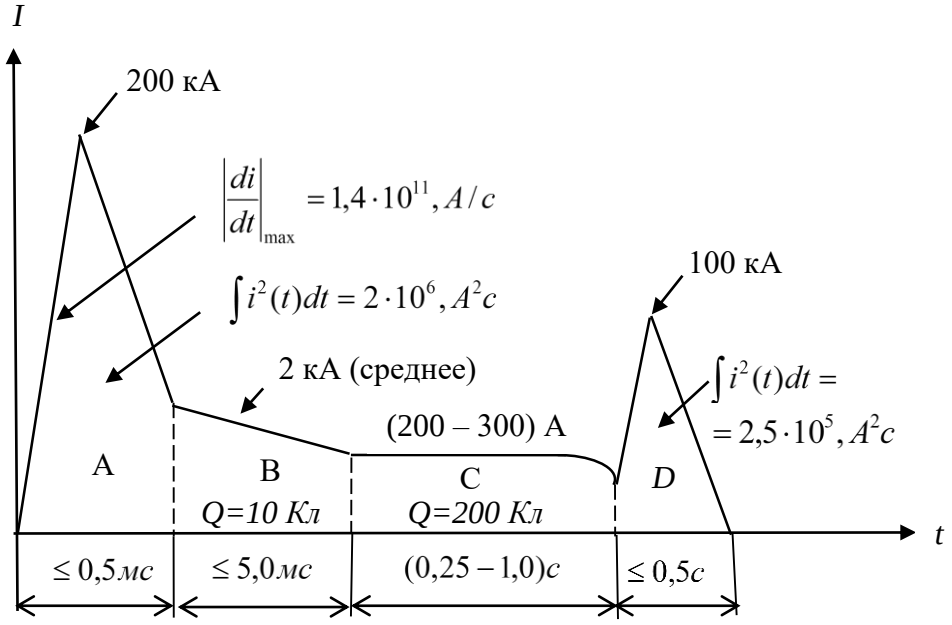


Рис. 1.2 – Составляющие тока молнии для испытаний на последствия прямого удара в ЛА [1.18, 1.19].

Компоненты **A, A_h, B, C, D** и **H** соответственно имитируют различные составляющие тока молнии полного воспроизведения натурной молнии:

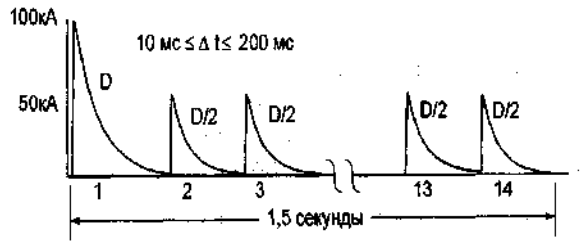


Рис. 1.3 - Пакет форм сигналов множественного удара [1.19].

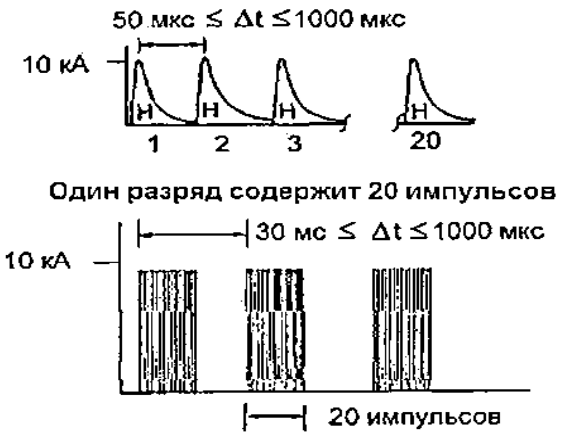


Рис. 1.4 - Пакет форм сигналов множественной вспышки [1.19].

A –данная форма сигнала объединяет несколько параметров как отрицательных, так и положительных обратных ударов молнии. Чаще всего используется при анализе последствий поражения самолетов молнией на малых высотах и учёта непрямого воздействия молнии на ЛА;

A_h – данная форма сигнала соответствует зоне переходного процесса первого обратного удара. Амплитуда и форма сигналов первых обратных ударов, которые могут попасть в самолёт, зависят от высоты полёта. В общем случае, малые амплитуды и малые значения интеграла действия могут ожидаться на больших высотах.

Эта форма сигнала применяется в зоне переходного процесса, зоне 1 С, и представляет предполагаемую форму первого обратного удара (составляющей А) на больших высотах;

B – средний (промежуточный) ток, имитирует среднюю фазу разряда молнии, представляет главным образом промежуточные токи, следующие после некоторых отрицательных начальных обратных ударов и/или повторных ударов молнии, которая характеризуется протеканием токов в несколько тысяч ампер в течение нескольких микросекунд и имитирует процессы, связанные со скользящими разрядами молнии по фюзеляжу ЛА;

C – постоянный или сопровождающий ток, который протекает во время разряда молнии. Эта составляющая тока представляет внешние воздействующие факторы молнии, которые могут быть вызваны большой продолжительностью тока, который может последовать после некоторых повторных ударов молнии с отрицательно заряженного облака на землю, а также после обратных ударов молнии с положительно заряженного облака на землю. Для

испытаний на прямое воздействие молнии составляющая С тока должна иметь амплитуду между 200 А и 800 А, продолжительность от 0,25 до 1 секунды и переносимый заряд 200 Кулон (± 20%). Иногда применяется модифицированная составляющая С – **С*** **(**рис. 1.5).

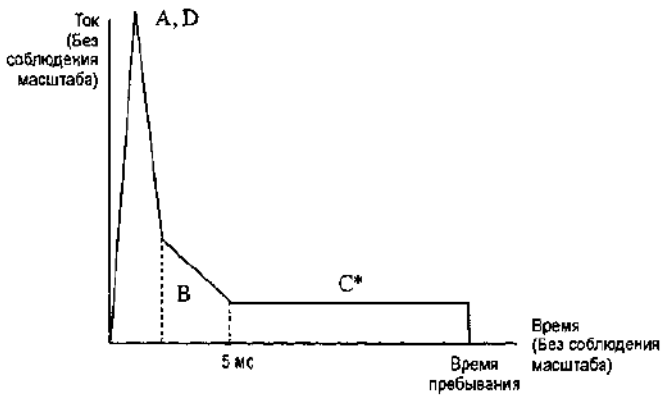


Рис. 1.5 - Применение составляющей С* тока [1.18].

Эта составляющая тока представляет часть составляющей С, которая протекает в точку касания в Зонах 1А или 2А, если время пребывания в этой точке превышает 5 мс. Составляющая С* тока используется прежде всего для оценки плавления металлической обшивки. Составляющая С* является током, усредняющим ток на уровне не менее 400 А, в течение периода, равного времени пребывания в точке касания минус 5 мс

длительности составляющей В. Комбинация составляющих А или D, В и С* представляет время пребывания в точке касания, которое может быть в диапазоне от 1 мс до 50 мс. Для самолётных поверхностей, отделанных обычной стандартной грунтовкой и краской, время пребывания в точке касания 20 мс обычно бывает достаточным. Другие поверхности могут испытывать более кратковременное или более продолжительное время пребывания в точке касания. Например, время пребывания от 1 мс до 5 мс типично для касания молнии к неокрашенным металлическим поверхностям, когда используются только составляющих А или D и В. Время пребывания на поверхности, имеющей покрытие, с особенно большой толщиной или с высокой диэлектрической прочностью может быть в диапазоне от 20 до 50 мс.

D – повторный ток по каналу разряда молнии, который имитирует последующий импульс тока молнии по одному каналу разряда. Составляющая D тока имеет два применения - для оценки прямого воздействия молнии и для целей анализа и учёта непрямого воздействия молнии.

Пакет форм сигналов множественного удара - во многих случаях наблюдается до 14 случайно распределённых ударов в разряде молнии с отрицательно заряженного облака на землю. Несколько импульсов амплитудой приблизительно 30 кА также могут возникнуть в случайной последовательности во *внутриоблачном* разряде молнии. Синтезированный пакет форм сигналов множественного удара определён, как составляющая D тока, за которой следуют 13 составляющих D/2. Составляющие D/2 распределены случайно в интервале времени (периоде) длительностью до 1,5 секунд, в соответствии со следующими ограничениями: минимальное время между составляющими равно 10 мс, максимальное время между составляющими равно 200 мс. Основным назначением пакета форм сигналов множественного удара молнии является оценка функциональных нарушений в работе систем, которые могут быть восприимчивы к переходным процессам, наведенным множественными ударами. Пакет форм сигналов множественного удара молнии используется только для оценки непрямого воздействия молнии.

Пакет форм сигналов множественной вспышки - включает в себя формы сигналов составляющей **H**. Составляющая **H** представляет импульс с высокой скоростью нарастания, а амплитуда и время длительности значительно меньше, чем у импульса обратного удара. Было установлено, что такие импульсы возникают в группах вначале удара молнии в самолёт и случайно распределены на всём протяжении длительности разряда молнии вместе с другими составляющими тока молнии. Хотя вероятность физического повреждения самолёта и носового обтекателя не кажется возможной, но повторяющийся характер этих импульсов может создавать помехи или нарушать работу некоторых систем. Рекомендуемый пакет форм сигналов множественной вспышки включает в себя повторяющиеся формы сигналов составляющей **H** в трёх вспышках по 20 импульсов каждый. Минимальное время между наведенными импульсами составляющей H в пределах длительности взрыва составляет 50 мкс, а максимальное время равно 1000 мкс. Три вспышки описаны в соответствии со следующими ограничениями - минимальное время между вспышками равно 30 мкс, максимальное время между вспышками равно 300 мкс, продолжительность пакета форм сигналов множественной вспышки будет составлять 0,62 секунды. Основным назначением пакета форм сигналов

множественной вспышки является оценка функциональных нарушений в работе систем, которые могут быть восприимчивы к переходным процессам, наведенным множественными ударами.

Основные нормируемые параметры импульсов тока форм **A, B, C и D** согласно FAA AC № 20 - 55A и SAE ARP 5412 представлены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 – Основные нормируемые параметры форм испытательного тока молнии

Форма импульса тока	**A**	**B**	**C**	**D**
Максимальный ток I_m, кА	200±10%	–	–	100±10%
Длительность фронта $\tau_ф$, мкс (интервал времени 10% - 90% максимального значения тока)	≤ 50	–	–	≤ 25
Длительность импульса, $\tau_и$,мкс (до 1% максимального значения тока)	≤ 500	$(5 \cdot 10^3)$ ± 10%	(0,25÷1) с	≤ 500
Переносимый заряд *Q*, Кл	–	10±10%	200±10%	–
Интеграл действия *J*, $А^2 \cdot с$	$2 \cdot 10^6$±20%	–	–	$0{,}25 \cdot 10^6$±20%
Средний ток импульса $I_{ср}$, кА	–	2	0,2÷0,8	–

Примечание. 1. Интеграл действия *J* определяется как - $J = \int_{t_1}^{t_2} i^2(t)dt$;

2. Заряд Q, переносимый током, определяется как - $Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t)dt$,

где (t_1–t_2) – интервал времени, соответствующий нормам для компоненты тока.

Каждая из приведенных компонент тока молнии полного воспроизведения соответствует характерным последствиям поражающего (разрушающего) воздействия тока молнии (табл. 1.3).

Таблица 1.3 – Последствия поражающих (разрушающих) воздействий компонент тока молнии на ЛА

Последствия воздействий тока молнии	Параметр, связанный с током молнии	Компонента полного тока молнии
Динамические и термические воздействия		
Пробой, прожиг фюзеляжа металлической обшивки ЛА Повышение температуры «горячих точек» Нарушение механической прочности обшивки	Заряд ($\int i(t)dt$)	**B, C**
Магнитные силы	$i^2(t)$	**A**
Дробление композиционных конструкций Возгорание топлива Разрушение болтовых соединений Искрения	Интеграл действия ($\int i^2(t)dt$)	**A, D**
Электромагнитные воздействия		
Наведенные напряжения и токи во внешних и внутренних цепях ЛА Искровые перекрытия	$i(t)$ $di(t)(/dt$	**A** **A**

Применение форм сигналов внешних воздействующих факторов молнии и составляющих форм тока для воздействия на определённые зоны самолёта, осуществляется согласно документу ARP 5414 [1.20], как показано в табл. 1.4.

Таблица 1.4 - Применение внешних воздействующих факторов молнии для воздействия на зоны самолёта [1.20].

Зоны самолёта	Формы сигналов напряжения	Формы сигналов тока
1A	A, B, D	A, B, C*, H
1B	A, B, D	A, B, C, D, H
1C	A	A_h, B, C*, D, H
2A	A	D, B, C*, H
2B	A	D, B, C, H
3		A, B, C, D, H

Примечание. «Подпакеты» этих форм сигналов также должны быть использованы для оценки прямого и непрямого воздействия молнии. Формы сигналов, предназначенных для исследования прямого воздействия молнии, включают в себя напряжения форм A, B, C, D и составляющие тока: A, Ah, B, C, C* и D. Формы сигналов, предназначенных для исследования непрямого воздействия молнии, включают в себя составляющие тока A, D и H, являющиеся индивидуальными составляющими одиночного удара молнии, пакет форм сигналов множественного удара и пакет форм сигналов множественной вспышки.

Поскольку большая часть конструкции самолёта находится в пределах Зоны 3, одиночный удар молнии, пакет форм сигналов множественного удара и пакет форм сигналов множественной вспышки применяются почти всегда. Однако, в Зоне 2 могут быть особые случаи, где самолётные системы или подсистемы и их провода изолированы от воздействия начальной составляющей A тока молнии, а составляющая D тока более применима для оценки одиночного удара молнии. Кроме того, возможны ситуации, в которых система (то есть изделие из состава оборудования и связанные с ним провода) размещена отдельно, самостоятельно в пределах одной зоны самолёта (например, в носовом отсеке оборудования) и, следовательно, эта система не может подвергаться воздействию всех видов ударов молний с теми уровнями, которые определены пакетом форм сигналов множественного удара.

1.3.3 Нормированные значения форм и амплитудно-временных параметров тока молнии частичного воспроизведения

Зачастую, полный ток натурной молнии (см. рис. 1.1) в лабораторных условиях не может быть воспроизведен

полностью. Для этого требуется специальное дорогостоящее высоковольтное оборудование. В этой связи, для испытаний, можно моделировать отдельные компоненты полного тока молнии.

Так для испытаний конструкций ЛА на термическую и динамическую стойкость в [1.21] рекомендовано использовать импульсы тока молнии, приведенные на рис. 1.6.

Сильный ток (рис. 1.6 а) воспроизводит колебательную составляющую тока молнии, связанную с первым ее возвратным ударом с амплитудой 200 кА и основной частотой 10 кГц. Предназначена для испытаний обшивки ЛА на возникновение искрений, динамических усилий, уплотнений и взрывного дробления материала корпуса в месте контакта с каналом молнии.

Средний ток (рис. 1.6 б) воспроизводит среднюю фазу разряда молнии, которая характеризуется протеканием тока с амплитудой 2 кА в течение 5 мс. Эта составляющая должна переносить заряд 10 Кл (±20%). Предназначена для проведения испытаний на разрыв и продавливание металлических поверхностей обшивок корпусов ЛА в месте контакта с каналом молнии.

Непрерывный ток (рис. 1.6 в) воспроизводит постоянную составляющую сопровождающего тока молнии, протекающего по каналу между повторными разрядами. Эта составляющая должна переносить заряд 200 Кл (±20%) за время (0,25 – 1,0) с. Амплитуда тока молнии соответственно должна быть в пределах от 200 до 800 А. Предназначена для испытаний на ожоги (прожоги) металлических поверхностей обшивок конструкций ЛА в месте контакта с каналом молнии.

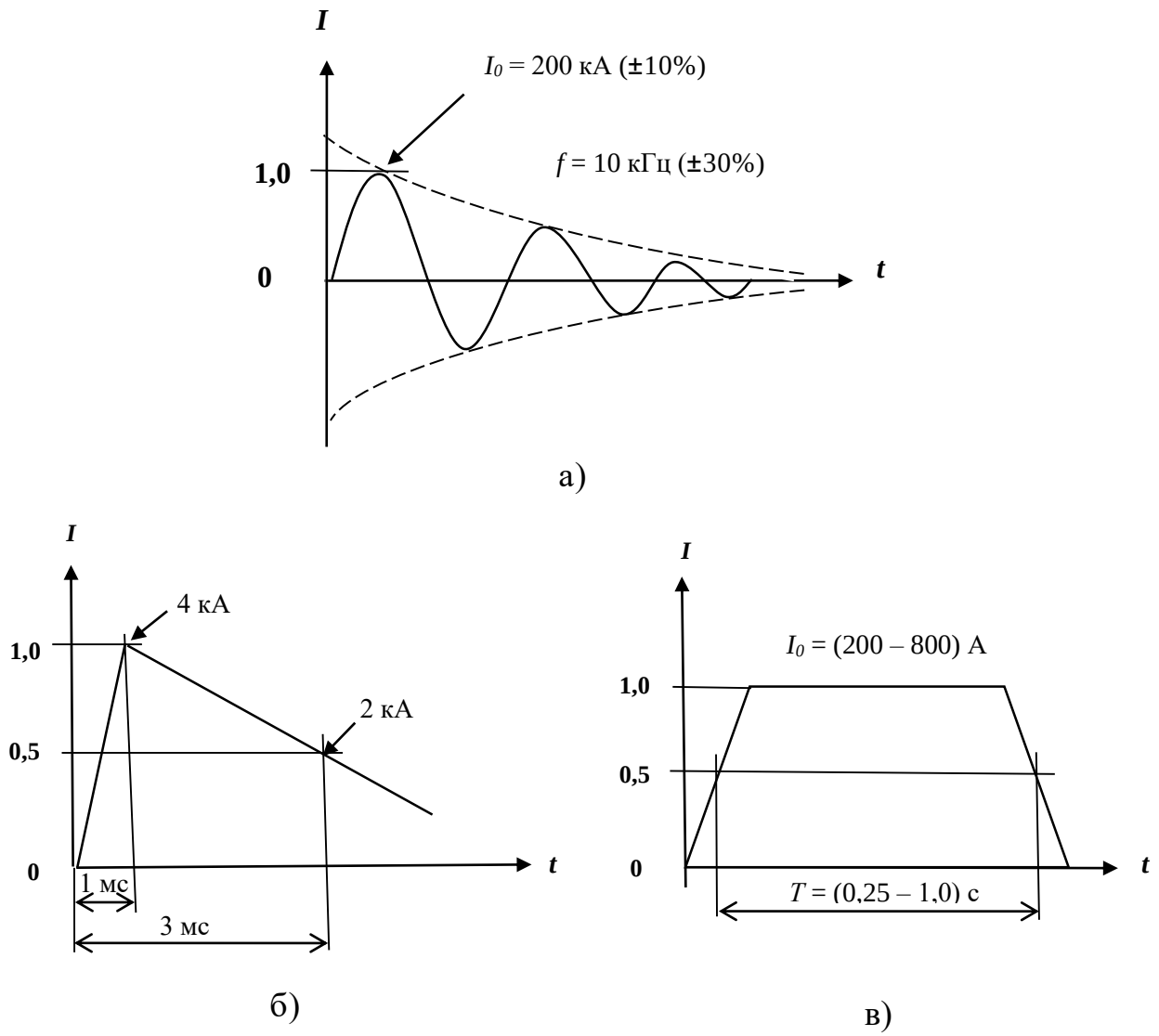


Рис. 1.6 – Формы импульсов тока молнии частичного воспроизведения для испытаний РКТ и ЛА на термическую стойкость обшивок [1.24]
а – сильный ток;
б - средний ток;
в – непрерывный ток.

Как следует из [1.1, 1.22 - 1.26], наиболее близким по своим *электромагнитным воздействиям* на радио- и электротехническое оборудование обладает импульс тока молнии экспоненциальной формы с временными параметрами 2/50 мкс, приведенный на рис. 1.7.

Данный импульс наиболее полно воспроизводит ток молнии главной и повторной стадий разряда. При этом, максимальное

значение импульсов тока при испытаниях выбирается в зависимости от вида объекта и степени жесткости испытаний.

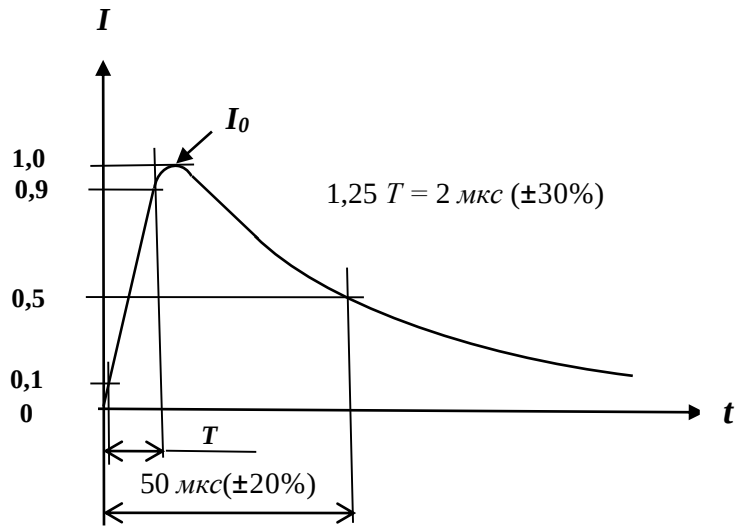


Рис. 1.7 – Форма испытательного импульса тока молнии на электромагнитные воздействия.

В ГОСТ 30585 – 98 [1.27], который применяется в Украине и странах СНГ, эти значения определены равными 200 кА, 100 кА и 30 кА. Максимальные значения испытательных импульсов тока равные 200 кА (±10%) и 100 кА (±10%) рекомендована для испытаний на молниестойкость ЛА, систем автоматизированного управления технологическими процессами и аварийной защиты, используемые на взрыво- и экологически опасных объектах (АЭС, нефте- и газохранилищах, станциях управления и контроля магистральных продуктопроводов и т.п.).

В настоящее время в большинстве международных нормативных документах по обеспечению молниестойкости радио- и электротехнического оборудования, и, прежде всего, ЛА [1.2, 1.25, 1.28] опираются на основные нормируемые параметры тока молнии приведенные в табл. 1.5.

Таблица 1.5 - Нормированные значения основных параметров тока наземной молнии отрицательной полярности.

Нормативный документ	Первый удар		Последующий удар	
	I_M, кА	*di(t)(/dt*, кА/мкс	I_M, кА	*di(t)(/dt*, кА/мкс
IEC/TC 81	200	200	50	300
VG 969	200	200	50	200
KTA 2206	100	100	50	200
NASA 1008	200	100	50	25
MIL STD 1757A	200	100	100	—
DOD STD - 1795	200	140	100	—
НЛГС - 3	200	100	—	—
ГОСТ 30585 – 98 (ДСТУ 3681-98).	200	100	100	100

Импульс тока с максимальным значением 30 кА (±10%) применяется для испытаний на молниестойкость радио- и электротехнического оборудования объектов промышленного и народно-хозяйственного назначения, аварии на которых вследствие грозовых воздействий не приводят к серьезным катастрофическим последствиям.

Для проведения испытаний на молниестойкость также могут быть использованы токи, частично воспроизводящие те или иные эффекты воздействия токов молнии на ТС, при ее прямом ударе. Такие токи частичного воспроизведения очень эффективны при экспериментальном определении критичности ТС на тот или иной вид воздействия токов молнии.

Сюда, прежде всего, относятся *испытательный импульс тока молнии*, *импульс тока молнии уменьшенной амплитуды и демпфированный колебательный импульс.*

Так, *испытательный импульс тока молнии*, представляет собой срезанную волну тока со скоростью нарастания на ее линейном участке не менее 50 кА/мкс (±20%) и минимальной амплитудой 50 кА (±10%) (рис. 1.8. а). Последствия воздействия

данный волны тока позволяет выявить блоки, узлы и системы, чувствительные к быстрым изменениям тока во времени, и испытать эти средства на молниестойкость к воздействию фронтовой части тока молнии при ее прямом ударе в ЛА.

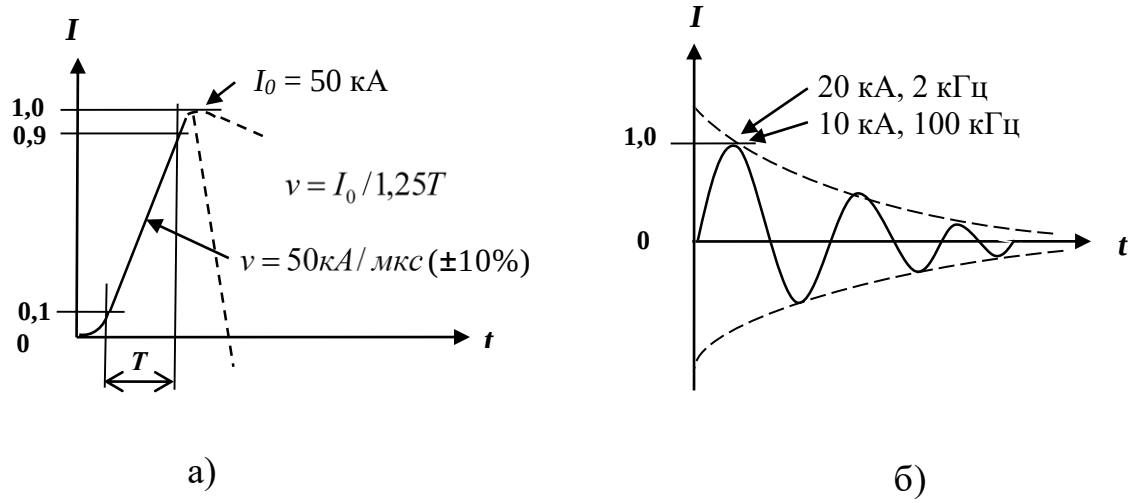


Рис. 1.8 – Формы импульсов тока молнии частичного воспроизведения
а – испытательный импульс;
б – демпфированный колебательный импульс.

Иногда с целью исследований воздействий токов прямого удара молнии допускается применять *импульс тока* с временными параметрами 2/50 мкс (см. рис. 1.7) *уменьшенной амплитудой* в 100 А (±10%), при условии дальнейшей экстраполяции результатов его воздействия на более высокие уровни токов, соответствующих натурным. Очевидно, что такой испытательный импульс тока может быть использован только для тех изделий, которые содержат в своей основе системы с элементами, обладающими линейными характеристиками.

Демпфированный колебательный импульс (рис. 1.8 б) имитирует низкочастотные и высокочастотные эффекты воздействия тока молнии на ЛА. Для оценки низкочастотного воздействия применяются импульсы с минимальной амплитудой 20 кА (±10%) и частотой колебания 2 кГц (±20%). Для оценок высокочастотного воздействия тока молнии минимальная

амплитуда данного вида импульса должна равняться 10 кА (±10%), а частота колебания - 100 кГц (±30%). При этом, демпфирование амплитуды пятого полупериода этих импульсов должны составлять 5% по сравнению с амплитудой первого полупериода [1.1, 1.18].

Выбор данных частот и амплитуд в качестве базовых для испытательных импульсов явился не случайным, а определялся исходя из анализа амплитудно-частотных и энергетических спектров импульсов тока натурной молнии [1.23].

1.4 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров ВВФ ЭМП грозовых разрядов

В процессе эксплуатации ЛА в условиях активной грозовой деятельности радио- и электротехническое оборудование этих средств подвергается поражающим воздействиям и дестабилизирующим влияниям грозовых электрических и магнитных (электромагнитных) полей. В главе 2 тома 2 отмечено, что эти поля включают в себя электрические поля предгрозового периода и лидерной стадии молнии, импульсные электрические и магнитные поля, создаваемые каналом грозового разряда в ближней зоне формирования, а также электромагнитные поля излучения канала молнии – ГЭМИ, соответствующий дальней (волновой) зоне формирования.

Таким образом, испытания ЛА на стойкость к воздействиям электромагнитных полей грозовых разрядов включают следующие виды испытаний [1.1, 1.2, 1.27]:

- импульсным электрическим полем;
- импульсным магнитным полем;
- грозовым электромагнитным импульсом (ГЭМИ).

Амплитудно-временные параметры испытательных ВВФ ЭМП грозовых разрядов регламентированы межгосударственным стандартом ГОСТ 30585-98 [1.27]. При этом различают два вида грозового электромагнитного воздействия на ЛА – ближнюю и дальнюю зоны формирования [1.1 – 1.3]. Ближняя зона излучения молнии для грозовых разрядов облако-земля отрицательной полярности определяется расстояниями менее 10 км от канала разряда, дальняя зона – от 10 км и более. Следует отметить, что в

стандарте [1.8] требования к параметрам электрического и магнитного полей оцениваются для случая нахождения канала молнии (силой тока 200 кА) на расстоянии 10 м от объекта. Считается, что более близкий удар с высокой вероятностью перейдет в прямое поражение объекта. Очевидно, что это расстояние зависит от размеров самого объекта, прежде всего его высоты. Практического опыта проведения таких испытаний в Украине пока нет.

Сравнительный анализ амплитудных параметров и временных характеристик грозовых электромагнитных полей, показывает, что для испытаний ЛА на стойкость к воздействию электромагнитных полей грозовых разрядов, в частотности, напряженности электрических полей предгрозового периода, лидерной стадии и электрическая составляющая поля главной стадии разряда молнии могут быть объединены в единое целое. Иными словами воздействие каждого из перечисленных видов электрических полей на ЛА можно, без особого ущерба для результатов испытаний, заменить неким одним воздействующим электрическим полем.

Так в [1.2] показано, а в [1.27] регламентировано, что таким эквивалентом может служить импульсное электрическое поле с максимальным значением, амплитуды изменяющейся в пределах от 50 до 300 кВ/м (±10%), длительностью фронта - 100 мкс (±20%) и длительностью полуспада импульса - 10 мс (±20%).

Действительно, данный импульс напряженности электрического поля вобрал в себя наиболее критичные параметры (амплитуды, скорости изменения во времени на фронте и длительности импульсов) перечисленных выше напряженностей электрических полей, характерных для различных стадий грозовой деятельности и служит для испытаний ТС на воздействие электрических полей ближней зоны грозовых разрядов. На рис. 1.9 *а* приведен испытательный импульс напряженности электрического поля грозового разряда ближней зоны.

Для испытаний ТС на электромагнитную стойкость к поражающему воздействию и дестабилизирующему влиянию магнитных полей ближней зоны грозовых разрядов используют испытательный импульс магнитного поля по форме близкий к

току в канале разряда молнии. Такая форма испытательного импульса напряженности магнитного поля приведена на рис. 1.9 б. Его амплитуда в зависимости от степени жесткости испытаний меняется от 50 до 300 А/м (±10%) длительность фронта импульса составляет 2 мкс (±30%) и длительность полуспада импульса - 50 мкс (±20%) [1.27].

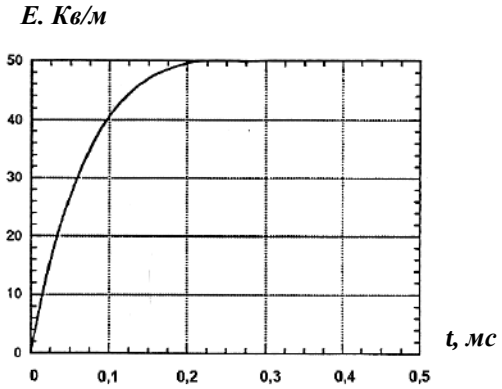
Испытания ТС на стойкость к воздействию ГЭМИ требует воспроизведения электромагнитного поля с пространственной структурой, соответствующей свойствам плоской ТЕМ волны, с соотношением амплитуд Е/Н = 120π Ом и имеющей форму, приведенную на рис. 1.9 в.

Амплитудно-временные характеристики при этом должны иметь следующие значения: диапазон изменения амплитуд по электрическому полю в зависимости от степени жесткости испытаний от 15 до 100 кВ/м (±10%), длительность фронта импульса - 0,1 мкс (±30%) и длительность полуспада импульса - 1,0 мкс (± 20%) [1.27].

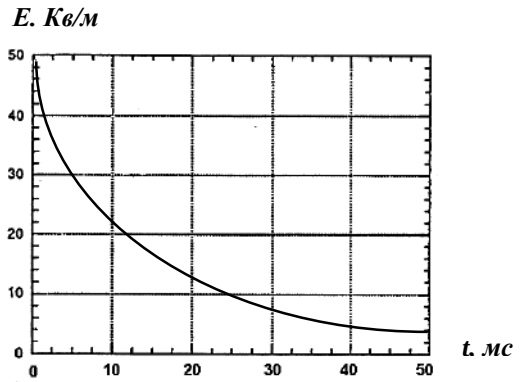
Магнитные компоненты полей ГЭМИ для дальней зоны излучения молнии облако-земля определяются из напряженности электрического поля излучения через волновое сопротивление среды распространения $Z_0 = 120\pi$ Ом как $H_0 = E_0/Z_0$.

Временные параметры испытательных импульсов охватывают достаточно широкий диапазон от долей микросекунд до десятков миллисекунд. В этой связи и основные несущие частоты этих импульсов также будут лежать в широком диапазоне.

Для определения граничных частот высшего (f_1) и низшего(f_2) порядка в спектре импульса справедливы выражения: $f_1 \approx 0.25/\tau_ф$ и $f_2 \approx 0.25/\tau_и$ (рис. 1.10)

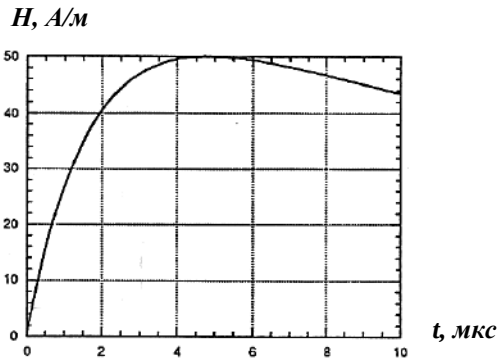


(фронт импульса)

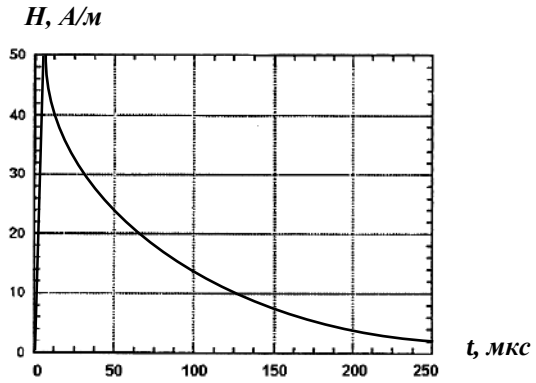


(спад импульса)

а)

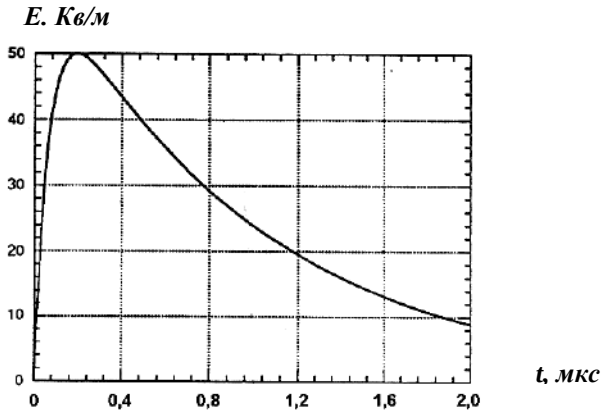


(фронт импульса)



(спад импульса)

б)



в)

Рис. 1.9 - Типовые формы ВВФ ЭМП грозовых разрядов ближней (а,б), и дальней (в) зон формирования

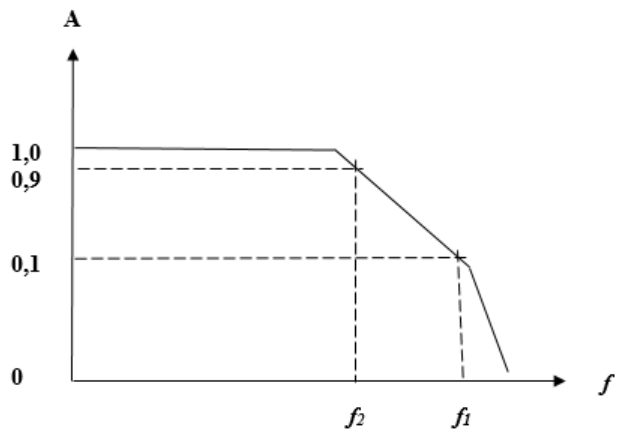


Рис. 1.10 – К определению граничных частот высшего и низшего порядка в спектре импульса

В табл. 1.6 приведены значения граничных частот в спектре импульсов ВВФ ЭМП ближней и дальней зон излучения молнии облако-земля отрицательной полярности.

Таблица 1.6 – Значения граничных частот высшего и низшего порядка в спектрах ВВФ ЭМП грозовых разрядов

ВВФ ЭМП ГР	Частоты высшего порядка, f_1,	Частоты низшего порядка, f_2,
Ближняя зона Электрическое поле Магнитное поле	2,5 кГц 0,125 МГц	0,025 кГц 5 кГц
Дальняя зона Электромагнитное поле	2,5 МГц	0,25 МГц

С точки зрения основных поражающих воздействий на ЛА наиболее критичным видом воздействия является ГЭМИ. Это связано с достаточно большими амплитудами, большими скоростями нарастания и присутствием в этой форме импульса высокочастотных составляющих мегагерцового диапазона. Однако, с точки зрения проникновения электромагнитных полей в корпуса-экраны ЛА, критичным является также ВВФ ЭМП формируемые в ближней зоне излучения молнии, так как эти формы содержит в своем спектре низкочастотные составляющие килогерцового диапазона.

1.5 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ТС и ЛА при воздействии грозовых разрядов.

1.5.1 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений, возникающих в опасных трактах технических средств при воздействии грозовых разрядов

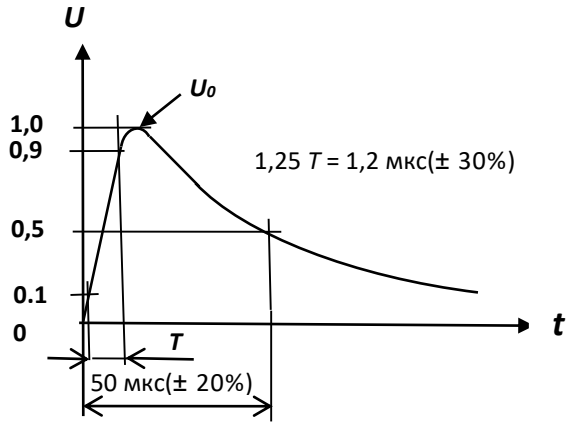
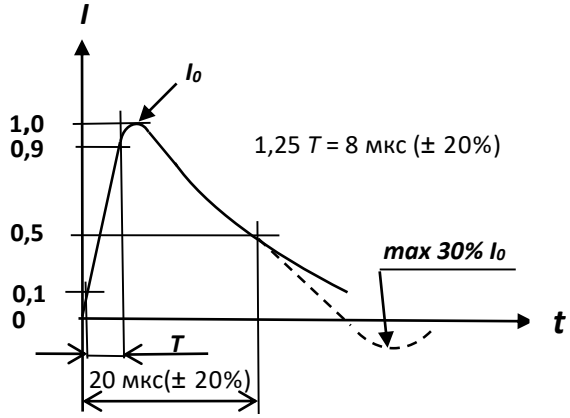
Испытания на молниестойкость токами и напряжениями, возникающими в опасных трактах технических средств (ТС) наземного базирования, применяют для [1.29]:

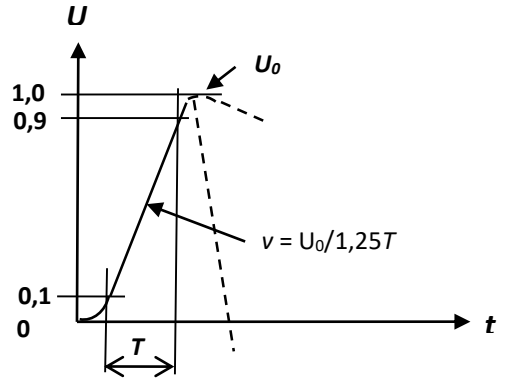
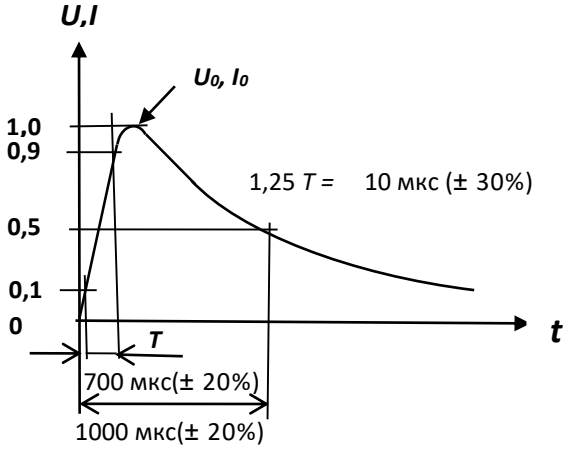
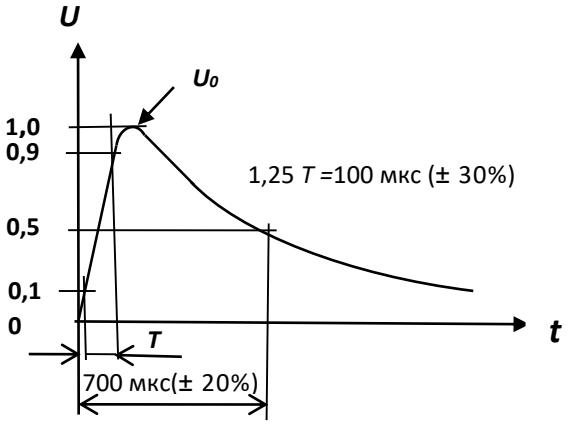
- ТС, которые по тем или иным причинам не могут быть испытаны на молниестойкость методом воспроизведения поражающих факторов грозовых разрядов (большие габариты, невозможность доставки к месту испытаний и т.п.);
- хорошо экранированных ТС, которые в условиях эксплуатации подключаются к сетям электропитания, имеют протяженные линии управления, передачи информации или коммуникации;
- испытаний систем грозозащиты входных (выходных) цепей ТС.

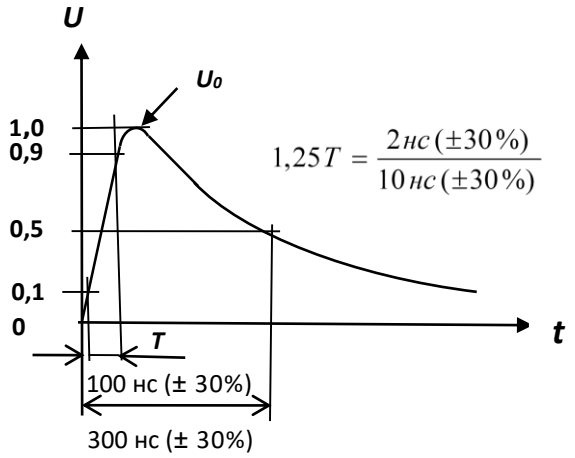
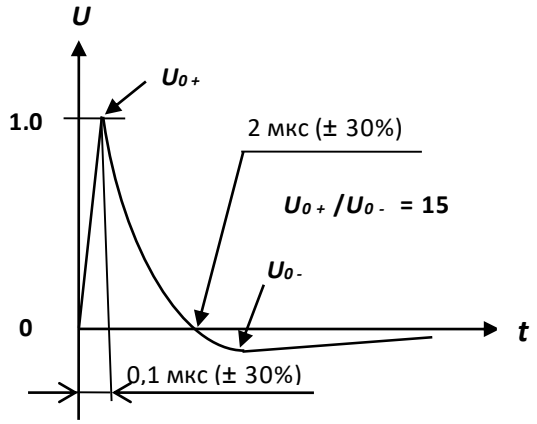
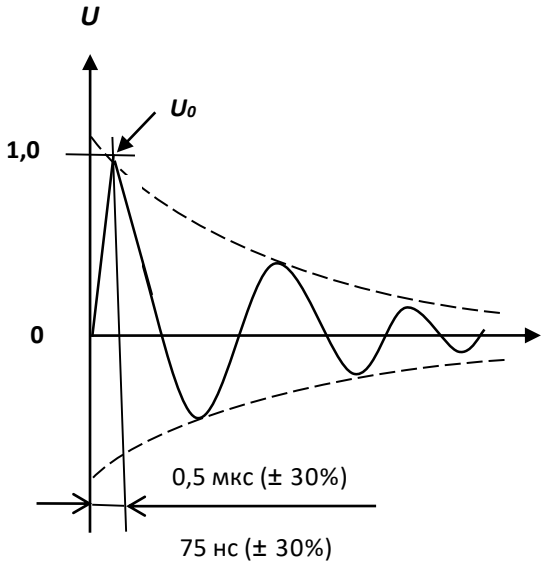
Для успешной реализации данного вида испытаний, прежде всего, необходимо знать наиболее вероятные амплитудно-временные характеристики токов и напряжений, которые возникают в опасных трактах ТС при воздействии грозовых разрядов и их нормированные значения.

В табл. 1.7 приведен свод [1.1, 1.29 – 1.31] импульсов тока и напряжения, применяемых для проведения грозовых испытаний по входным и выходным цепям (опасным трактам) ТС.

Таблица 1.7 – Параметры и назначение импульсов напряжения и тока, регламентированных для проведения грозовых испытаний по опасным трактам ТС.

Форма и основные параметры	Краткая характеристика и назначение
1	2
1. Импульс напряжения 1,2/50 мкс  	Предназначен для испытаний ТС на помехоустойчивость по входам (выходам) импульсами с амплитудой до 4 кВ, и испытаний на молниестойкость элементной базы входных (выходных) цепей ТС, подключаемых к воздушным линиям связи и цепям электропитания, импульсами с амплитудой до 20 кВ, включая испытания на электрическую прочность изоляции входных (выходных) цепей;
2. Импульс тока 8/20 мкс  	Предназначен для испытаний на энергетические оборудования в режиме короткого замыкания ударными токами соответствующих амплитуд, испытаний газоразрядных средств грозозащиты ТС импульсами тока 5 – 30 кА, грозовых испытаний ТС, содержащих индуктивно связанные цепи импульсами с амплитудой до 2 кА и испытаний на молниестойкость входных (выходных) цепей ТС, подключаемых к подземным кабельным линиям связи импульсами с амплитудой до 20 кА;

1	2
3. Импульс напряжения с линейно-нарастающей амплитудой (100, 500, 5000 и 10 000) В/мкс (± 10%)  	Предназначены для испытаний газоразрядных средств грозозащиты ТС. Подаются вплоть до наступления искрового пробоя в защитном средстве (срабатывании разрядника)
4. Импульс напряжения (тока) 10/700 мкс и 10/1000 мкс  	Предназначены для испытаний на молниестойкость элементной базы входных (выходных) цепей и систем ТС, подключаемых к телекоммуникационным линиям в зависимости от их вида импульсами напряжения с амплитудой от 1 до 2,5 кВ и тока с амплитудой от 50 до 500 А;
5. Импульс напряжения 100/700 мкс  	Предназначен для грозовых испытаний на стойкость входных цепей ТС при вводах с ПКЛС импульсами напряжения с амплитудой 100 – 500 В, элементной базы входных цепей ТС импульсами напряжения с амплитудой 1 – 5 кВ и цепей электропитания ТС импульсами напряжения с амплитудой до 1 кВ.

1	2
6. Импульсы напряжения 2/100 нс и 10/300 нс  $1{,}25T = \frac{2нс(\pm 30\%)}{10нс(\pm 30\%)}$	Предназначены для испытаний дестабилизирующего влияния на функционирование ТС коммутационных помех грозового происхождения в цепях электропитания импульсом напряжения 2/100 нс с амплитудой до 2,5 кВ и импульсом напряжения 10/300 нс до 5 кВ.
7. Биполярный импульс напряжения  	Предназначен для испытаний входных(выходных) цепей антенно-фидерных трактов ТС, и входных (выходных) цепей межблочных линий связи, импульсами с амплитудой до 2 кВ;
8. Демпфированный колебательный импульс напряжения «звенящая волна» и «затухающие колебания»  	Предназначены для резонансных испытаний входных (выходных) цепей ТС импульсами напряжения с амплитудой до 2,5 кВ. ***«звенящая волна»*** время нарастания на фронте до U_0 - 0,5 мкс (±30%); частота последующих колебаний - 100 кГц (±20%) ; характер демпфирования - каждый последующий пик колебания составляет 60 % от предыдущей амплитуды ***«затухающие колебания»*** время нарастания на фронте до U_0 - 75 нс (±30%); частота последующих колебаний 0,1 МГц (±20%), 1 МГц(±30%), 10 МГц (±30%);характер демпфирования - 60 % от амплитуды первого пика через 3 - 6 периодов колебаний.

Приведенные в табл. 1.7 импульсы напряжения и тока в основном охватывают все возможные их виды, предназначенные для проведения испытаний ТС на стойкость к воздействию токов и напряжений, возникающих в опасных трактах этих средств, при грозовых воздействиях.

1.5.2 Нормированные значения основных форм и амплитудно-временных параметров токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ЛА при воздействии грозовых разрядов

Большое значение для обеспечения молниестойкости ЛА имеют испытания на поражающее воздействие токов растекания молнии по обшивке ЛА. Высокая поражающая эффективность токов растекания объясняется тем, что в межблочных линиях связи возникают наведённые импульсы высокого напряжения и большие токи, представляющие собой серьёзную угрозу для современной слаботочной электроники бортового оборудования ЛА.

Формы испытательных воздействий по ARP 5412 [1.18]. Внешние воздействующие факторы молнии взаимодействуют с ЛА, в результате чего в проводниках, таких как монтаж оборудования внутри ЛА, наводятся токи и напряжения.

Высокие амплитуды и скорости изменения составляющих A, D и H создают основные наведенные переходные процессы в монтаже ЛА. Составляющие B и C не создают существенных переходных процессов.

Существует несколько механизмов, посредством которых внешние воздействующие факторы молнии создают переходные процессы. Укрупненно эти механизмы можно разделить по виду связи: связь через отверстие (апертурная связь) и гальваническая связь (резистивная связь). Большинство фактически наведенных переходных процессов имеют сложную форму сигнала в результате комбинированного действия обоих механизмов связи. Доказано, что для целей проектирования и проверки правильности действия наиболее практичным является разделение этих механизмов и определение пакета более простых форм сигналов, описанных далее.

Магнитные поля, проникающие через отверстия, могут индуцировать:

– ток, форма сигнала которого создаётся внешними воздействующими факторами молнии, сигналом формы A, в

проводниках или в экранах, заканчивающихся на конструкции, через низкое входное сопротивление на обоих концах (рис. 1.11);

– напряжение, форма сигнала которого является вторичной производной от создаваемой внешними воздействующими факторами молнии сигналом формы А, в петлях, существующих между проводами (кабелями) и конструкцией (рис. 1.12).

– электрические и/или магнитные поля, проникающие через отверстия, будут производить или возбуждать резонансы в проводах (кабелях), которые будут создавать колебательные токи и напряжения, имеющие форму затухающей синусоиды. Частота будет зависеть от длины конструкции и/или от длины провода (кабеля) и от заделки концов (длины заземляющих проводников на концах). Чаще всего частоты находятся в диапазоне от 1 МГц до 10 МГц; другие частоты за пределами этого диапазона тоже иногда наблюдаются (рис. 1.13).

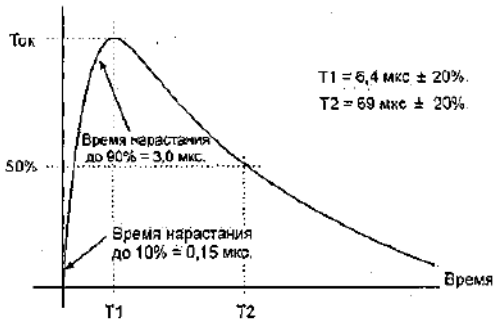


Рис.1.11 - Форма 1 двойного экспоненциального сигнала тока

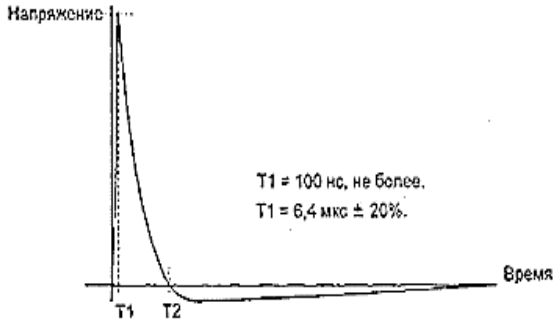


Рис. 1.12 - Форма 2 двойного экспоненциального сигнала наведенного напряжения

Рис. 1.13 - Форма 3 сигнала напряжения / тока в виде затухающей синусоиды

Механизмы конструкционных резистивных напряжений и связь за счёт диффузии создают напряжения в петлях, существующих между проводами (кабелями) и конструкцией. Эти напряжения являются суммой конструкционных напряжений между концами проводов (кабелей) и напряжениями, создаваемыми полями, проникающими сквозь конструкционные материалы в результате диффузии. Эти напряжения могут иметь форму сигнала формы А, создаваемого внешними воздействующими факторами молнии для конструкций с низким электрическим сопротивлением или форму замедленного двойного экспоненциального сигнала для конструкций с высоким электрическим сопротивлением. Однако, в этом последнем случае уровни напряжений оказываются значительно меньше и малозначащими последствиями. Следовательно, чаще всего форма напряжения переходного процесса (рис. 1.14) такая же как у составляющей А тока разряда молнии. Этот вид формы сигнала напряжения появляется также на проводниках внутри экранов вследствие действия тока, протекающего по экрану, и трансформации через сопротивление связи экрана.

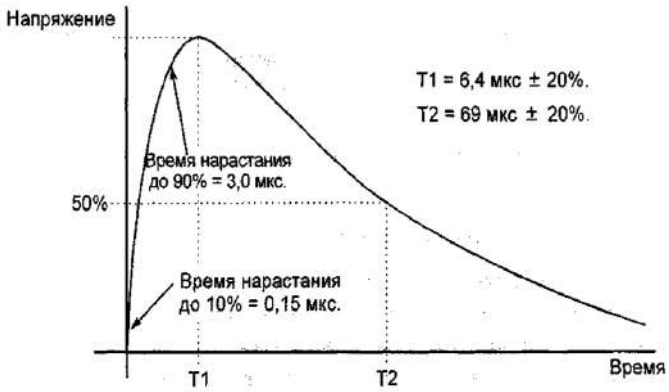


Рис. 1.14 – Форма 4 сигнала напряжения

Ток в проводах (кабелях) с низким сопротивлением нагрузки присоединённых на обеих концах сторон к конструкции, вызывает процесс перераспределения, связанного с относительно высокой индуктивностью контура «провод (кабель) - конструкция».

Внутри конструкции самолёта, изготовленной из хорошего проводника, такого как алюминий, ток в проводах будет протекать в течение длительного времени, но будет иметь незначительную амплитуду. Для проводов (кабелей) внутри конструкций с более высоким сопротивлением таких, например, как углеволоконный композитный материал, ток может иметь форму удлинённого двойного экспоненциального сигнала и иметь значительную амплитуду. Формы этих сигналов могут меняться в

широких пределах, но две формы сигнала определены как перекрывающие различные обстоятельства и условия. Это формы сигналов, имеющие время нарастания и спада 40 мкс и 120 мкс, соответственно (рис. 1.15), а также 50 мкс и 500 мкс (рис. 1.16).

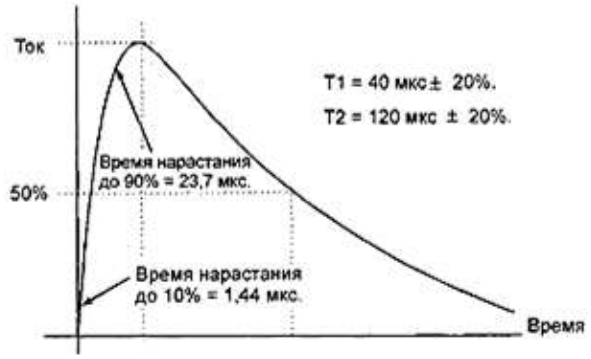


Рис. 1.15 – Форма 5А сигнала тока

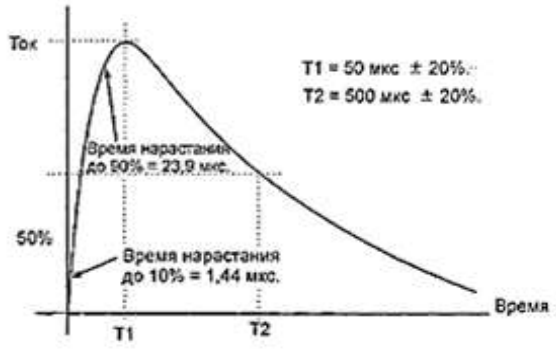


Рис. 1.16 – Форма 5В сигнала тока

Ток на проводящих конструкциях с частотными характеристиками, определяемыми длиной конструкции, может индуцировать ток и напряжение, непосредственно в жгутах проводов (кабелей) (рис.1.13). Частоты обычно находятся в диапазоне от 1 МГц до 10 МГц.

Переходные процессы множественного удара включают в себя первый переходной процесс, который связан с первым отрицательным обратным ударом (Составляющая D), за которым следует 13 переходных процессов, которые связаны с последующими отрицательными обратными ударами.

Реакция объекта в виде переходных процессов, возникающих из составляющих H пакета форм сигналов множественного разряда, также может произойти в виде последовательности сигналов этой формы. Преобладающей формой сигнала в реакции системы является Форма $З_Н$ сигнала напряжения в диапазоне частот от 1 МГц до 10 МГц (см. рис. 1.13) или форма сигнала тока (рис. 1.17), которая имеет такую же форму, как Составляющая H внешних воздействующих факторов молнии.

В этом последнем случае, для целей испытаний время нарастания Составляющей H может быть эффективно создано с помощью тока Формы $З_н$ сигнала на частоте 5 МГц и выше.

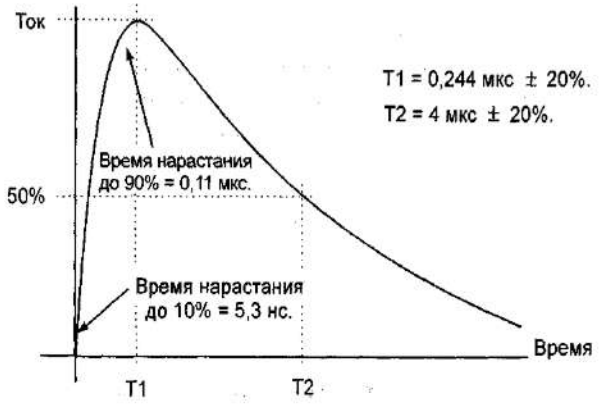


Рис. 1.17 - Форма 6н сигнала тока

Уровни напряжений Формы $3_н$ сигнала для испытаний оборудования и систем обычно составляют 60% от амплитуды напряжения Формы 3 сигнала реакции на воздействие Составляющей А. Форма 3н сигнала тока обычно имеет амплитуду, составляющую 1/20 от амплитуды тока Формы 3 сигнала реакции на воздействие Составляющей А. Уровни напряжений Формы 6Н сигнала для испытаний оборудования и систем обычно имеют максимальный уровень, составляющий 1/20 от амплитуды Формы 1 сигнала реакции объекта на воздействие Составляющей А.

Формы испытательных воздействий по RTCA DO-160G /ED-14G [1.19]. Стойкость к переходным процессам, вызванным молнией, выделена в отдельный вид испытаний, который регламентируется нормативным документом [1.19] раздел 22: «Восприимчивость к переходным процессам, вызванным молнией».

Оборудование должно выполнять свои функции под воздействием испытательных импульсов идеализированной формы, имитирующих импульсные наводки, индуцируемые молнией. Требования по стойкости оборудования к переходным процессам от молнии должны быть определены в технической документации (ТД) на изделие.

Для квалификации оборудования применяются две группы испытаний. Первая группа испытаний оборудования на повреждаемость выполняется посредством *контактного ввода*, как описано в п. 22.5.1 [1.19]. Вторая группа испытаний, описанных в п. 22.5.2 [1.19], оценивает работоспособность оборудования при *воздействии импульсов на жгуты соединительных кабелей*. Испытания кабельными вводами включают испытания на единичный удар, многократный удар и многократную вспышку. Их можно использовать и для проверки стойкости к повреждениям. Соответствующая группа или группы испытаний должны быть установлены в ТД на оборудование.

На рис. 1.18 приведены испытательные импульсы идеализированной формы, имитирующих импульсные наводки, индуцируемые молнией, в соответствии с требованиями раздела 22.0 [1.19].

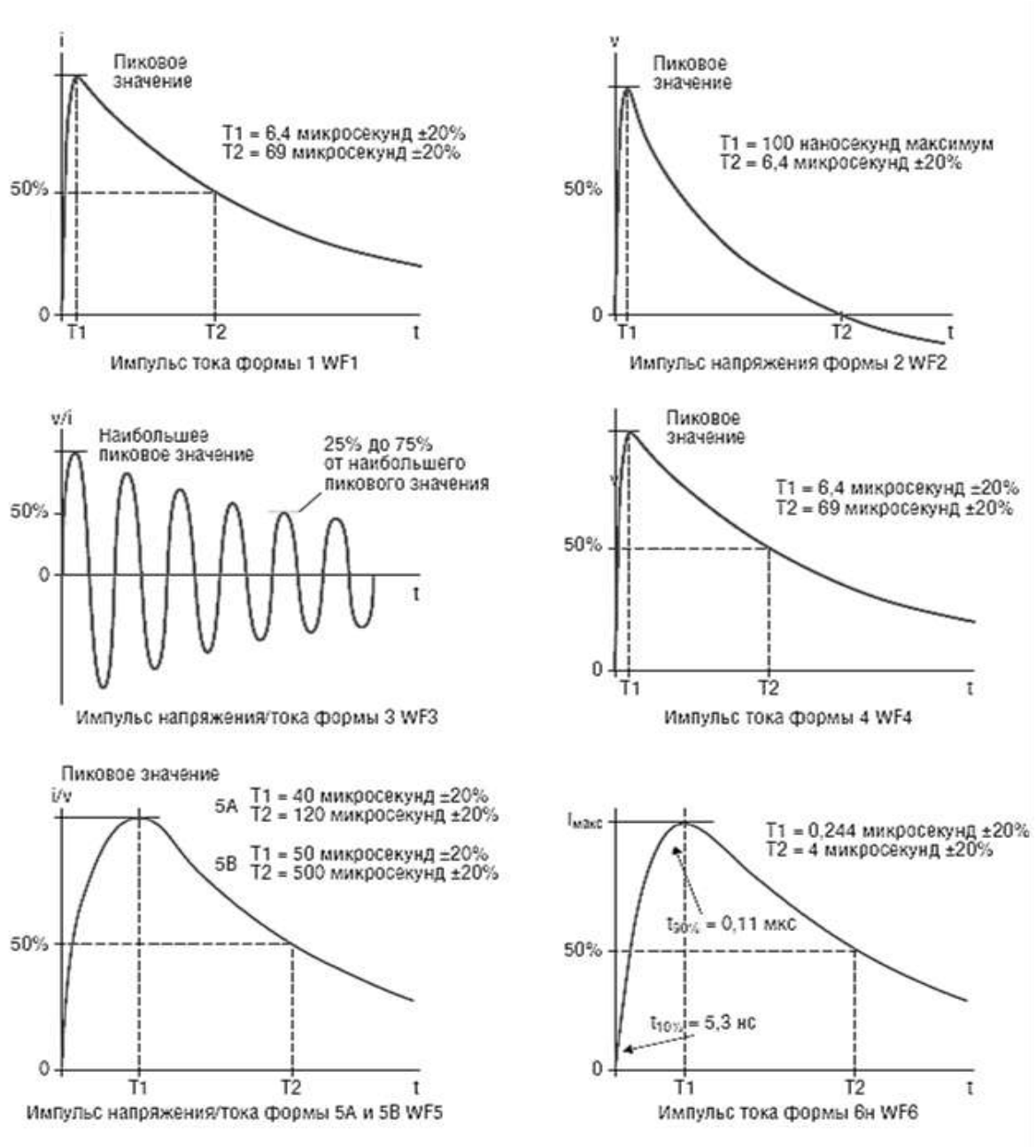


Рис. 1.18 - Испытательные импульсы идеализированной формы, имитирующих импульсные наводки, индуцируемые молнией [1.19].

Режимы воздействия импульсов:

– единичные импульсы с регулируемым интервалом повторения от 3 с, имитирующие переходный процесс от однократного удара молнии (SS). Однократный удар – наиболее энергетически мощный переходный процесс при ударе молнии, предназначенный для оценки устойчивости оборудования;

– одиночные пачки импульсов длительностью от 10 мс до 2 с, состоящие максимум из 30 импульсов, распределённых внутри пачки с произвольным интервалом от 10 до 500 мс и регулируемым интервалом повторения пачек от 60 до 90 с, имитирующие переходный процесс от многократного удара молнии (MS). На рис. 1.19 приведён пример имитируемого переходного процесса от многократного удара молнии;

– многократные пачки импульсов (рис. 1.20) длительностью от 1 мс до 2 с, с количеством импульсов в пачке до 30; импульсы распределены внутри пачки с произвольным интервалом от 10 мкс до 10 мс и регулируемым интервалом повторения пачек от 2 до 10 с и имитируют переходный процесс от многократных вспышек молнии (MB).

Примечание: Параметры пачек импульсов задаются в виде шаблонов «ударов» и «вспышек» как показано на рис. 1.21.

Формы испытательных воздействий по АЕСТР- 500 и АЕСТР - 250 [1.7, 1.8]. Внешняя среда, формируемая разрядами молний, описанная ранее, порождает переходные процессы во внутренней проводке оборудования ЛА. Эти внутренняя среда зависит вида ЛА, что затрудняет определение общих сред для всех их видов, хотя достаточно хорошо разработана для самолетов. Однако механизмы сцепления между внешней и внутренней средами являются общими для всех видов ЛА.

Стандартные формы испытательных импульсов для тестирования оборудования ЛА, регламентированные стандартами НАТО - АЕСТР-250 и АЕСТР-500 приведены в табл. 1.8.

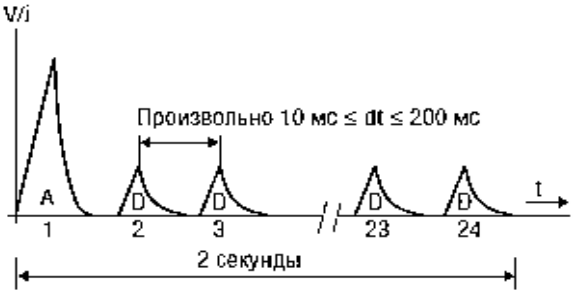


Рис. 1.19 - Переходной процесс от многократного удара молнии

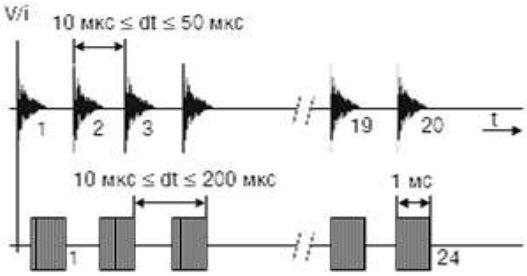


Рис. 1.20 - Многократные пачки импульсов

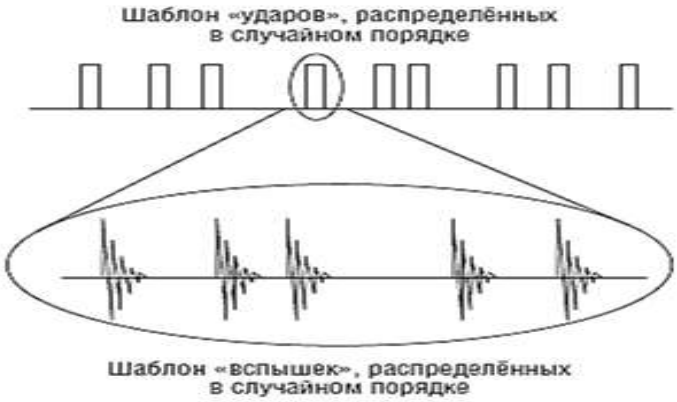


Рис. 1.21 – Шаблоны пачек импульсов, имитирующих «удары» и «вспышки»

Таблица 1.8 - Стандартные формы испытательных импульсов для тестирования оборудования по АЕСТР-500 [1.7]

Форма испытательной волны	Временные характеристики	Математическое представление
Промежуточный импульс (IP), рис. 1.22	6,4 / 70 мкс	$i = 1.09405\ I_p(\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right)$ Используется для хорошо защищенного металлического объекта $\alpha = 647265\ c^{-1}$; $\beta = 11354\ c^{-1}$
Короткий импульс (SP), рис. 1.23	Время нарастания 100 нс Время перехода через ноль 6,4 мкс	Производная по времени от i для $I_P = 1.09405\ I_p\,(-\alpha\, e^{-\alpha t} + \beta e^{-\beta t})$

Окончание табл. 1.8

Длинные импульсы (LP), рис. 1.24	50/500 и 40/120 мкс	$i = K I_p(\left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right)$	
		Форма волны 50/500 мас для плохо проводящих структур $\alpha = 1585$ с$^{-1}$, $\beta = 80022$ с$^{-1}$, K = 1,104	Форма волны 40/120 мкс для алюминиевых корпусов $\alpha = 12400$ с$^{-1}$, $\beta = 45000$ с$^{-1}$, K = 2,25
Затухающая синусоида (DS), рис. 1.25	См. рис 1.25	$I_o\, e^{-\pi ft/Q} \sin(2\pi ft)$ I_o - начальная (t = 0) амплитуда огибающей колебания. **Q=**π/ r - логарифмический декремент затухания между 0,462 и 0,0959 значениями амплитуд ***Примечание.*** Отношение последовательных пиков одной полярности $\mathbf{e}^{-\pi/\mathbf{Q}}$	

Категории оборудования и уровни тестирования для IP, SP и LP формы волны. Когда необходима оценка отдельного вида оборудования соответствующие методики испытаний будут определять формы сигналов и соответствующие их уровни воздействий. Для этих видов испытаний используют формы сигналов DS и SP и либо IP или LP. Соответствующая форма волны LP должна использоваться там, где оборудование или кабели расположены под композитной структурой или близко к алюминию структура со значительной индуктивностью /сопротивлением. Эта форма также должен использоваться, если неэкранированный жгуты прокладываются через металлические лотки или кабелепроводы или имеют перехваты. Форма сигнала IP должна использоваться, когда кабели работают вблизи отверстий или защищенной металлической структуры, которая может проводить ток молнии крышки лючков).

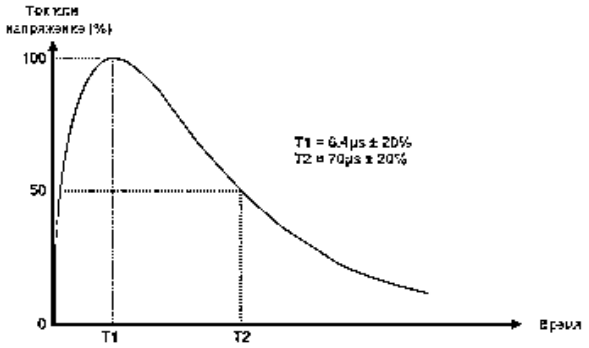


Рис. 1.22 - Промежуточная импульсная (IP) волновая форма, имитирующая резистивную составляющую

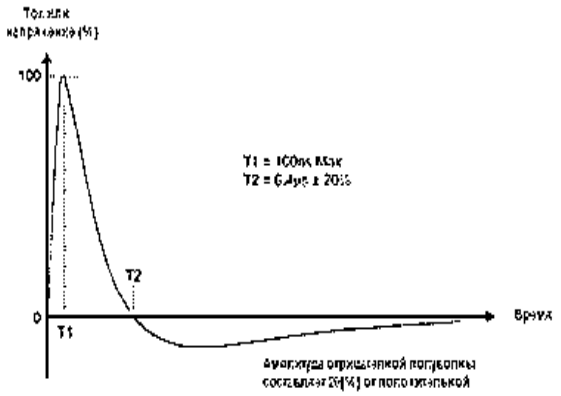


Рис. 1.23 - Короткая импульсная (SP) волновая форма, имитирующая апертурную составляющую

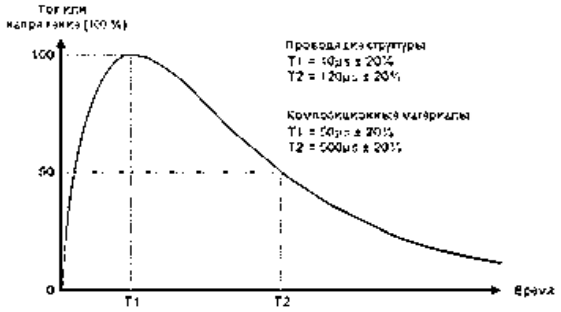


Рис. 1.24 - Длинная импульсная (LP) волновая форма, имитирующая связь через диффузию / перераспределение

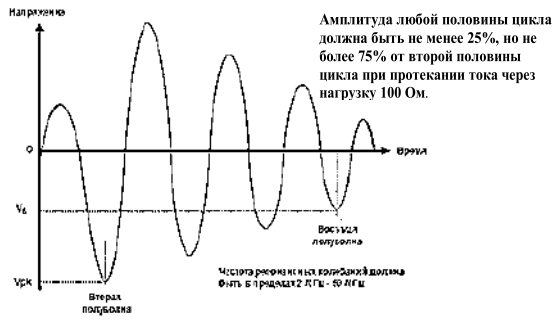


Рис. 1.25 - Затухающая волновая форма волны (DS)

Часто желательно оценивать напряжения, которые могут быть вызваны молнией в отдельных подсистемах или компонентах, таких как антенны и внешние датчики, когда считается, что они особенно уязвимы для пробоя изоляции или перенапряжения. Такие тесты могут проводиться отдельно или в сочетании с импульсными тестами АЕСТР-250 описано выше. В испытаниях, связанных с взаимодействием через апертуры важен параметр скорости изменения формы волны di/dt, поэтому такие испытания должны проводиться с использованием форм волны, приведенных в табл. 1.9.

Таблица 1.9 - Формы испытательных импульсов для непрямого индуцируемого напряжения и проверки прочности изоляции.

Окружающая среда	Математическое описание
Заземленное оборудование	$I_0 (e^{-\alpha t} – e^{-\beta t})$; I_o = 113235 А α =27702 c^{-1} β =906820 c^{-1}
Незаземленное оборудование	$I_0 (e^{-\alpha t} – e^{-\beta t})$; I_o = 105405 А α =22108 c^{-1} β =1294530 c^{-1}

Формы испытательных воздействий по ОСТ 1 01160-88 [1.6]. Требования настоящего отраслевого стандарта распространяется на бортовое оборудование, имеющее в своем составе электрические (электронные) блоки и устройства с проводными линиями связи, выход из строя или ложное срабатывание которых в отдельности или при множественном отказе в полете может привести к аварийной или катастрофической ситуации при ударе молнии в самолет (вертолет).

Стандарт устанавливает методы, условия и нормы испытаний, проводимых и в лабораторных условиях, и на самолете (вертолете), по оценке молниестойкости бортового оборудования к импульсным наводкам, индуцируемым в бортовых электрических цепях.

Устанавливается три типовых формы испытательных импульсов напряжения: «длинная волна», «короткая волна» и «колебательная (затухающая) волна» (рис. 1.26 – 1.28).

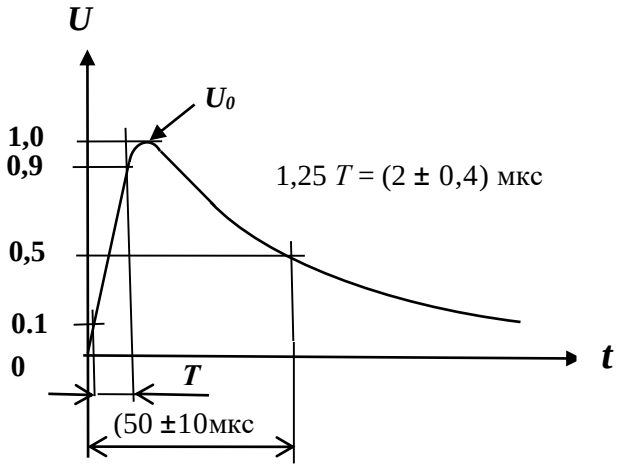


Рис. 1.26 – Испытательный импульс «длинная волна»

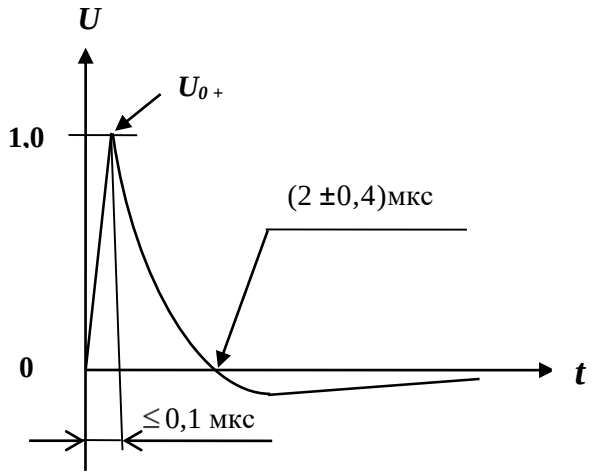


Рис. 1.27 – Испытательный импульс «короткая волна»

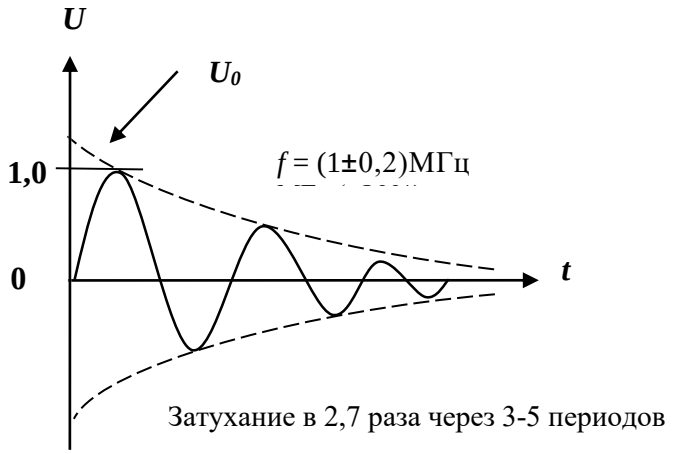


Рис. 1.28– Испытательный импульс «колебательная (затухающая) волна»

В испытательном импульсе типа «длинная волна» (рис. 1.26) время нарастания напряжения до максимального значения составляет (2,0 ± 0,4) мкс, время спада до 50 % уровня составляет (50 ± 10) мкс.

В испытательном импульсе типа «короткая волна» (рис. 1.27) время нарастания напряжения до максимального значения составляет не более 0,1 мкс, время спада до нулевого значения составляет (2,0 ± 0,4) мкс.

В испытательном импульсе типа «колебательная (затухающая) волна» (рис. 1.28) частота колебаний составляет (1,0 ± 0,2) МГц с затуханием в 2,7 раза от начального уровня в течение 3 - 5 периодов.

1.5.3 Нормированные значения основных испытательных форм и амплитудно-временных параметров электростатических разрядов, воздействующих на ЛА

Увеличение ресурса эксплуатации космических аппаратов (КА) является актуальной научно-технической проблемой. Для нового поколения КА рост отношения массы полезной нагрузки к общей массе КА сопровождается снижением помехозащищённости бортовой радиоэлектронной аппаратуры (БРЭА). Это связано, в том числе, и с тем, что расширение функциональных возможностей БРЭА (цифровые технологии, повышение тактовых частот обработки информации, расширение спектра обрабатываемых сигналов и т.п.) с одновременным уменьшением массогабаритных показателей и снижением энергопотребления приводит к необходимости применения новой элементной базы, к сожалению, более чувствительной к электромагнитным помехам (ЭМП). Всё это усложняет проблему электромагнитной совместимости приборов и узлов БРЭА и отражается на работоспособности самого КА. Одной из наиболее сложных задач в процессе создания работоспособных КА является обеспечение стойкости БРЭА к воздействию электростатических разрядов (ЭСР), являющихся следствием процессов электризации в условиях эксплуатации аппаратов.

Процессы электризации (как внешней, так и внутренней) КА можно классифицировать по способу поражения как самих электронных блоков, так и элементов электронных схем:

- разряды на поверхности КА, создающие импульсные помехи в бортовой кабельной сети (БКС), антеннах и датчиках, расположенных на внешней поверхности КА. Эти помехи поступают на входы электронных блоков и приводят к обратимым и необратимым отказам в работе электроники;
- разряды непосредственно в кабели, соединяющие между собой электронные блоки, антенны, датчики и панели солнечных батарей;
- разряды в проводники печатных плат блоков электроники (выводы интегральных схем, транзисторов, диодов и др.);
- разряды непосредственно в кристаллы полупроводниковых элементов из диэлектрических корпусов этих элементов.

Особую роль при этом играют процессы электризации поверхности КА, что вызывает электростатические разряды на поверхности блоков и кабельных систем. Электростатические разряды, возникающие вследствие дифференциальной зарядки летательного аппарата, являются источниками электромагнитных помех, воздействующих на отдельные элементы и устройства и (или) бортовые системы в целом.

Разности потенциалов на поверхностях КА, находящихся на геостационарной орбите (ГСО), могут достигать 20 кВ, а средние значения энергии ЭСР составляют 6…200 мДж. В результате разряда по корпусу аппарата протекают импульсные токи амплитудой до 100 А, которые приводят к возникновению ЭМП в элементах кабельных систем БРЭА.

Электромагнитные помехи различной природы, вызванные ЭСР, могут приводить к нарушению режимов работы БРЭА в виде кратковременных сбоев и отказов, искажению информационных сигналов и сигналов управления, а в отдельных случаях и к физическому повреждению бортовых устройств. Из-за высокой сложности реальных конструкций КА (и БРЭА) задача определения места разряда и его уровня является достаточно сложной и на сегодняшний день не решена. Это затрудняет разработку методов и средств предотвращения ЭСР и, соответственно, защиты аппаратуры от его воздействия.

Если проблема, связанная с обеспечением стойкости РЭА КА к воздействию ЭСР, не будет решена, то возможный ущерб от потери спутников по этой причине может существенно возрасти.

Для исследования электромагнитной восприимчивости и электромагнитной совместимости, возникает необходимость в разработке методов и технических средств проведения исследований и испытаний. Испытательные технические средства состоят из имитаторов и измерителей – преобразователей параметров электромагнитной обстановки. Параметры электромагнитной обстановки и условия проведения испытаний регламентируются международными и национальными государственными и отраслевыми стандартами, например, DO-160G.

Существующие стандарты не охватывают всё разнообразие электромагнитных помех от существующих и вновь появляющихся источников. В связи с этим необходимо разрабатывать и

использовать при испытаниях и исследованиях универсальные имитаторы, позволяющие создавать практически все виды помех, с широким интервалом перестраиваемых параметров, и реализовывать нестандартные методы исследований и испытаний для различных типов бортовых систем летательных аппаратов.
При проведении испытаний важно не только установить факт работоспособности элементов и устройств бортовых систем, но и диагностировать причины отказа или выхода из строя. До настоящего времени практически не разработаны теоретические и экспериментальные методы диагностирования причин отказов (сбоев, нарушения работоспособности), возникающих вследствие воздействия электромагнитных помех.

Установление причин отказов требует значительных временных и материальных затрат. Поэтому в настоящее время, в связи с усложнением испытываемых бортовых систем, возрастает актуальность разработки методов диагностирования бортовых систем в условиях адекватной электромагнитной обстановки.

Стойкость к воздействию электростатических разрядов регламентируется нормативным документом RTCA DO-160G /ED-14G [1.19] раздел 25: «Электростатический разряд». Оборудование должно выполнять свои функции в соответствии с применяемой ТД без ухудшения характеристик во время действия электростатического импульса, создаваемого происходящим в воздухе разрядом.

Устойчивость к электростатическому разряду должна определяться по способности испытываемого комплекта оборудования выдерживать последовательность электростатических импульсов при заданном уровне жёсткости 15,0 кВ в определённых местах «контакта оборудования с человеком» в этом комплекте. Импульсов должно быть десять в каждой из заданных позиций как положительной, так и отрицательной полярности напряжения. Комплекс имитации электростатических разрядов (КИЭР) представляет собой набор отдельных функционально законченных устройств, которые в совокупности обеспечивают имитацию всех требуемых воздействий для проведения испытаний.

Литература к главе 1

1.1. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". 2010. – 292 с.

1.2. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник. - М.: Радио и связь, 1991. - 264 с.

1.3. Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И.Кравченко - М.:Радио и связь, 1987.-256 с.

1.4. Методы испытаний радиоэлектронного и электротехнического оборудования на молниестойкость / Г.М.Колиушко, В.И.Кравченко, В.П.Ларионов и др.// Энергетика. (Изв.высш.учеб. заведений).-1992.- № 9-10.- С.45-50.

1.5. Кравченко В.И. Методы испытаний на молниестойкость объектов, содержащих в своей основе радио- и электротехническое оборудование// Сб. науч. докл. Междун. симпозиум по ЭМС.- С.-Петербург (Россия), 1993 .- Часть 3.- С. 716-720.

1.6. ОСТ 1 01160-88 Оборудование бортовое самолетов и вертолетов. Методы испытаний на молниестойкость. -1988. – 23 с.

1.7. AECTP-500 NATO STANDARD Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1. -2016, 1125 p.

1.8. AECTP-250 NATO STANDARD Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version 1. - 2014, 253 p.

1.9. RTCA SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Method, 2005. -145 p.

1.10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Пер с англ. – М.: Мир, 1972. - 391с.

1.11. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на напряжении. - М.: Энергия, 1980. – 136 с.

1.12. Смирнов С. М., Терентьев П. В. Генераторы импульсов высокого напряжения. - М.-Л: Энергия, 1964. – 239 с.

1.13.Техника больших импульсных токов и магнитных полей/ П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков и др. - М.: Атомиздат, 1970. -472 с.

1.14. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С., Дныщенко В.Н. Генератор тока искусственной молнии для натурных испытаний технических объектов// Приборы и техника эксперимента. -2008.-№ 3.-С.81-85.

1.15. Баранов М.И., Колиушко Г.М., Кравченко В.И., Недзельский О.С. Мощная высоковольтная электрофизическая установка для имитации полного тока молнии и ее применение в области молниезащиты технических объектов// Електротехніка і електромеханіка.-2008.-№ 3.-С.69-75.

1.16. Goskenbach E. Simalation der Blitxenfiladung in labor// Mikrowellen Magazin 1988 - vol.14 N 6 - s. 544-553.

1.17. Robb J.D., Plummer J.A. Aerospace Recommended Practice: Lightning Effects Tests on Aerospace Vehicles and Hardware//Conf. Lightning and Static Elec. 1975, s.a.(123-134).

1.18. RTCA SAE ARP 5412 Revision A. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. -2005. – 56 p.

1.19. RTCA DO-160G /ED-14G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. -2011. -438 p.

1.20. RTCA ARP 5414. Aircraft Lightning Zoning. -2005. -33p.

1.21. Fisher F.A. Lightning Protection for the Space Shuttle // Conf/ Light/ and Static Elec., Culham Lab., 1975. Proc. London, s.a.(618-630).

1.22. Разевиг Д.В. Атмосферные перенапряжения на линиях электропередач. - М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959.-216с.

1.23. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. -М.: Высшая школа, 1973. -528с.

1.24. Техника высоких напряжений/ Под ред. Д.В. Разевига.- М.: Энергия, 1976.-487с.

1.25. Юман М. Естественная и искусственно инициированная молния и стандарты на молниезащиту / ТИИЭР. - 1988. - т.76. - № 12. - с. 5 - 26.

1.26. Базелян Э.М., Горин Б.Н., Левитов В.И. Физические и инженерные основы молниезащиты. - М.: Гидрометеоиздат, 1978.- 223с.

1.27. ГОСТ 30585-98 (ДСТУ 3681 – 98) Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний// В.И. Кравченко, Ю.В. Голодняк, Г.В. Кравченко и др.// Держстандарт України, Київ 1998. - 28 с.

1.28. Hasse J.P. Blitzchutz fur Anlagen mit Electrischen und Electrischen Geraten// Fachbericht. 1987. N1, S. 27-31.

1.29. Даценко В.П., Князев В.В., Кравченко В.И. Выбор замещающих импульсов для имитации грозовых наводок в типовых цепях РЭС// Сб. науч. докл. Междун. симпозиум по ЭМС.- С.- Петербург (Россия), 1995 - С.139-141.

1.30. Защита от помех // Рекомендации серии К МККТТ / Том IX Изд. Международного консультативного комитета по телефонии и телеграфии "Красная книга" 1978 – 182 с.

1.31. Sowa A.E. Testing of Susceptibility and Vulnerability Waveform Used For// Proc. 10-th Intern. Symp. EMC 1990 - P. 910-915.

ГЛАВА 2 МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ

2.1 Планирование, подготовка и проведение испытаний ЛА на воздействие молнии

Прежде чем проводить испытания бортового оборудования и систем ЛА на воздействие молнии, необходимо выполнить тщательное планирование испытаний.

План испытаний должен содержать [2.1]:

а). Подробный перечень испытаний, которые необходимо проводить.

б). Цель для каждого вида испытаний теста.

с.) Описание методов испытаний, включая точки крепления молнии, возврат проводящей системы и осциллограммы молнии.

д). Количество тестируемых образцов и количество имитируемых разрядов молний для каждого образца.

е). Подробное описание оборудования, которое необходимо использовать, и виды измерения, которые необходимо выполнить для доказательства того, что форма сигнала испытания на молнию соответствует требуемой по НТД форме волны.

ж). Полный график испытаний, который будет определять порядок, в котором должны проводиться испытания и которые (если таковые имеются) должны быть объединены.

Кроме того, для обеспечения высокого качества и достоверности результатов испытаний необходимо заранее определить многие дополнительные аспекты испытаний.

Основными из них являются [2.2]:

- определение зон воздействия разряда молнии, в которых размещается оборудование;
- формы сигналов, которые необходимо подавать;
- тип (типы) конфигурации (конфигураций) и количество образцов для каждой конфигурации;
- положение и количество контрольных точек;
- критерии успешного прохождения испытаний.

Важным этапом в подготовке является разработка документации по проведению испытаний. Данная документация может включать в себя отдельные “программа испытаний” и “методику испытаний”, или положения обоих этих документов могут быть объединены в одном документе.

2.1.1 Программа проведения испытаний

Программа испытаний обычно определяет цель, основную идею и детали планируемого испытания для помощи различным представителям планирующего и обслуживающего персонала в вопросах, связанных с подготовкой, финансированием и обеспечением испытаний [2.2].

Программа должна содержать следующие разделы [2.3]: общие положения, цель испытаний, объект испытаний, место проведения испытаний, время и состав участников испытаний, испытательные установки и измерительная аппаратура, методика испытаний, оформление результатов испытаний, техника безопасности при проведении испытаний, материально-техническое обеспечение испытаний, особые мероприятия.

*Общие положения***.** Указываются: основание для проведения испытаний, требования к организации испытаний, возможность корректировки программы испытаний и процедуры испытаний (перерыв, окончание и пр.).

Цель испытаний. Указываются: основная (проверка молниестойкости бортового оборудования по НТД с заданной категорией жесткости и выдача заключения и сертификата) и промежуточные цели испытаний (измерение наводок в заданных контрольных точках, сравнение с допустимыми по НТД уровнями и т.п.).

Объект испытаний. Указываются; тип объекта испытаний (его номер, чертежи и другая конструкторская документация), особенности эксплуатации, схемы контролируемых цепей с указанием точек измерений наводок.

Место проведения испытаний, время и состав участников испытаний. Указываются: место и сроки проведения испытаний, состав комиссии (бригады). Организация и обеспечение испытаний возлагаются на предприятие (организацию)-разработчика

испытуемого бортового оборудования. В состав комиссии (бригады) входят представители предприятий-разработчиков отдельных блоков и изделий испытуемого бортового оборудования, предприятия надзорного органа и предприятия, на базе которого проводятся испытания.

Проведение лабораторных испытаний. Если в НТД не оговорены иные климатические условия, испытания проводятся при: температуре воздуха от 10 до 30 °С относительной влажности от 4 5 до 80 %; атмосферном давлении от 840 до 1060 гПа (от 630 до 800 мм рт. ст.). Оборудование перед испытаниями должно быть выдержано в вышеуказанных условиях не менее 3ч. Испытания проводятся на оборудовании с подключенным электропитанием. Подключение осуществляется через эквиваленты сети, соответствующие требованиям НТД. Предельно допустимые уровни импульсных воздействий должны быть указаны в НТД на бортовое оборудование, поставляемое на испытания. В случае отсутствия в НТД на бортовое оборудование допустимых уровней, а также категорий жесткости испытаний и данных об ожидаемых электромагнитных условиях на борту допускается проводить испытания последовательно, начиная с 1-й категории, для определения фактической молниестойкости испытуемого бортового оборудования.

Испытательные установки и измерительная аппаратура. Указываются: наименование (тип) испытательной установки и измерительной аппаратуры, их основные характеристики, сведения об аттестации и сроках.

Методика проведения испытаний. Методика испытаний должна соответствовать требованиям технической документации (ТД).

Оформление результатов испытаний. По результатам испытаний составляется акт (протокол).

Техника безопасности при проведении испытаний. При проведении испытаний должны выполняться правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок заданного класса напряжения, положения действующих НТД и конструкторской документации, а также инструкций по технике безопасности при обслуживании оборудования (при лабораторных испытаниях), самолетов и вертолетов (при натурных испытаниях), инструкций по пожаробезопасности и др.

Материально-техническое обеспечение испытаний. Указывается перечень оборудования и материалов, необходимых для испытаний.

Особые мероприятия. Указываются мероприятия в соответствии с действующей в отрасли документацией. Программа испытаний подписывается представителями предприятий и организаций, утверждающих и согласующих данную программу.

2.1.2 Методика испытаний

Методика (процедура) испытаний обычно является более сложным документом, содержащим подробное описание испытываемого объекта, зонирования, используемых форм сигналов, лабораторного оборудования, критериев успешного прохождения испытаний, пошаговой процедуры для каждого отдельного испытания, а также других связанных с испытаниями вопросов. Процедура испытаний должна усовершенствовать применимые испытания, содержащиеся в ARP, и адаптировать их к конкретному подлежащему испытаниям оборудованию. Необходимо понимать, что понятия “процедура испытаний” и “программа испытаний” ранее часто использовались одно вместо другого [2.2].

Конкретная процедура испытаний может содержать больше или меньше материала, в зависимости от природы этого испытания. Рекомендуется, чтобы заявитель заранее согласовал окончательную редакцию этой процедуры с сертифицирующими органами.

Составные части и содержание процедуры испытания:

Введение - область действия, назначение (в том числе, является ли целью сертификация), место проведения испытания, необходимость присутствия заказчика при проведении испытания.

Испытываемый объект – подробное описание объекта в вопросах соответствия молниезащите.

Испытательное оборудование – описание, поверка (калибровка).

Анализ безопасности - требования техники безопасности при эксплуатации высоковольтного оборудования.

Требования к испытанию - подробное описание каждого испытания на основе документов - SAE ARP 5412, 5414, 5416 [2.2, 2.4, 2.5], критерии успешного прохождения/непрохождения испытания, рабочие режимы электрического/электронного оборудования и методики оценки их работоспособности.

Требования к протоколу испытания – основные пункты протокола в соответствии с SAE ARP 5416 [2.2].

Обычно проводят три типа испытаний:

a). Разработка (оценивание несоответствующих, составных или готовых покупных частей). Результаты этих испытаний не соответствуют требованиям квалификационных или сертификационных испытаний, но могут быть использованы для последующей доработки конструкции, подлежащей сертификации.

b). Квалификация (данные о составе испытательной установки и номеру изделия берутся из соглашения о гарантии качества). Результаты квалификации обычно используются при сертификации всей системы. Испытания проводятся по спецификации и данным, утвержденным компетентным органом контроля летной годности.

c). Сертификация (содержит все результаты квалификации и документы соответствия частей). Результаты этих испытаний утверждаются компетентным органом контроля лётной годности и представляются на рассмотрение как часть пакета документов сертификации молниестойкости ЛА.

Технические или аттестационные испытания могут проводиться на любой системе или агрегате перед сертификацией. Однако при проведении сертификационных испытаний система должна удовлетворять требованиям соответствия. На испытываемые объекты типа вычислителей должно быть установлено проверенное и документированное программное обеспечение. Процесс подтверждения соответствия может занять определенное время Заявителю следует начать этот процесс заранее, чтобы гарантировать достижение надлежащих уровней требований соответствия до проведения этих испытаний. Если не начать этот процесс заранее, то это может повлиять на график проведения испытаний или получение требуемой достоверности результатов испытаний. Учитывая факт, что требования соответствия могут изменяться в зависимости от типа проводимых испытаний, а также типа заявленной сертификации, рекомендуется, чтобы заявитель согласовал эти требования с сертифицирующими органами с целью достижения соглашения заранее до проведения реальных испытаний.

Необходимо проанализировать любые отличия между конфигурацией испытываемого изделия и конфигурацией готового

промышленного изделия с целью подтверждения того, что эти отличия не влияют на результат испытания. Необходимо детально просмотреть требования соответствия, прежде чем обсуждать их с сертифицирующими органами и подавать на рассмотрение документацию испытаний и график их проведения.

Поверка измерительной установки перед проведением испытаний на молниестойкость требует поверить (откалибровать) испытательное и измерительное оборудование. Перед каждым испытанием необходимо проверить выводы генерирующего оборудования, такого как высоковольтные генераторы и усилители, принять меры, чтобы избежать паразитной связи при помощи использования, например, световодов, а также необходимо проверить уровни шумов (примеры методов поверки приведены в IEC 60060-2 [2.6]).

Вопросы безопасности испытаний на прямое и косвенное воздействие молнии базируются на использовании высоковольтного электрического оборудования, которое может быть заряжено до опасного для жизни напряжения, в связи с чем необходимо соблюдать все требования техники безопасности при работе с данным оборудованием. Все испытания должны проводиться на территории с контролируемым доступом и персоналом, имеющим опыт высоковольтных/сильноточных испытаний. Специальное внимание следует уделить безопасности персонала, в том числе: использование защитных ограждений/блокировок, задокументированных надлежащим образом процедур безопасности и журналов регистрации, а также средств защиты глаз и ушей, кроме того, могут быть полезными соответствующие обозначения и предупредительная звуковая сигнализация предстоящих разрядов. Приказы по подразделению или компании могут предписывать наличие средств пожаротушения, которые рекомендуются для любого испытания, при котором возможны взрывы и пожар.

Необходимо учитывать, что одним из наиболее важных аспектов любого испытания, независимо от того, технические это или сертификационные испытания, является подготовка испытываемого объекта, его конструкция (размер, состав, покрытие). На первый взгляд может показаться, что использование полномасштабных созданных по чертежам изделий является наиболее “надежным” методом испытаний, однако этот подход может оказаться достаточно

дорогим и, в конечном счете, привести к ошибочным результатам. Испытания необходимо проводить на сборках, соответствующих действительности образцов изделий соответствующей формы и размеров, чтобы в точности имитировать реальные конструкцию и монтаж. Структура испытываемого объекта важна для обеспечения правильного выполнения металлизации и заземления, чтобы испытательные токи протекали вдоль характерных путей, и чтобы монтаж испытываемого изделия соответствовал реальному монтажу. Это особенно важно для небольших испытываемых изделий, для которых краевые эффекты и окружающая конструкция могут оказывать влияние на распределение тока в испытываемом изделии и влиять на результаты испытаний.

Защитное и антикоррозионное покрытия являются очень важными аспектами процесса подготовки испытательной установки. Защитное покрытие может влиять на распространение электрической дуги по испытываемому объекту, а антикоррозионное покрытие может повлиять на пути металлизации и заземления поверхностей и частей.

Эти вопросы необходимо рассмотреть перед сборкой испытательной установки, и необходимо определить, адекватно ли они представляют монтаж. Например, необходимо испытать полноразмерный зализ крыла с фюзеляжем большого ЛА, чтобы определить, произойдет ли сквозной пробой молниезащиты и панели электрическим током с формой сигнала, соответствующей Зоне 2А.

Правильно заземленные панели достаточных размеров должны удовлетворять испытаниям на прямое попадание молнии. Пригодной может оказаться панель достаточных размеров, представляющая самую тонкую часть посередине панели (построение наихудшего случая). Поскольку электрический ток теоретически может течь во всех направлениях от точки попадания молнии, применение заземления по периметру будет правильным. Опыт показывает, что использование плоской панели размером 18×18 дюймов является достаточным для получения достоверных данных. Меньший размер допускается, но при этом следует понимать, что давления ударной волны и краевые эффекты могут искажать результаты испытаний.

Составные изделия со многими соединениями должны также быть тщательно собраны, чтобы отражать реальную установку, для испытания которой они предназначены. Кроме того, необходимо учитывать место установки и размеры в случае, когда требуется

масштабирование уровня тока. Например, если собираются испытывать деталь с двумя крепежными элементами, скрепляющими две части вместе, и эта деталь представляет установку со многими крепежными элементами, скрепляющих две части вместе, полноразмерная форма сигнала может оказаться неподходящей. Здесь, чтобы показать распределение тока по крепежным элементам, подойдет масштабирование формы сигнала.

При испытаниях на прямые сильноточные воздействия и испытаниях топливной системы обычно в одном испытательном разряде используют сочетание соответствующих форм сигналов, определенных в документах SAE ARP5412 [2.4]. Например, испытание на прямое попадание электрической дуги в Зоне 2А может скорее содержать компоненту тока D, за которой следуют компоненты тока B и C* в одном испытательном разряде, чем подачу отдельных разных испытательных разрядов. Целью здесь является наиболее близкая к реальным условиям имитация возможных комбинаций воздействий, которые могут иметь место в условиях реального удара молнии.

При проведении испытаний на прямые высоковольтные воздействия используют каждый раз только одну форму испытательного сигнала, хотя с целью оценки различных условий в конечном счете может использоваться подача на испытательную установку нескольких форм испытательных сигналов одновременно.

При проведении испытаний на косвенное воздействие обычно используют в каждом испытании одну форму испытательного сигнала или набор форм испытательных сигналов, за исключением тех часто встречающихся случаев, когда в методах испытаний предусмотрены многоимпульсные сигналы или повторения сигналов.

Использование одного и того же испытываемого объекта в условиях двух одновременных испытания может оказаться сложным.

Если испытание проникновения дуги в Зоне 1В и испытание на проводимый ток в Зоне 3 должны проводиться одновременно на образце, представляющем собой крупногабаритную поверхность управления с множеством лючков, а испытываемая панель содержит только два лючка, то лючки должны быть испытаны повторно, так как только два из них способны проводить ток.

Если же реальная конструкция имеет на себе только два лючка, тогда данное испытание действительно. Это касается всех

поверхностей и окружающих конструкций, включенных в испытание.

2.1.3 Степень жесткости и оценка результатов испытаний

Степень жесткости испытаний - условный номер, отражающий интенсивность воздействующей помехи с параметрами, регламентированными в нормативной документации.

В большинстве нормативных документов помимо нескольких степеней жесткости, обозначенных цифрами (например, 1, 2, 3 и т.д.) предусмотрена степень жесткости испытаний *X*, называемая также открытой степенью жесткости.

Для степени жесткости *X* значение (уровень) испытательного воздействия должно быть указано в технической документации на конкретное устройство.

Из стандартизированного определения открытой степени жесткости *X* следует, что технических условиях, на конкретное устройство можно не указывать уровень испытательного воздействия, если указан конкретный условный номер степень жесткости, установленный соответствующим стандартом.

Облегчение условий испытаний Один из путей облегчения условий испытаний осуществляется посредствам выбора меньшей степени жесткости для чего в нормативных документах на испытания введена степень жесткости *X*. При этом в обязательном порядке процедура выбора этого номера степени жесткости для испытаний должна быть согласована между потребителем продукции и изготовителем.

Второй путь – проведение испытаний на пониженных уровнях внешних воздействующих факторов электромагнитных воздействий с последующей экстраполяцией результатов испытаний на требуемые уровни воздействий. Данный путь реализуется при обязательном условии линейности процессов в объекте при воздействии на него внешних воздействующих электромагнитных факторов грозовых разрядов, что практически невыполнимо.

В случаях несоответствия показателей молниестойкости объекта, выявленных при проведении испытаний, требуемым уровням необходимо обеспечить практическую реализацию выполнения дополнительных организационно-технических мероприятий

связанных с молниезащитой объекта таких неблагоприятных для их эксплуатации воздействий грозовых разрядов.

Результаты испытаний классифицируются в терминах потери функционирования или ухудшения характеристик испытуемого объекта относительно уровня производительности, определенного его изготовителем или запрашивающим тестом, или согласованного между производителем и потребителем продукта [2.7].

При проведении квалификационных испытаний целесообразно использовать более дифференцированную трактовку качества функционирования ТС. Например, в разделе 9 стандарта IEC 61000-4-25 [2.7] введены критерии *A, B, C, D* и *E*. Определение рекомендуемых критериев таково:

A - нормальное функционирование в соответствии со спецификацией;

B - временное ухудшение качества функционирования ТС, которое исчезает после прекращения действия помехи;

C - временное ухудшение качества функционирования ТС, исправление которого требует вмешательства оператора или перезапуска системы;

D - выход из строя или необратимое ухудшение качества функционирования ТС, в связи с повреждением аппаратного или программного обеспечения, или утратой данных;

E - деградация ТС, которая может вызвать проблемы безопасности (например, пожар).

Спецификация изготовителя может определять воздействие на испытуемый объект, которое может считаться незначительным и, следовательно, приемлемым. Эта классификация может использоваться в качестве руководства при формулировании критериев эффективности, комплектующего оборудования, отвечающих за общие, товарные и общие стандарты, или в качестве основы для соглашения о критериях эффективности между производителем и потребителем.

2.2 Испытания самолетов и вертолетов на молниестойкость

2.2.1 Испытания на прямое воздействие молнии

Испытания на прямые воздействия молнии включают следующие методы [2.2]:

- испытания на попадание высоковольтного разряда, включающие испытания на: начальное попадание лидера, попадание перемещающегося канала молнии и попадание высоковольтного разряда на моделях;
- испытание на физическое повреждение сильными токами, включающие испытания на: проникновение электрической дуги, токонепроводящих поверхностей ЛА и проводимый ток;
- наведенные переходные процессы в устанавливаемом снаружи оборудовании, включающие: измерение переходных процессов, наведенных в устанавливаемом снаружи оборудовании и оценивание градиента напряжения на изоляции цепи.

Эти испытания определяют средства защиты и результаты прямых воздействий, за исключением рассмотрения воспламенения топлива. Испытания на попадание высоковольтного разряда проводят с целью определения конкретных точек попадания разряда молнии и путей пробоя токонепроводящих материалов в ширину или насквозь. Поскольку сила электрического тока, протекающего в процессе этих испытаний обычно мала, то данный вид испытаний не предназначен для определения возможных разрушений от удара молнии. Испытание на физическое повреждение сильными токами проводят с целью оценки реального разрушения токами молнии. Испытания сильноточных переходных процессов направлены на те случаи, когда установленная внутри конструкций электропроводка или монтируемое снаружи оборудование могут быть восприимчивыми к прямому попаданию токов молнии.

Данные виды испытаний относятся к испытаниям высоким импульсным напряжением и распространяются как на ЛА в целом, включая объекты РКТ, самолеты и вертолеты, так и для отдельных их компонентов.

Испытания ЛА высоким импульсным напряжением проводятся с целью [2.2, 2.8, 2.9]:

- определения наиболее вероятных точек поражения молнией;
- формирования точки прожига;
- определения путей внешних перекрытий и внутренних пробоев;
- смещения канала молнии по поверхности;

- определения поверхностных повреждения слоистой непроводящей панели корпуса;

- определения поверхностных повреждений металлизированных слоистых панелей корпуса;

- определения поверхностных повреждений сотовых непроводящих панелей корпуса;

- проведения импульсных испытаний на целостность изоляции, диэлектрический пробой и электрическую прочность изоляции объекта.

На рис. 2.1 приведена типовая структурная схема проведения испытаний ТС высоким импульсным напряжением.

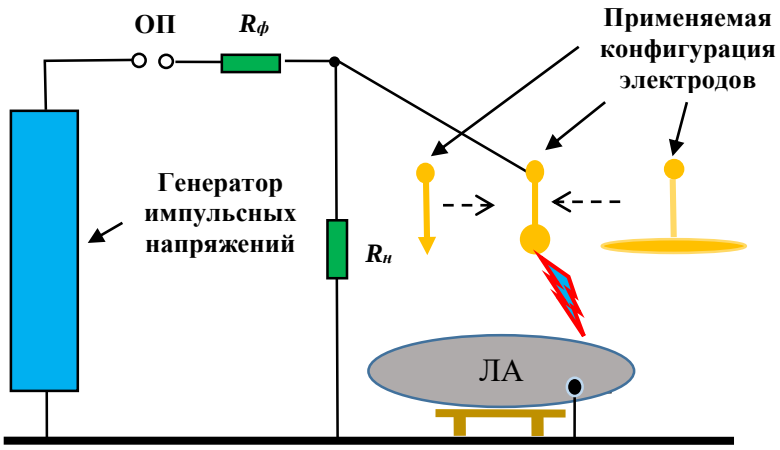


Рис. 2.1 – Типовая структурная схема проведения испытаний ЛА высоким импульсным напряжением.

2.2.1.1 Испытания на попадание высоковольтного разряда

Эти испытания проводят с целью определения точек попадания разряда молнии и путей пробоя токонепроводящих материалов в ширину или насквозь.

Испытание на начальное попадание лидера. Данный вид испытаний обычно проводят для частей ЛА, расположенных в областях начального попадания лидера в пределах зон 1А и 1В согласно ARP5414 [2.5]. Примером могут служить законцовки крыла, изготовленные из токонепроводящего материала, обтекатели антенн и крупногабаритные носовые обтекатели антенн ЛА.

Этот вид испытаний позволяет [2.2]:

- определять положения возможных мест попадания лидера молнии на полноразмерных конструкциях;
- исследовать защитные свойства материалов стенок обтекателя антенн,
- оптимизировать расположения защитных устройств обтекателей антенн (диверторов) и определять их защитные характеристики;
- определять пути разряда по поверхности или пробоя вдоль диэлектрических поверхностей или сквозь них.

Область начального касания лидера может быть определена при испытаниях масштабной модели объекта или, в некоторые случаях, при испытаниях полномасштабных моделей его частей, когда нужно более точное определение границ между зонами [2.5, 2.10].

Варианты методов проведения данного вида испытаний приведены на рис. 2.2. Обычно необходимо проводить испытания объекта, ориентируя его в двух или более различных положениях, чтобы учесть те направления электрического поля, в которых оно может воздействовать на этот объект во время полета.

Для проведения этого вида испытаний рекомендовано использовать импульсы напряжения, приведенные на рис. 1.1.

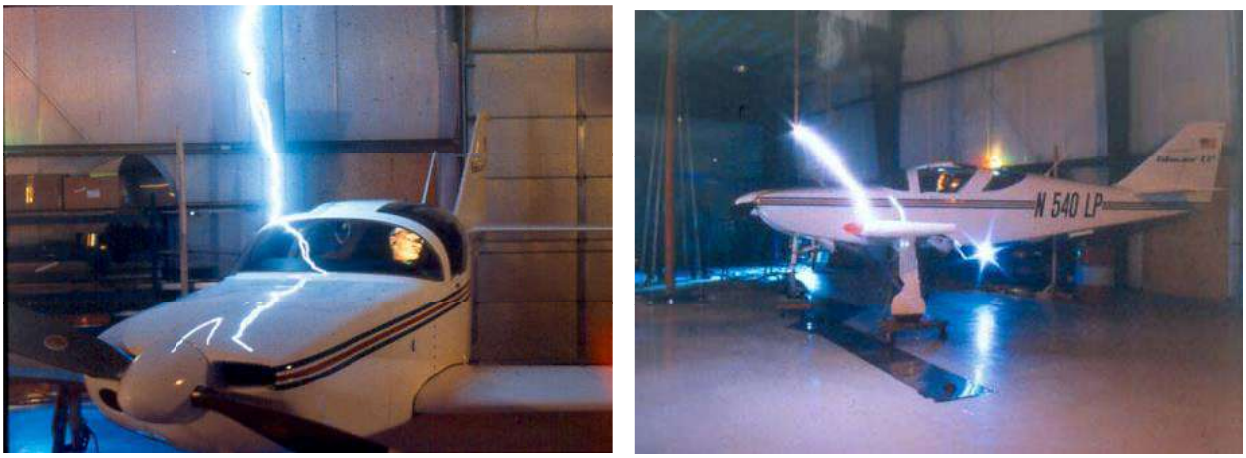


Рис. 2.2 – Метод проведения испытаний на определение путей внешних перекрытий и внутренних пробоев на реальных объектах ЛА [2.11].

Для определения точек начального касания разряда молнии проводят высоковольтные испытания масштабной модели. Методика испытаний имеет некоторые ограничения, связанные с физикой моделирования - когда процесс коронирования и распределение зарядов вокруг модели не имеют линейной зависимости от размеров модели. Кроме того, испытания на модели обычно проводятся без характерного представления на модели результирующего заряда. Более того, на модели не воспроизводятся влияние воздушного потока и высоты, а также изменения локального давления на распределение пространственного заряда.

Тем не менее, результаты испытаний на моделях хорошо совпадают с получаемым в последующих полётах опытом поражения объекта молнией. Основной методикой испытаний является воздействие на модель импульсных электрических полей различной ориентации, которые представляют различную возможную ориентацию лидера. Точки начального касания определяются по фотографиям разряда. Инструкции по проведению таких испытаний содержится в документе ARP5416 [2.2].

Испытания на модели дают возможность определить те зоны на объекте, в которых возможны начальные касания лидера, однако, эти испытания не дают возможности детального определения точек на объекте в особенности в местах сложной геометрической формы, или на элементах, имеющих как проводящие, так и непроводящие поверхности. Если необходимы высоковольтные испытания на

полномасштабных частях объекта, то они должны производиться с точным воспроизведением материалов и геометрии элементов, чтобы определить конкретные точки касания и наличие сквозного пробоя или искрового перекрытия непроводящих частей. Рекомендации по проведению таких испытаний приведены в документе ARP5416 [2.2].

Области начального касания лидера могут быть также определены несколькими аналитическими методами, такими как моделирование электрического поля (рис.2.3).

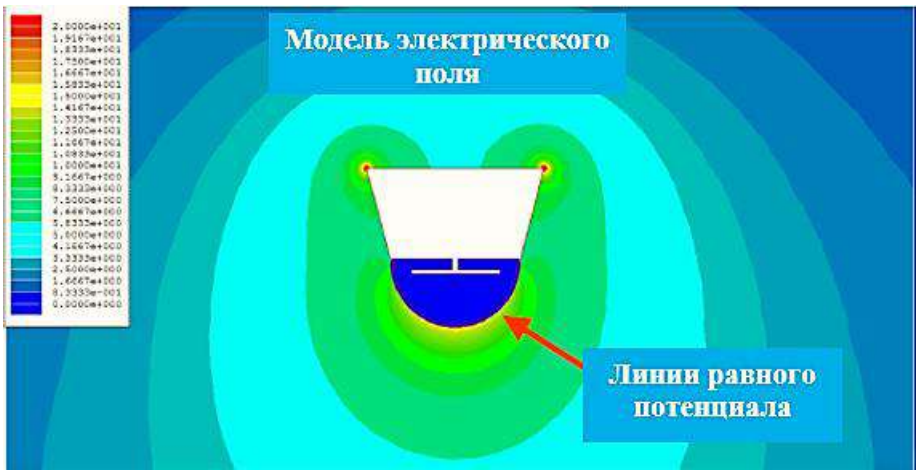


Рис. 2.3 – Расчетная модель распределения напряженности электрического поля вокруг головного обтекателя самолета [2.10]

В качестве испытываемого объекта необходимо использовать промышленно изготавливаемое полноразмерные конструкции или соответствующий действительности прототип. Для получения реального развития коронного разряда и стримеров от токопроводящих элементов необходимо включать в испытание любые лакокрасочные покрытия, в частности любые антистатические лакокрасочные покрытия или диэлектрические покрытия электропроводящих элементов.

Электропроводящие элементы, например, элементы антенн и огней, которые обычно находятся внутри токонепроводящих испытываемых объектов, должны находиться внутри испытываемых объектов. Это могут быть как реальные устройства, так и геометрически подобные макеты, поверхности которых как минимум обладают такой же электрической проводимостью, что и изделие,

которое они представляют. Эти изделия необходимо установить в те же места на испытываемом объекте, что и при установке на ЛА. Если токопроводящий объект может быть ориентирован в несколько положений, то при проведении испытаний необходимо использовать наихудшие положения. Обычно такими положениями являются те, при которых расстояние до токонепроводящей обшивки является кратчайшим, или приводящие к наибольшим напряженностям электрического поля в направлениях, перпендикулярных к поверхности ЛА.

Другие проводящие ток элементы, такие как крепежные элементы, монтажные рамы, узлы навески и защелки должны быть также представлены при испытании.

Все токопроводящие объекты, которые в реальной установке имеют металлизацию (то есть заземление) на конструкцию ЛА, должны быть электрически соединены с опорной конструкцией и макетами соседних поверхностей ЛА. Антистатическое лакокрасочное покрытие должно быть соединено с опорной конструкцией типовым способом, как это делается на ЛА.

Для проведения испытаний по классификации ARP5416 [2.2] Можно использовать три компоновки испытательного оборудования, обозначаемые как Испытательная установка А, Испытательная установка В и Испытательная установка С. Испытательные установки А и В более всего подходят для испытаний готовых изделий или прототипов испытываемых объектов, таких как головной обтекатель антенны. Установка С более всего подходит для доводочных испытаний с целью определения конструкции панелей обшивки и конфигураций молниеотвода. Каждая компоновка предназначена для создания электрических воздействий, например, коронного разряда или стримеров, на испытываемом объекте (но не на внешнем электроде), возникающих в полете непосредственно перед попаданием разряда молнии. После начала ионизации воздуха в испытываемом объекте стример распространяется в направлении другого электрода, который должен иметь большие геометрические размеры для того, чтобы предоставить эквипотенциальную поверхность электрического поля на некотором расстоянии от крайних точек ЛА. В данном случае внешний испытательный электрод оказывает минимальное влияние на результат испытаний.

На рис. 2.4 – 2.7 показаны компоновки испытательных установок A, B, и C, содержащие высоковольтный генератор, испытываемый объект и внешний электрод [2.2].

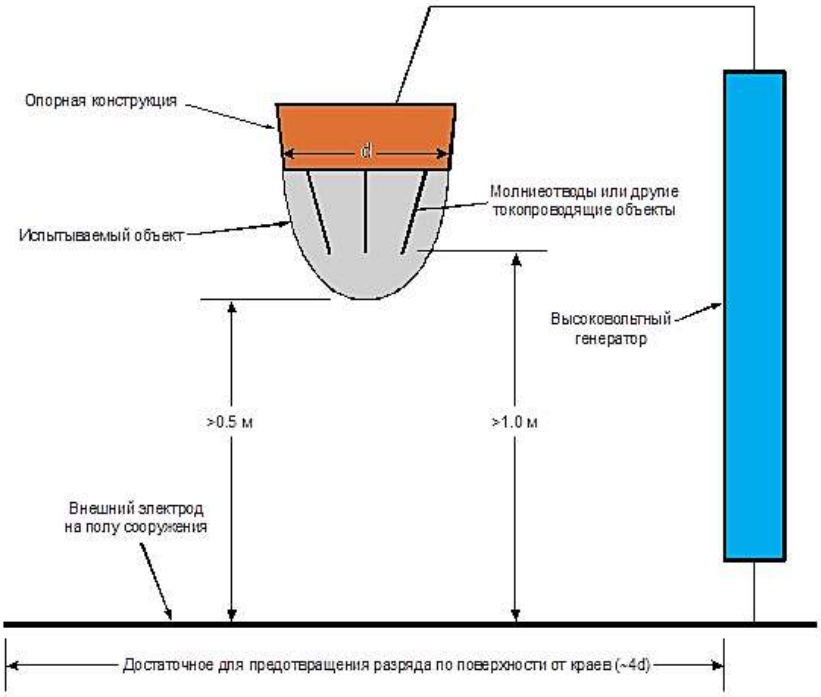


Рис. 2.4 - Испытание на начальное попадание лидера (Испытательная установка типа A).

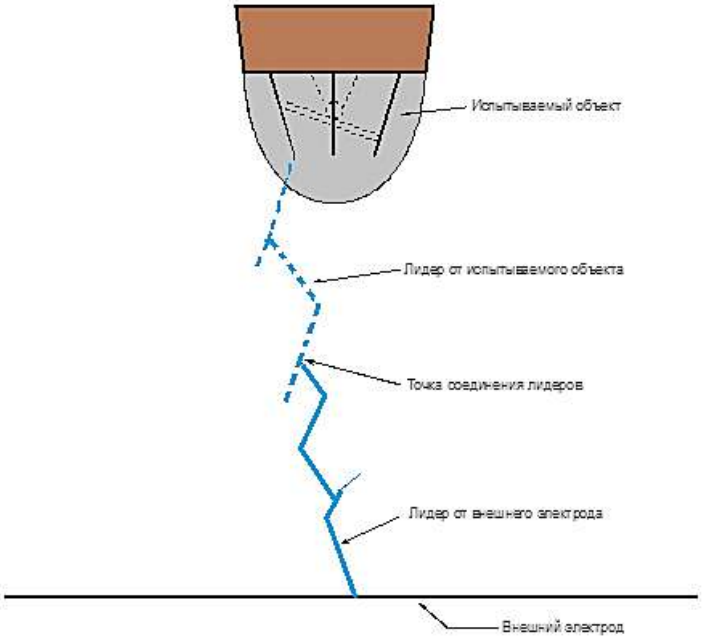


Рис. 2.5 - Точка соединения лидеров.

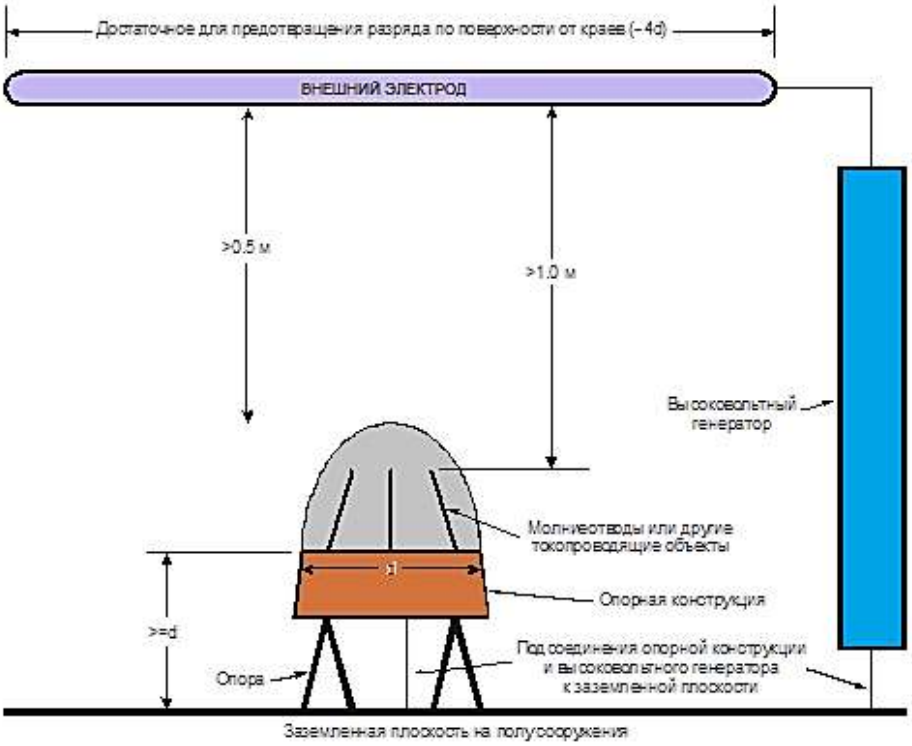


Рис. 2.6 - Испытание на начальное попадание лидера
(Испытательная установка типа В)

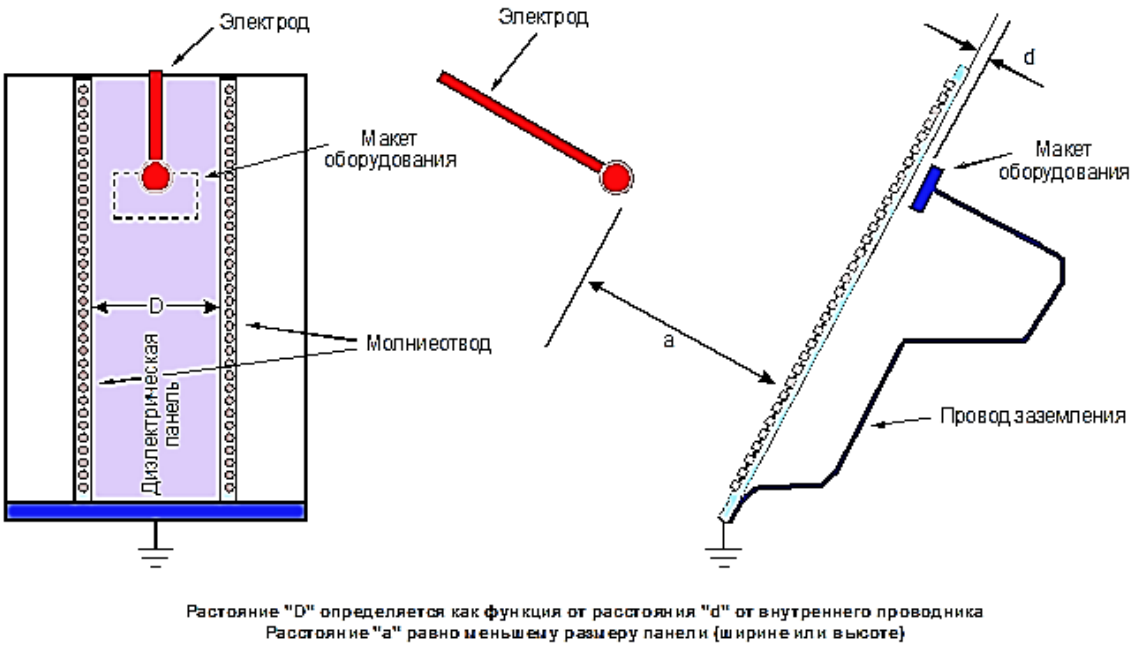


Рис. 2.7 - Компоновка для оценки защитных устройств элементов
конструкций ЛА (Испытательная установка типа С.

Испытания на начальное попадание лидера с использованием установки типа А (рис. 2.4). Испытываемый объект установлен над внешним электродом, представляющим собой заземленную плоскость большой площади, размещенную на полу сооружения (рис. 2.6). Размеры заземленной плоскости и расстояние между испытываемым образцом и заземленной плоскостью зависят от размера испытываемого объекта. Обычно необходимо проводить испытания объекта, ориентируя его в двух или более различных положениях, чтобы учесть те направления электрического поля, в которых оно может воздействовать на этот объект во время полета.

Схема установки для проведения испытаний головного обтекателя самолета на начальное попадание лидера с использованием испытательной установки типа А при перехвате удара на объект испытания приведена на рис. 2.8.

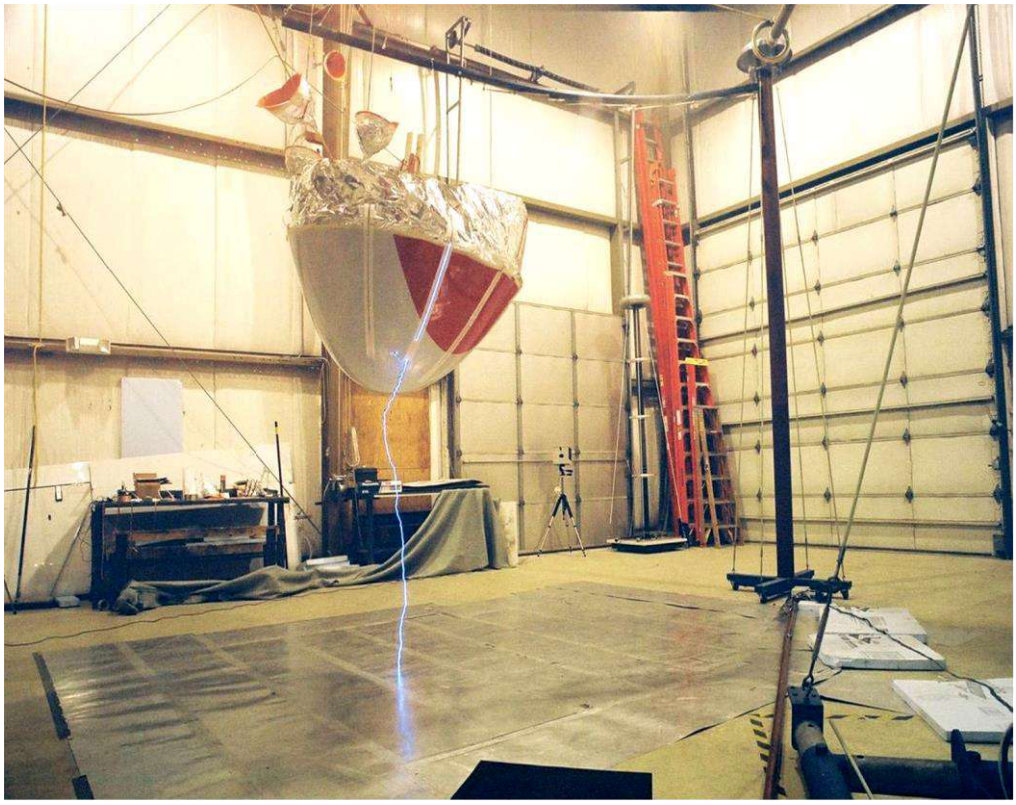


Рис. 2.8 – Испытание головного обтекателя самолета на начальное попадание лидера (испытательная установка А) [2.10]

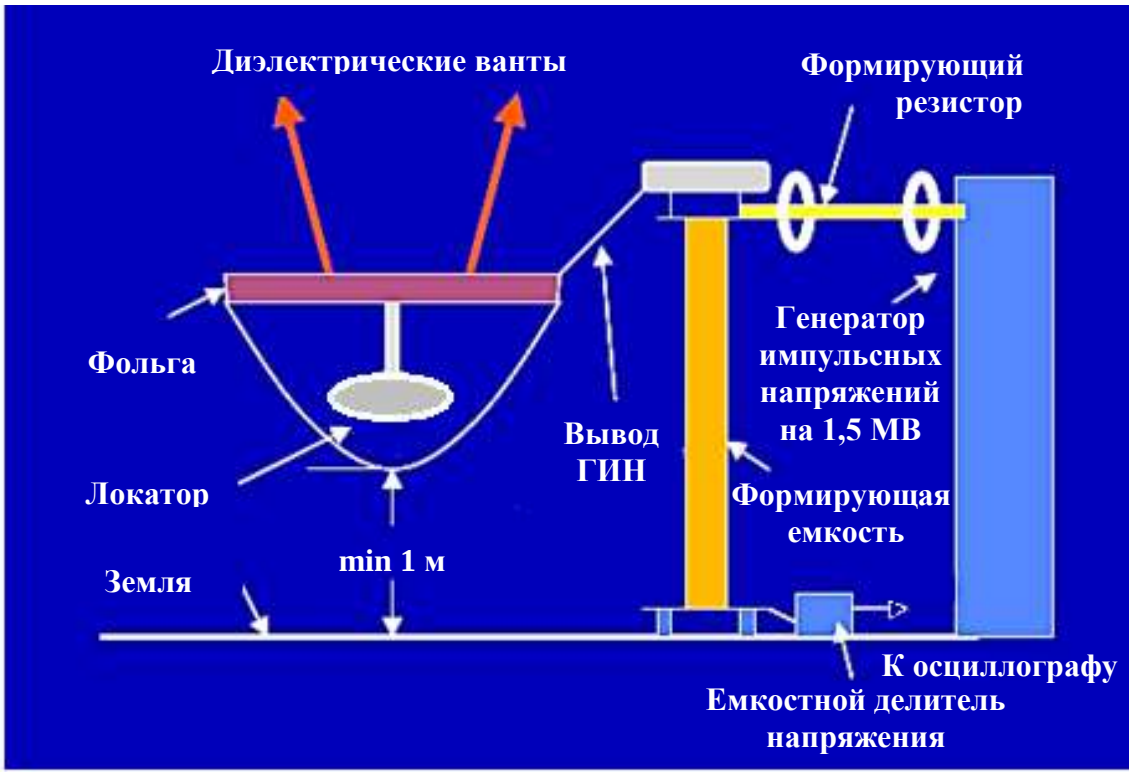


Рис. 2.9 - Установка для проведения испытаний головного обтекателя самолета на начальное попадание лидера на испытательной установке типа А при перехвате удара на объект испытания [2.10]

На рис. 2.10 приведены результаты испытаний головного обтекателя самолета на начальное попадание лидера с использованием испытательной установки типа А при перехвате удара на объект испытания.

Для достоверности данного вида испытаний необходимо соблюсти четыре ниже следующих условия:

1. Внешний электрод должен располагаться на расстоянии не менее 1 м от ближайшего проводящего элемента (внутри или снаружи испытываемого объекта).

2. Внешний электрод должен располагаться на расстоянии не менее 0,5 м от поверхности обшивки испытываемого объекта.

3. Соединение стримеров должно происходить в воздухе вдали от испытываемого объекта (это может подтверждаться фотографиями разрядов). На рис. 2.5 показана точка соединения лидеров.

4. Стример от внешнего электрода не должен начинаться на краю этого электрода.

Рис. 2.10 - Результаты испытаний головного обтекателя самолета на начальное попадание лидера с использованием испытательной установки типа А при перехвате удара на объект испытания [2.10].

Испытание на начальное попадание лидера с использованием установки типа В (рис. 2.6.). Испытываемый объект установлен над заземленной плоскостью на опорах на расстоянии, превышающем ширину испытываемого объекта *d*, с целью снижения влияния заземленной плоскости на результаты испытаний (рис. 2.6). Внешний электрод подвешен над испытываемым объектом и находится под высоким напряжением во время испытаний. Размеры внешнего электрода и расстояние между испытываемым объектом и внешним электродом зависят от размеров испытываемого объекта. Обычно необходимо проводить испытания объекта, ориентируя его в двух или более различных положениях, чтобы учесть те направления электрического поля, в которых оно может воздействовать на этот объект во время полета.

Для достоверности проведения этого вида испытаний необходимо соблюсти пять следующих условий:

1. Внешний электрод должен располагаться на расстоянии не менее 1 м от ближайшего проводящего элемента (внутри или снаружи испытываемого объекта).
2. Внешний электрод должен располагаться на расстоянии не менее 0,5 м от поверхности обшивки испытываемого объекта.
3. Соединение стримеров должно происходить в воздухе вдали от испытываемого объекта (см. рис. 2.5).

4. Стример от внешнего электрода не должен начинаться на краю этого электрода.

5. Подсоединяемый к ЛА конец молниеотвода или другого проводящего объекта должен располагаться над заземленной плоскостью на расстоянии, превышающем ширину испытываемого объекта *d,* с целью снижения влияния заземленной плоскости на результаты испытаний.

Методики проведения испытаний по определению места первоначального присоединения лидеров к непроводящим конструкциям таким как носовые обтекатели самолетных антенн, концы крыльев, изготовленным из непроводящих материалов таких как усиленные стекловолокном композиты или стеклянные, поликарбонатные ветровые стекла постоянно совершенствуются.

В раннем стандарте испытаний самолетов (1980) испытательное напряжение прикладывалось от *стержневого электрода*, расположенного (обычно) в 1 м от поверхности объекта испытаний. Защитные конструкции обтекателей, проверенные на основе этой методики испытаний, в полете функционировали не так, при лабораторных испытаниях с плоским высоковольтным электродом. Обтекатели антенн из стекловолоконного композита, прошедшие испытания со стержневым электродом, регулярно перфорировались ударами молнии в полете. Испытательное напряжение, прикладываемое в этих испытаниях, было стандартным импульсным напряжением молнии (рис. 1.1 б), таким, что перекрытие происходило на фронте волны (рис.2.11).

Это расхождение побудило группу из производителей самолетов, производителей полосчатых диверторов молнии и нескольких правительственных агентств в США и Европе выполнить (1993 - 1999) совместный исследовательский проект, обычно называемый «Совместный проект по обтекателям антенн», с целью понять природу электрических полей на самолетных обтекателях антенн во время процесса присоединения лидера.

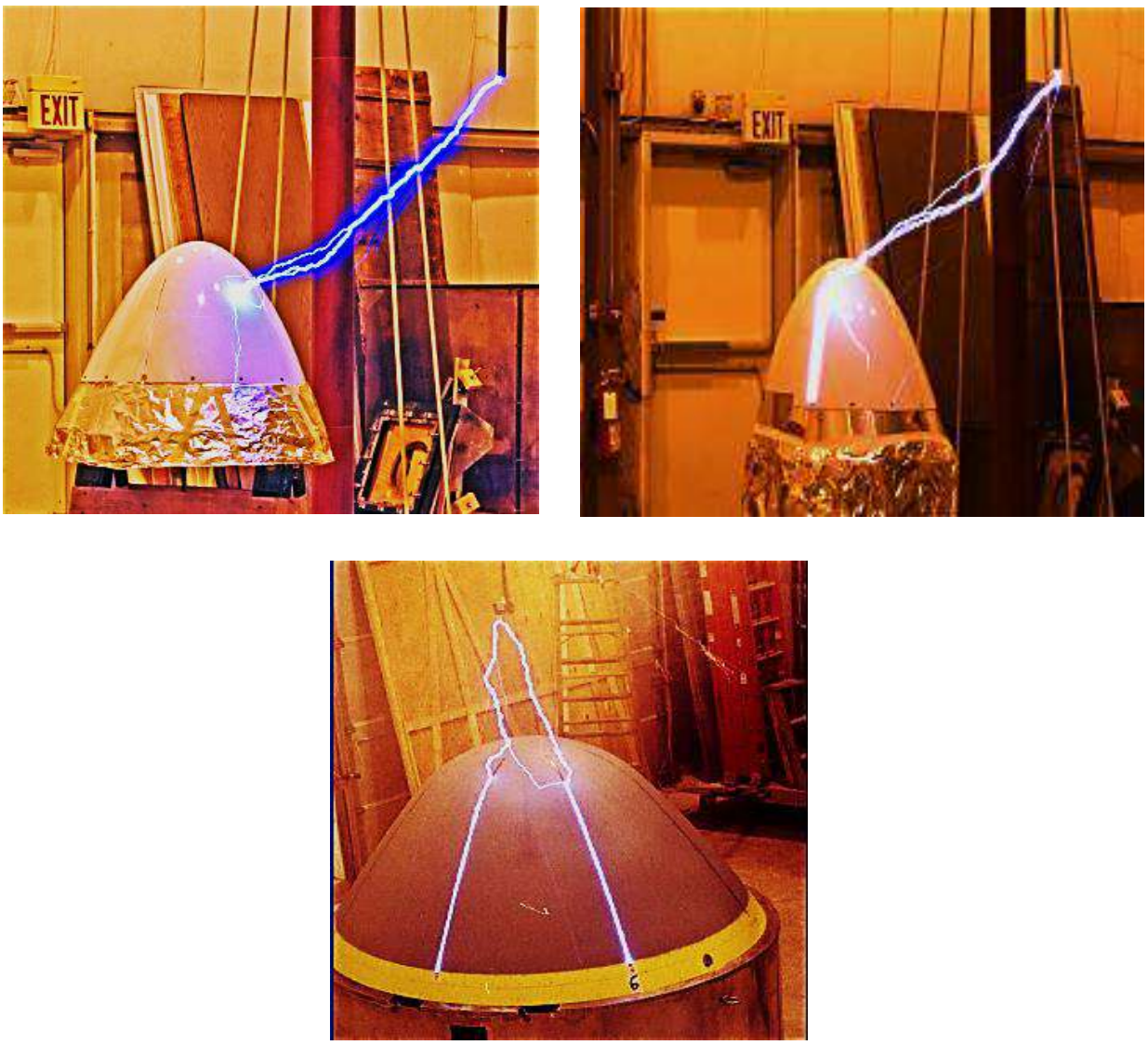


Рис. 2.11 - Испытание головного обтекателя самолета на начальное попадание лидера по стандартам 1980 г. [2.10]

В результате этих работ были сформулированы следующие выводы [2.12]:

• Электрические поля на обтекателях увеличиваются медленнее (от сотен до тысяч микросекунд), чем ранее считалось (несколько мкс);

• Весь процесс, связанный с соединением стримеров/лидеров, индуцированный либо окружающими электрическими полями, либо зарядом в приближающемся молниевом лидере, зарождается на обтекателе и имеет время распространиться на десятки метров от обтекателя перед тем, как произойдет соединение лидеров;

• Лабораторное испытание, в котором быстро нарастающее напряжение прикладывается от стержневого электрода, расположенного на расстоянии ~1 м от поверхности обтекателя, не является корректной имитацией процесса присоединения молнии в полете. Быстро нарастающее напряжение не обеспечивало достаточно времени для формирования стримеров и лидеров на объектах в пределах обтекателя, и стержень концентрировал поле в искусственных направлениях.

• Необходимо предложить новый метод испытаний, в котором электрическое поле, прикладываемое между обтекателем и диффузным электродом противоположной полярности, нарастает медленнее.

Также, в [2.12] экспериментально было определено, что этот вид испытаний должен проводиться исключительно с *полномасштабными конструкциями.* Реакцию этих материалов невозможно определить из модельных испытаний.

Для проведения этих испытаний необходимо от высоковольтного генератора прикладывать коммутационное импульсное напряжение, заданное так, чтобы вызвать перекрытие на фронте импульса (см. рис 1.1 г). Форма коммутационного импульсного напряжения для испытаний полномасштабных объектов подобных обтекателям самолетных антенн предписывается, поскольку именно увеличенное время нарастания до перекрытия предоставляет время для развития и продвижения стримеров и лидеров от многочисленных мест внутри и снаружи испытуемых объектов, подобных обтекателям самолетных антенн.

Цель испытаний – подтвердить, что установленные снаружи диверторы молнии «улавливают» лидер и предотвращают перфорацию обтекателя из композита. Для успешности испытания требуется, чтобы соединение соединяющего лидера (исходящего от испытуемого объекта) и любого лидера, приближающегося от плоскости земли, происходило по крайней мере на полпути через воздушный промежуток между объектом испытания и заземленной плоскостью. Стандарты испытаний самолетов, в частности ARP5416 [2.2] требуют, чтобы воздушный промежуток был больше 1 м, принимая во внимание лаборатории с недостаточными возможностями по напряжению, не позволяющими осуществить перекрытие на больших промежутках.

Конечно, большие промежутки были бы предпочтительнее, поскольку лидеры, исходящие от объекта испытаний, могли бы продвинуться на более реалистическое расстояние в воздухе перед соединением с противостоящим лидером.

Очевидно, требование по воздушному промежутку быть больше 1 м это существенное отклонение от полномасштабной реальности, в которой действительный соединяющий лидер распространился бы на десятки метров от самолета перед соединением с приближающимся молниевым лидером, или другим источником заряда противоположной полярности. Для испытаний объектов, расположенных на расстоянии 2 м от плоскости земли, требуется коммутационное импульсное напряжение 2000 кВ (когда объект испытаний имеет отрицательную полярность). Желание дать возможность многим лабораториям проводить такие испытания привело к условию «больше 1 м» в спецификациях. Идеальный результат испытаний – это когда соединяющий лидер достигает плоскости земли (обычно алюминиевой панели) до соединения лидеров, на основании допущения, что, если бы лабораторная плоскость земли не присутствовала, соединяющий лидер продвинулся бы дальше от объекта испытаний [2.12].

Комитеты по самолетным стандартам согласились с этими выводами и определили метод испытаний по определению места первоначального присоединения лидеров к непроводящим конструкциям таким как носовые обтекатели самолетных антенн, концы крыльев, изготовленным из непроводящих материалов таких как усиленные стекловолокном композиты или стеклянные, поликарбонатные ветровые стекла, описанный ARP5416 [2.2].

Опыт эксплуатации в условиях ударов молнии в полете самолетных обтекателей с защитными конструкциями, испытанными по данному стандарту, показал их успешное функционирование в полетной грозовой обстановке, и был сделан вывод, что данное испытание является адекватной имитацией обстановки с электрическим полем, испытываемой в полете. Стримеры и лидеры получили возможность формироваться от проводящих объектов на и внутри обтекателя более естественным образом.

Испытания по оценке защитных свойств элементов конструкций ЛА с использованием установка типа С (рис. 2.7). В

такой компоновке оценивание вариантов защитных устройств и положения устройств на образце токонепроводящей обшивки может быть осуществлено до утверждения конструкции защиты и установки таких устройств на испытываемый объект (промышленное изделие или прототип) (рис. 2.12).

Рис. 2.12 - Компоновка для оценки защитных устройств элементов головного обтекателя ЛА с использованием испытательной установки типа С

Типовая панель обшивки должна иметь форму квадрата со стороной 1м, хотя допускаются другие формы и размеры, достаточные для полномасштабного размещения защитных устройств. Должны применяться материалы обшивки, отделки поверхности и лакокрасочные покрытия, идентичные применяемым в производстве. Типовым использованием данного испытания является определение расстояния D между молниеотводами, устанавливаемыми на обтекатель антенны.

Молниеотвод должен быть такой же длины, как и устанавливаемый на ЛА. Макеты любых проводящих ток изделий, расположенных за защитной поверхностью, должны быть установлены в соответствующем месте за обшивкой на расстоянии d. Защитные устройства обычно имеют потенциал заземления сооружения, а электрод имеет высокий потенциал. Опыт показывает, что для

соблюдения реальных условий испытания электрод должен располагаться посередине между молниеотводами (см. пример на рис. 2.7), чтобы предотвратить контакт по периметру кромки и получить реальный результат.

Электрод должен располагаться над поверхностью панели на расстоянии, равном размеру панели, если панель имеет квадратную форму, или на расстоянии, равном размеру меньшей стороны панели, если панель прямоугольная. Молниеотводы можно передвигать, располагая их на большем или меньшем расстоянии с целью оптимизации конструкции и, кроме того, предотвращения пробоя.

Компоновка на рис. 2.12 не эквивалентна компоновке испытательных установок А и В для проверочных испытаний, однако, как показывает опыт, расстояние между молниеотводами, определенное в ходе доводочных испытаний, успешно подтверждается последующими проверочными испытаниями объекта, например, обтекателя антенны, при использовании такого же расстояния между молниеотводами.

Испытательная установка А является наиболее предпочтительной компоновкой, так как она обычно допускает применение внешнего электрода больших размеров (то есть проводящая поверхность на полу лаборатории), однако данная компоновка требует, чтобы испытываемый объект был подвешен на потолке лаборатории.

Испытательная установка В предназначена для создания аналогичной конфигурации электрического поля вокруг испытываемого объекта, при этом испытываемый объект больших размеров и массы, и опорная конструкция должны располагаться на полу лаборатории. В данной компоновке электрод большого диаметра должен был подвешен над испытываемым объектом.

Испытательная установка С является наиболее предпочтительной для проведения доводочных испытаний для оценивания панелей обшивки и молниеотводов. Однако испытания плоских панелей не должны применяться для проверки конструкции защитных устройств, так как образцы плоской панели не отражают характерных особенностей непроводящих конструкций, которые необходимо проверить.

*Испытание на попадание перемещающегося канала молнии***.** Данный вид испытаний обычно проводят для компонентов ЛА, расположенных в зоне 1А, но не подверженных начальному

попаданию лидера молнии. То есть, для тех частей Зоны 1А, в которые предсказано начальное попадание лидера, должен использоваться метод испытаний изложенный в 2.2.2.1, а данный метод испытаний должен использоваться для того продолжения Зоны 1А, которое определяется перемещением ЛА относительно установившегося канала молнии.

Руководство по определению мест начального попадания лидера и удлинений Зоны 1А за счет воздействия перемещающегося лидера приведено в документах ARP5414 [2.5]. Это испытание также применимо к тем областям в Зонах 1С, 2А или 2В, которые подвергаются воздействиям перемещающихся каналов молнии, в соответствии с описанием, приведенным в ARP5414 [2.5].

Это испытание проводят, чтобы оценить:

- места возможных пробоев на токонепроводящих (т.е. диэлектрических) поверхностях;
- пути распространения разряда по токонепроводящим поверхностям, или
- характеристики защитных устройств, таких как молниеотводы на обтекателях антенн.

Данное испытание обычно проводится с применением высоковольтного генератора, неспособного создавать такие компоненты тока, которые должны протекать в испытываемом объекте в соответствие с зоной воздействия разряда молнии, в которой должен размещаться испытываемый объект. Однако, если оборудование способно создать требуемое испытательное напряжение, сопровождаемое применимыми компонентами тока, то испытание на физическое повреждение *сильными токами* может проводиться совместно с данным испытанием.

В качестве испытываемого объекта необходимо использовать промышленно изготавливаемое полноразмерное оборудование или соответствующий действительности прототип. Для получения реального развития коронного разряда и стримеров от токопроводящих элементов необходимо включать в испытание любые лакокрасочные покрытия, в частности любые антистатические лакокрасочные покрытия или диэлектрические покрытия электропроводящих элементов. Антистатическое лакокрасочное покрытие должно быть соединено с токопроводящей конструкцией типовым способом, как это делается на ЛА.

Испытываемый объект также может представлять собой токонепроводящую поверхность, например, крышку эксплуатационного люка или обтекатель антенны, являющиеся частью конструкции ЛА. В этом случае испытываемый объект также может быть готовым изделием или соответствующим действительности прототипом, устанавливаемым на панель, представляющую окружающую поверхность ЛА.

На рис. 2.13 и 2.14 показана компоновка типовой испытательной установки, иллюстрирующая испытываемый объект и типовое положение испытательного электрода.

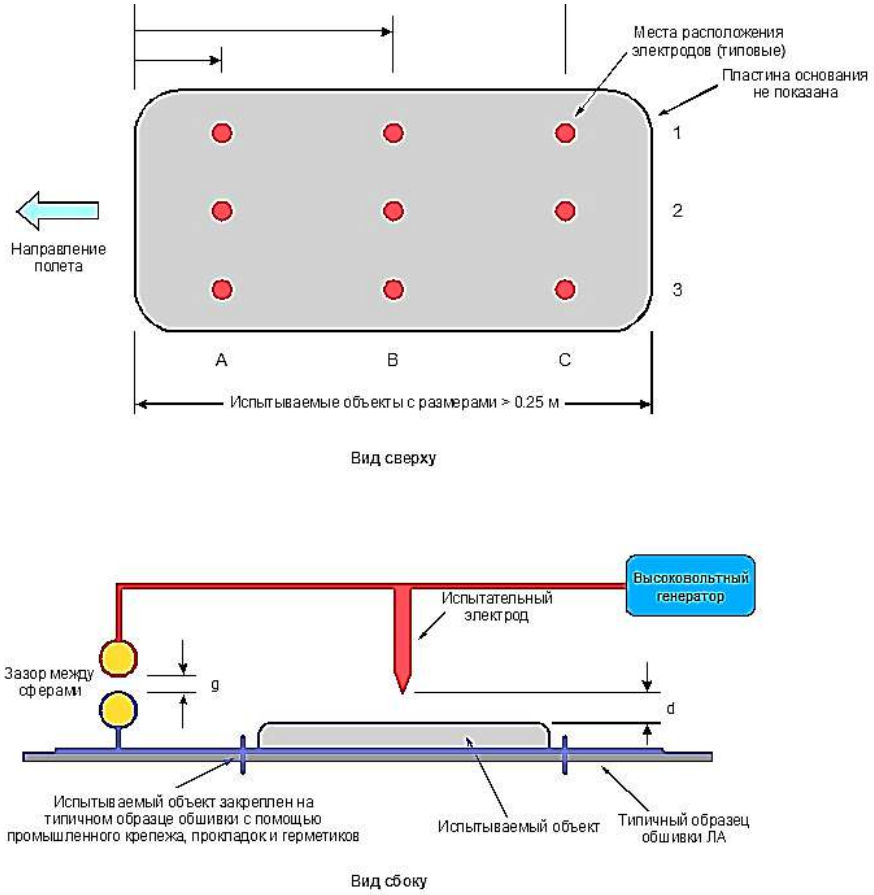


Рис. 2.13 - Компоновка для испытания на попадание перемещающегося канала молнии в крупногабаритные испытываемые объекты [2.2]

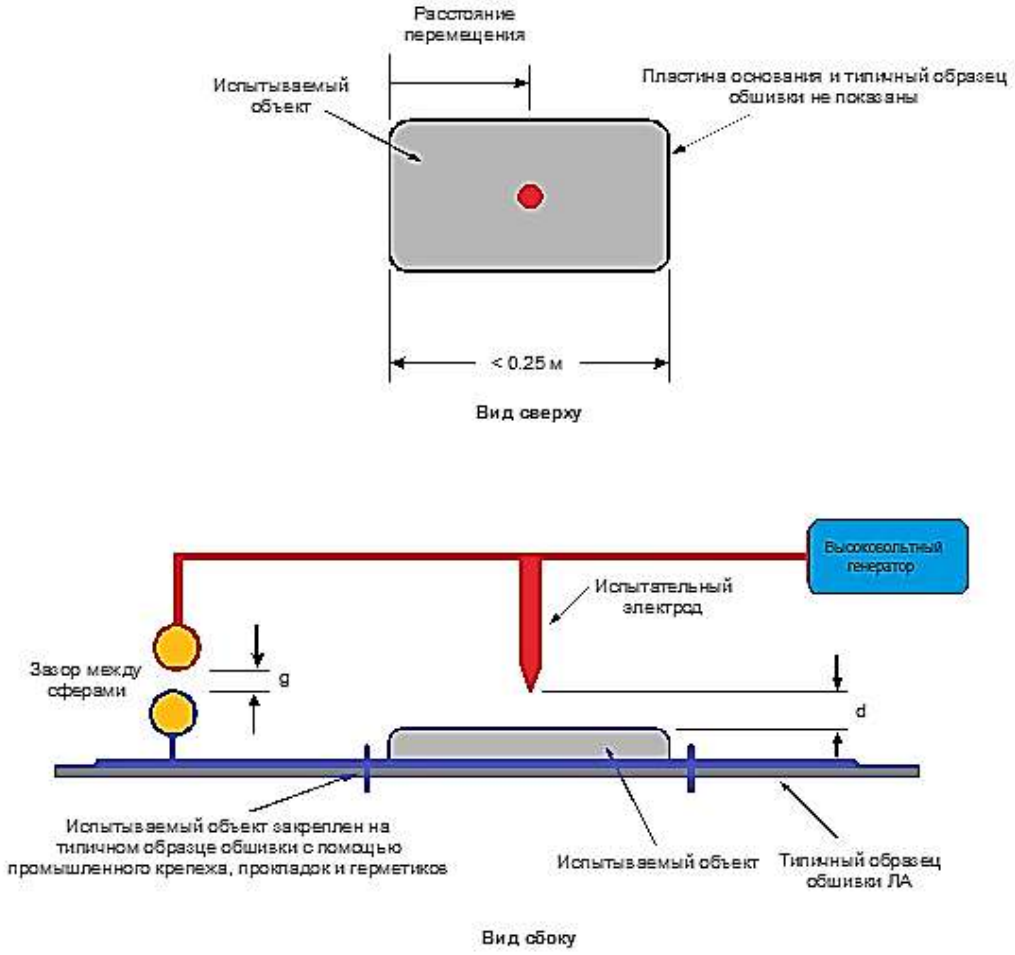


Рис. 2.14 - Компоновка для испытания на попадание перемещающегося канала молнии в малогабаритные испытываемые объекты [2.2]

Для крупногабаритных объектов с размерами порядка 0,25 м и более эти испытания обычно проводятся с несколькими положениями электродов, как показано на рис. 2.13. Малогабаритные объекты обычно могут испытываться с применением одного испытательного положения электрода, расположенного в центре над испытываемым объектом (см. рис. 2.14). Зазор g между сферами и расстояние d до испытательного электрода определяются в процессе регулировки испытательной установки.

На рис. 2.15 приведен общий вид высоковольтной установки для испытаний на попадание перемещающегося канала молнии.

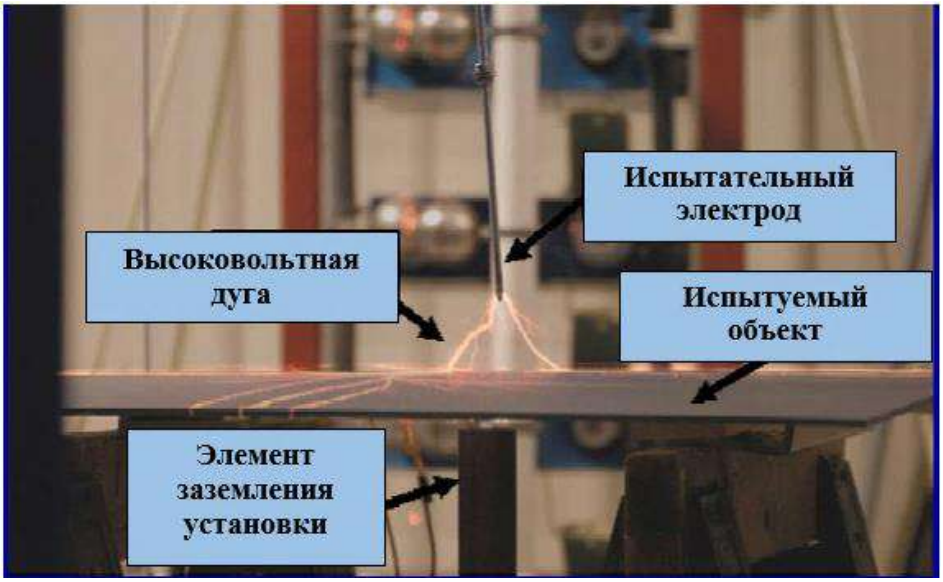


Рис. 2.15 – Общий вид высоковольтной установки для испытаний на попадание перемещающегося канала молнии [2.10]

Испытание на попадание высоковольтного разряда на моделях. Целью данного вида испытаний является определение местоположения на ЛА областей начального попадания лидера молнии. Это первый шаг метода определения зон воздействия разряда молнии с помощью испытаний согласно ARP5414 [2.5]. В некоторых случаях испытания на моделях должны быть дополнены другими способами для уточненного определения мест начального попадания лидера молнии. Это особенно справедливо для ЛА, содержащих большое количество токонепроводящих конструкционных материалов.

Испытываемый объект должен в точности воспроизводить внешний вид ЛА и иметь наибольший размер не менее 1 м. Внешние поверхности модели должны проводить электрический ток, даже если некоторые поверхности ЛА, такие как обтекатели антенн и лобовые стекла, изготовлены из токонепроводящих материалов. С помощью испытаний на моделях нельзя определить точные места попадания молнии на токонепроводящих поверхностях. Поэтому, используется модель с полностью токопроводящими поверхностями, и это испытание определяет, какая из поверхностей потенциально подвержена начальному попаданию лидера молнии. Для определения точных мест поражения молнией, возможности разрядов по

поверхности или пробоев, или эффективности защитных устройств должны применяться испытания полномасштабных токонепроводящих поверхностей. Если существует или планируется более чем одна конфигурация летательного аппарата, то различные возможные конфигурации должны моделироваться отдельно.

При этом проводят два вида испытаний на попадание высоковольтного разряда на моделях:

- испытания по определение местоположения на ЛА областей начального попадания лидера молнии;
- моделирование естественно приближающегося лидера молнии или разряда, начинающегося от ЛА.

На рис. 2.16 и 2.17 показаны методы проведения выше приведенных видов испытаний.

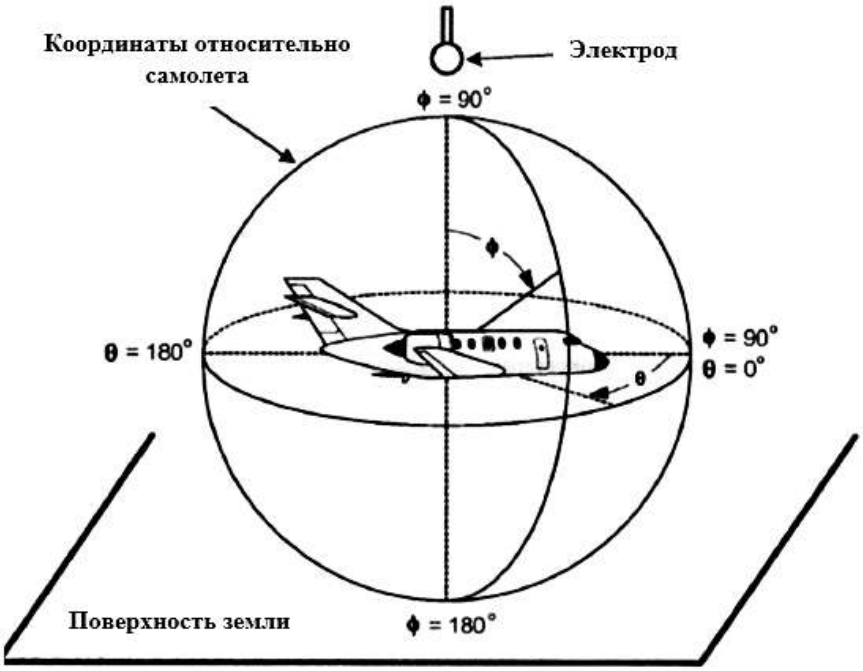


Рис. 2.16 - Испытательная установка для определения мест начального попадания лидера молнии на моделях. (показано моделирование естественно возникающего лидера) [2.2]

Рис. 2.17 – Испытательная установка для определения мест начального попадания лидера молнии на моделях (показано моделирование разряда, начинающегося от ЛА) [2.2]

Для моделирования естественного возникающего лидера от облака к ЛА необходимо установить модель на электрически изолированные подставки или подвесить ее на токонепроводящих шнурах таким образом, чтобы она располагалась между высоковольтным электродом и заземленной плоскостью (рис. 2.16). При этом верхний электрод может быть стержнем или небольшой сферой диаметром не более 50 мм.

Для представления разряда, начинающегося от ЛА, необходимо использовать большую плоскую пластину для представления условий окружающего поля, предшествующего образованию двунаправленных лидеров от ЛА (рис. 2.17).

Этот плоский электрод в форме пластины должен иметь достаточно большие размеры, чтобы концентрация электрического поля на границах электрода не оказывала влияния на результаты

эксперимента (т.е. разряды должны возникать к плоским поверхностям, а не к кромкам электрода и заземленной плоскости). Для этого необходимо, чтобы размеры электрода и заземленной плоскости были как минимум в три раза больше, чем наибольший размер модели.

Для определения мест возможных попаданий приближающегося лидера молнии необходимо провести испытания, представляющие приближение лидеров молнии из всех возможных направлений, предполагаемых в полете. Если места разрядов, начинающихся от ЛА, определены, модель должна допускать возможность воздействия таких направлений окружающего электрического поля, которые возможны в полете. В большинстве случаев более целесообразно изменение пространственной ориентации модели, а не положения электродов. Поскольку лидеры молнии и внешние электрические поля могут возникать со всех направлений, то модель обычно располагается во многих положениях по отношению к электродам. Такие испытания модели с приращением углового положения в 30° относительно осей крена, тангажа и рыскания обычно позволяют определить все места начального попадания лидера, характерные для ЛА подобной формы в полете. При определении возможных областей воздействия молнии, таких как гондолы двигателя, может оказаться целесообразным использовать дополнительные положения, отражающие промежуточные направления по отношению к базовым плоскостям.

При этом высоковольтный электрод необходимо располагать на расстоянии, представляющем дистанцию поражения молнией равную 50 м от ближайшей поверхности модели. Дистанция поражения масштабируется с тем же коэффициентом, что и модель. Например, если проводятся испытания для модели с масштабом 1/30, то высоковольтный электрод необходимо расположить на расстоянии 50/30 = 1,67 м от модели. Расстояние модели от заземленной плоскости менее важно, т.к. заземленная плоскость фактически является эквипотенциальной поверхностью, расположенной где-либо в пространстве. Обычно данное расстояние должно быть равно, как минимум, наибольшему размеру модели, измеряя от ближайшей крайней точки модели в любой из ее ориентаций. Изменение ориентации модели может потребовать изменения положения высоковольтного электрод, таким образом, чтобы сохранялась

моделируемая дистанция поражения молнией 50 м, однако нет необходимости изменять расстояние от модели до заземленной плоскости. При каждой ориентаций модели электрод должен располагаться над центром модели.

Для случая, когда лидер молнии начинается от ЛА, модель располагается посередине между высоковольтным электродом и заземленной плоскостью. Расстояния от модели до электрода и заземленной плоскости должно соответствовать дистанции поражения 50 м до ближайшей крайней точки модели, но нет необходимости изменять положение электрода, когда модель ориентирована так, что расстояние до электрода превышает промасштабированную дистанцию поражения 50 м.

Места попадания разрядов, связанных с перекрытиями дугой от высоковольтного электрода, могут рассматриваться как начальные точки “входа” лидера, а места, из которых разряды идут к заземленной плоскости, могут рассматриваться в качестве точек “выхода”. Все места, в которые испытательный разряд молнии входит или из которых выходит, должны считаться точками начального попадания лидера в ЛА могут быть местами входа или выхода.

При проведении испытаний масштабная модель самолета (обычно в масштабе 1/20 – 1/40) подвешивается между электродами, представляющими либо приближающийся молниевый лидер естественного происхождения, либо окружающие поля, которые существуют перед инициированием молнии в самолет. Для наблюдения и фотографирования мест возникновения первоначального лидера на модели прикладываются ионизирующие поля.

Несмотря на факт, что локальные радиусы кривизны и, следовательно, локальные напряженности электрического поля на оконечностях модели не такие же как на полномасштабных самолетах, сравнительные радиусы в модели в сравнении с полномасштабным самолетом подобны (если не точно одинаковы), поэтому результаты испытаний на моделях надежно предсказывают места на самолете, где возникают соединяющие лидеры молнии или двунаправленные лидеры в случае удара, инициируемого самолетом. Независимо от того, возникают ли самолетные лидеры в результате ситуации естественного происхождения на рис. 2.16 или в ситуации,

«инициируемой самолетом», на рис. 2.17, места присоединения первоначального лидера на моделях оказываются в основном одними и теми же, хотя иногда в схеме на рис. 2.16 происходит больше ударов в места внутри главных оконечностей, чем в схеме на рис. 2.17. Стримеры с последующими лидерами всегда исходят от самолета перед тем, как лидеры соединяются и сформируется полная вспышка молнии.

На рис. 2.18 – 2.20 приведены типичные модельные испытания с масштабированными макетами самолетов.

Рис. 2.18 - Схема с масштабной моделью самолета, представляющая удары, инициируемые самолетом [2.12]. (Показанное положение представляет самолет в горизонтальном полете в горизонтально поляризованном поле перпендикулярном пути полета).

Рис. 2.19 - Типичное испытание с масштабной моделью самолета [2.12] (Показанное положение представляет самолет в горизонтальном полете в горизонтально поляризованном поле, ориентированном под углом 60 градусов к направлению полета).

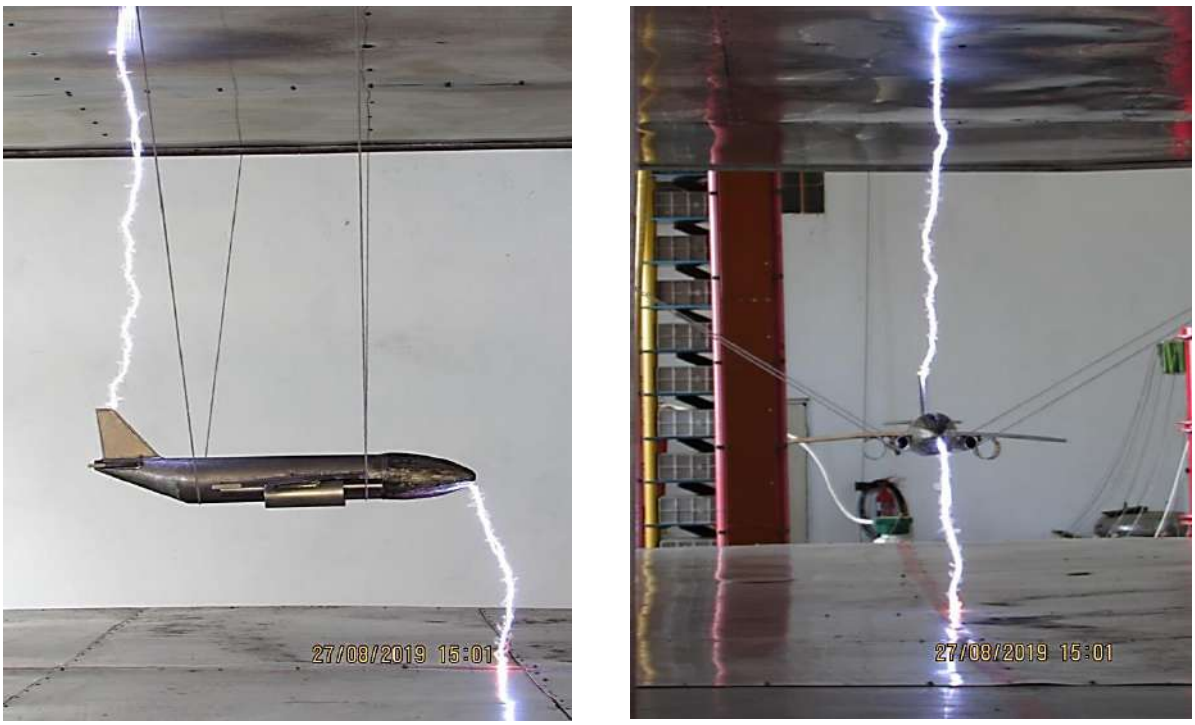


Рис. 2.20 - Типичное испытание с масштабной моделью самолета на определение точек входа/выхода токов молнии. (Центр сертификационных испытаний НИПКИ «Молния», Украина)

Многие годы опыта эксплуатации самолетов в условиях грозовой активности показали, что модельные испытания точно предсказывают, где имеется вероятность возникновения (т.е., «удара») молниевых лидеров от самолета в полете. Поэтому этот метод был одобрен органами сертификации летной годности как метод определения мест, куда молния первоначально может ударить в самолет, что является первым шагом при определении зон удара молнии в самолет и грозовой обстановки, связанной с каждой зоной. Модельное испытание используется только для определения возможных мест присоединения первоначального лидера на самолете, поскольку самолет пролетает через установившийся канал молнии, который может переприсоединиться к другим местам. Модельные испытания нельзя использовать, чтобы увидеть могут ли непроводящие поверхности, такие как носовые обтекатели антенн и окна, быть перфорированы электрическими полями, предшествующими ударам молнии. Это требует имитационных испытаний по присоединению лидера с полномасштабными частями самолетов.

Также этот метод используется для проведения сличительных испытаний по определению эффективности различных видов молниеприемников, в частности одного из их разновидностей – активных молниеприемников, применяемых для защиты объектов инфраструктуры наземных аэродромных служб. На рис. 2.21 приведены фотографии методов проведения данного вида испытаний. Для проведения этого вида испытаний применялся стандартный импульс напряжения 1,2/50 мкс с амплитудой 1 МВ.

Рис. 2.21 – Сличительные испытания различных видов молниеприемников (НИПКИ «Молния», Украина)

Модели наземного оборудования, такого как ветровые турбины, пусковое оборудование космических кораблей, линии передачи электроэнергии и корабли, также испытывались с целью определения возможных мест удара. В качестве примера на рис. 2.22 показано проведение испытаний с масштабной моделью ракеты на стартовом комплексе [2.12]. Стержневой электрод представляет конец продвигающегося лидера к объекту защиты на дистанции поражения (ДП) 200 м от пусковой установки. Воображаемая сфера качения, связанная с ДП 200 м, контактирует с местами, где могут возникнуть стримеры, которые могут развиться в соединяющие лидеры, и дополнительными местами присоединения молнии.

Рис. 2.22. Испытания с масштабной моделью ракеты на пусковой башне. ДП = 200 м (фото [2.12])

Принимается, что для самолетов места начального присоединения лидеров связаны с первыми ударами с пиками 200 кА, что соответствовало бы ДП большей чем 200 м. Стандарты испытаний моделей самолетов требуют устанавливать высоковольтный электрод на масштабированной ДП 50 м.

Эмпирические соотношения между ДП и током удара показывают [2.12], что ДП 50 м связана с током удара ~20 кА. Эта аномалия в стандартах испытаний самолетов иногда приводит к выводу, что первые удары большой интенсивности могут присоединяться глубоко внутри оконечностей самолета, что в реальности очень редкий случай.

Таким образом, опыт изучения ударов молнии в самолеты и заземленные конструкции показывает, что лабораторные испытания масштабных моделей надежно предсказывают большинство начальных мест присоединения молниевого лидера. Существуют исключения, в которых удары происходили в места ниже или внутри оконечностей конструкций, где происходит большинство реальных и модельных ударов. Эти исключения вероятно связаны с естественно приближающимися молниевыми лидерами с низкими плотностями заряда и короткими ДП, а также неожиданностями в продвижении ступенчатых лидеров (см. также Приложение к гл. 2).

2.2.1.2 Испытания на физическое повреждение сильными токами.

Эти испытания проводят для определения воздействий, вызванных попаданием молнии в поверхности ЛА и протеканием тока от этих точек контакта. Данные воздействия могут определяться в точке попадания или вдоль пути протекания тока молнии [2.1].

Испытание на проникновение электрической дуги. Данное испытание используется для элементов конструкции, расположенных в зонах 1A, 1B, 1C, 2A и 2B согласно ARP5414 [2.5]. Это испытание проводят для определения прямых воздействий, возникающих в местах возможного соприкосновения канала молнии с ЛА, или где высокие плотности тока и энергии могут распространяться от точки входа в течение разряда молнии. Примерами могут служит поверхности ЛА или компоненты, подверженные прямым воздействиям молнии или воздействиям перемещающегося разряда молнии, внутренние конструктивные элементы, способные проводить токи молнии, и установленные на наружной поверхности элементы, подверженные воздействиям прямого удара или проводимых токов.

Данное испытание проводят для оценки:

- повреждения основанием электрической дуги;
- путей пробоя токонепроводящих материалов в ширину или насквозь;
- образования участков перегрева;
- характеристик проплавления;
- адекватности защитных слоев;
- характеристик соединений и креплений оборудования;
- напряжения и тока в интересующих точках.

Данные испытания проводятся на промышленно изготавливаемом полноразмерном изделии или соответствующем действительности прототипе.

На рис. 2.23 приведена схема высоковольтной установки для испытаний носового обтекателя самолета на прожиг токами молнии. Данные испытания могут также проводиться на панелях, образцах для испытания или секциях частей ЛА. Эти панели, образцы для испытания и секции частей должны изготавливаться с применением соответствующих технологических процессов, лакокрасочных материалов и других покрытий, с использованием соответствующих узлов соединений и материалов. Для защитных устройств, требующих определенного напряжения для ионизации, таких как участки молниеотводов, создаваемое генератором напряжение должно быть достаточным для ионизации испытываемого объекта во время сильноточных испытаний. Основным аспектом, на который следует обратить внимание при проведении испытаний, является

способность крепежного оборудования пропускать ток в конструкцию ЛА.

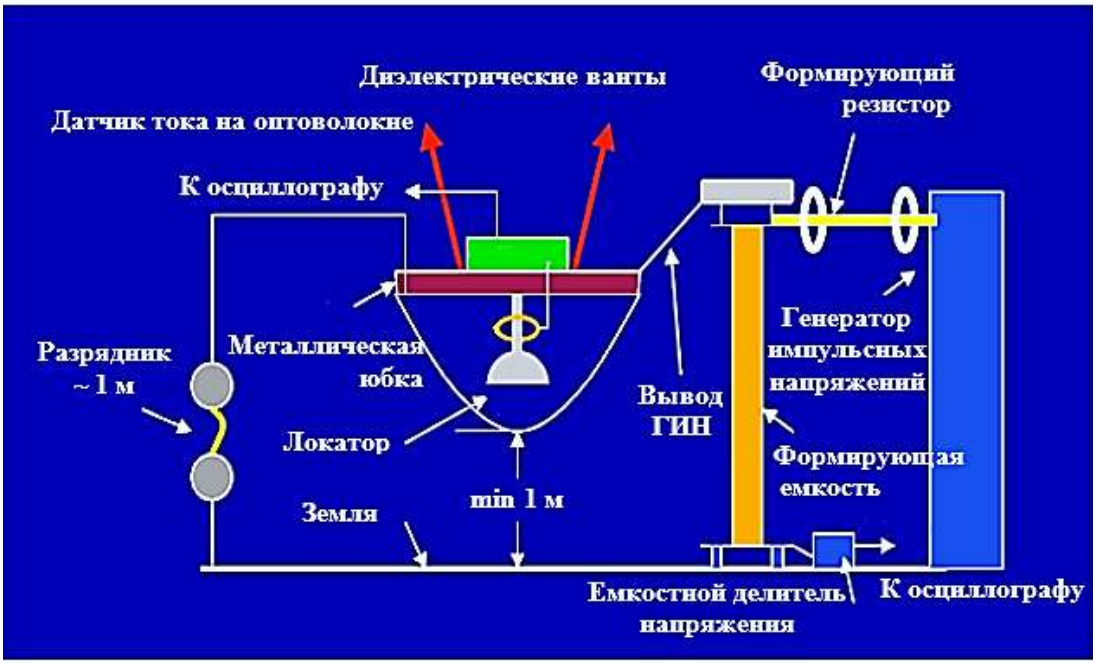


Рис. 2.23 - Схема высоковольтной установки для испытаний носового обтекателя самолета на прожиг токами молнии [2.10].

Как правило эти испытания обычно проводят для частей ЛА, расположенных в областях начального попадания лидера. Примером могут служить законцовки крыла, изготовленные из токонепроводящего материала, обтекатели антенн и крупногабаритные обтекатели антенн. Результаты данного вида испытаний ложатся в основу выбора материала стенки обтекателя антенны с точки зрения минимальных ее разрушений при ударах молнии, определения путей разряда по поверхности или пробоя вдоль диэлектрических поверхностей или сквозь них, и/или определения характеристик защитных устройств, таких как молниеотводы обтекателя антенны.

Для большинства испытаний на проникновение электрической дуги следует использовать электрод типа «отклоняющий струю», как показано на рис. 2.24.

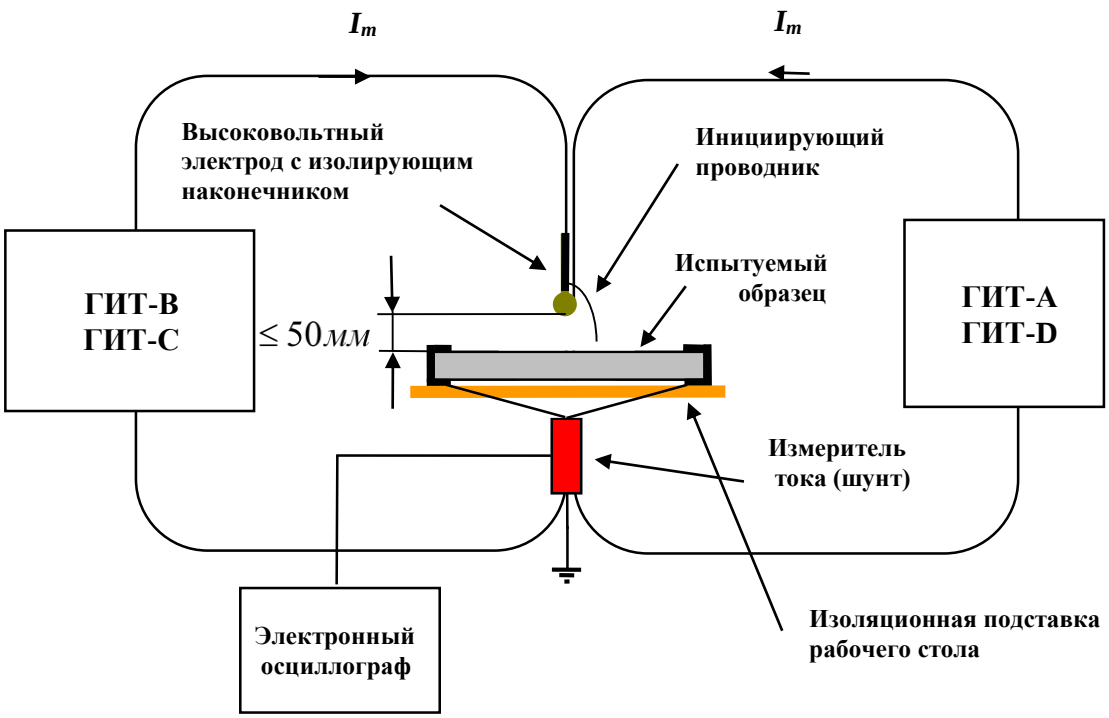
Рис. 2.24 - Типовые отклоняющие струю дуги электроды [2.2].

Для данного вида испытаний используют набор форм сигналов тока A, B, C и D согласно ARP5412 [2.4].

На рис. 2.24 приведена методика проведения испытаний панелей по определению последствий воздействий на проникновение электрической дуги в точке попадания молнии в ЛА.

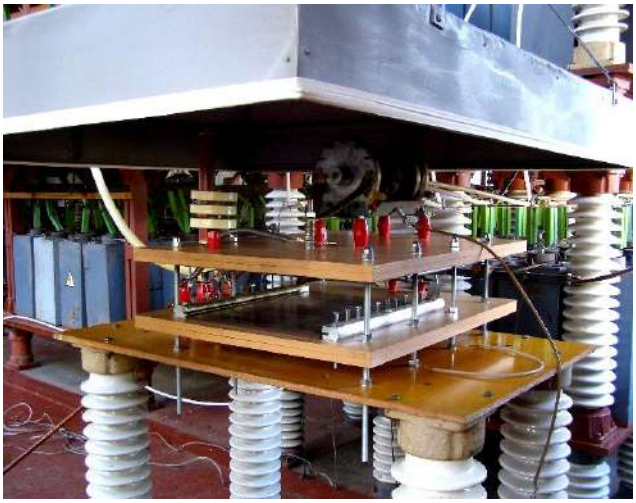
Наиболее распространенным испытанием данным методом является испытания на стандартных панелях, изготовленных из материалов несущих конструкций испытуемых ЛА. Как правило, их линейный размер должен быть 500 х 500 мм. Иногда допускается размер 350 х 350 мм.

Испытание токонепроводящих поверхностей ЛА. Данное испытание обычно используется для поверхностей ЛА, расположенных в зонах 1А, 1С и 2А. Это испытание проводят для определения воздействия канала молнии, перемещающегося по оптически прозрачным поверхностям ЛА, таким как обтекатели антенн и другие токонепроводящие поверхности. При наличии диэлектрического покрытия, которое легко может быть пробито, например, противообледенительный кожух, покрывающий токопроводящую конструкцию, более подходящим является проведение испытания на проникновение электрической дуги.



а)

б)



в)

Рис. 2.23 - Методики проведения испытаний панелей по определению последствий проникновения электрической дуги в точке попадания молнии (а), общий вид панели и способ ее крепления на испытательном столе (б) и основной узел испытательной установки (с) НИПКИ «Молния» (Украина) [2.8].

Для диэлектрических обтекателей, которые могут быть пробиты с последующим контактом с расположенной под ними антенной, необходимо проводить испытание на попадание перемещающегося канала молнии. Если возникает пробой, необходимо проводить испытание на проникновение электрической дуги.

Данное испытание проводят для оценки:

- разрушения от ударной волны и термического воздействия;
- воздействия попадания электрической дуги на скрытую или внутреннюю проводку;
- воздействия на внутренние слои, которые могут привести к образованию осколков;
- воздействия на крепление прозрачных поверхностей к конструкции ЛА;
- амплитуды напряжений или токов, наведенных на внутренних проводниках или непосредственно поданных на них.

В качестве испытываемого образца необходимо использовать промышленно изготавливаемое полноразмерное изделие или соответствующий действительности прототип. Сборка должна быть полностью законченной, чтобы определить возможное повреждение без влияния на результаты испытания. Если целью испытаний является сравнение различных конструкций, все образцы должны иметь одинаковые размеры, поперечные сечения, монтаж и методы защиты против обледенения; отделки поверхности или антистатические покрытия и методы заземления элементов противообледенительной системы.

На рис. 2.24 показан испытываемый объект, установленный на типовую испытательную раму, поддерживающую испытываемый объект с моделированием угла прозрачности. Металлический фартук, присоединенный перед испытываемым объектом, имитирует фюзеляж перед прозрачным объектом. Этот тип испытательной компоновки может обеспечить получение данных о попадании осколков на рабочие места экипажа

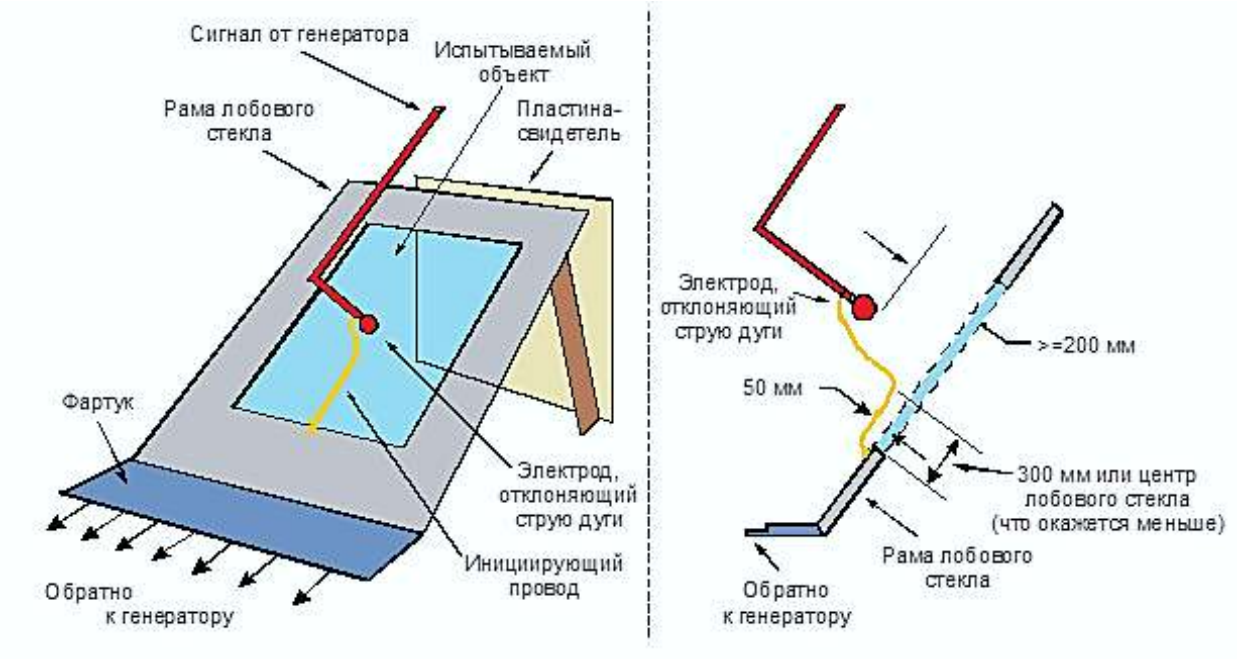


Рис. 2.24 - Испытание на прозрачном макете [2.2].

На рис. 2.25 показано лобовое стекло в натуральную величину, установленное в секцию конструкции ЛА (или испытательное приспособление, копирующее эту конструкцию). Такая компоновка иногда используется, если лобовое стекло, поврежденное ударом молнии, должно испытываться на воздействие давления. Если влажность является важным параметром, то лобовое стекло должно испытываться и в сухих и во влажных условиях.

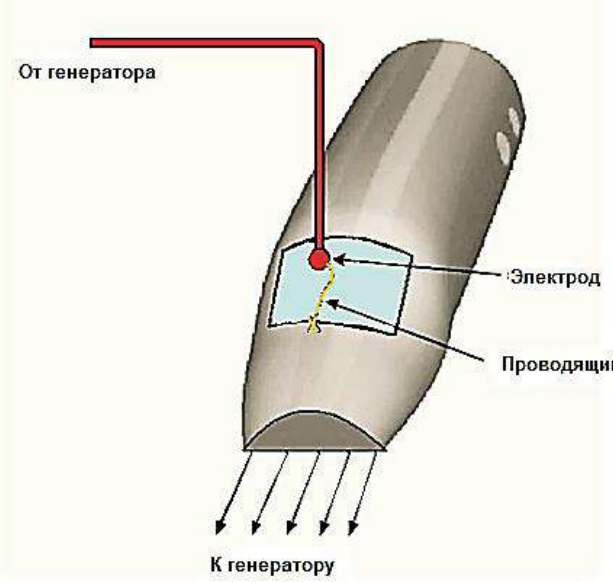


Рис.2.25 – Испытание на лобовом стекле [2.2].

На рис. 2.26 показан метод испытания головного обтекателя самолета в натуральную величину. Такая компоновка используется, для оценок повреждений от удара молнии корпуса обтекателя и защитных свойств дивертора.

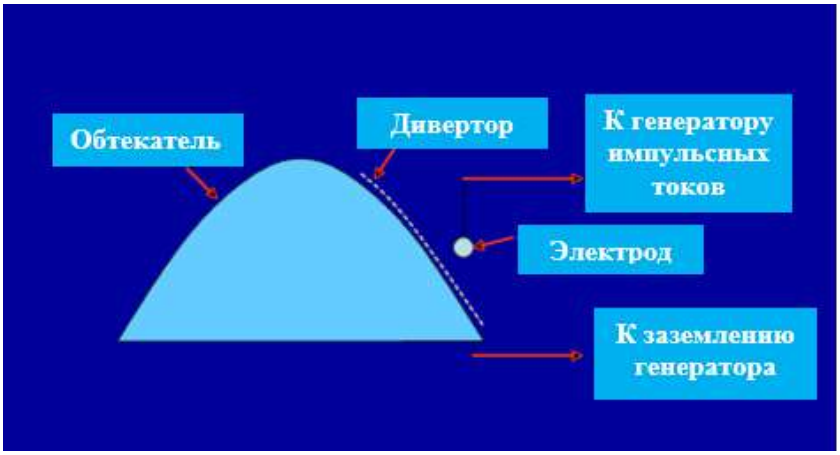


Рис. 2.26 - Испытания головного обтекателя самолета на прожиг от удара молнии и оценки защитных свойств дивертора [2.10]

Результаты данных испытаний головного обтекателя самолета в натуральную величину приведены на рис. 2.27.

Рис. 2.27 – Результаты испытания головного обтекателя самолета на прожиг от удара молнии и оценки защитных свойств дивертора [2.10].

Для данного вида испытаний необходимо использовать формы сигналов тока A/Ah или D согласно ARP5412 [2.4], в зависимости от зоны ЛА, в которой расположен испытываемый объект. Если ощущается необходимость оценки термических воздействий на поверхность испытываемого объекта, то допускается использование компонентов B и C*.

В случае необходимости оценки термических воздействий компонентов B и C* на, например, акриловые лобовые стекла, допускается проведение дополнительного испытания с электродом, передвинутым ближе к передней кромке прозрачного объекта, что приводит к сокращению длины инициирующего провода и обеспечению возможности подачи этих компонентов на более короткий участок испытываемого объекта.

Для данного испытания допускается использование как положительной, так и отрицательной полярностей.

Испытания на проводимый ток молнии. Данный вид испытаний проводят для элементов конструкции ЛА, расположенных в зоне 3, согласно ARP5414 [2.5]. Испытания проводят для оценки:

- физических повреждений;
- образования электрических дуговых и искровых разрядов;
- воздействия магнитных сил;
- термических воздействий.

В качестве испытываемого объекта используют полномасштабные, аналогичные промышленно изготавливаемым секциям или части секций конструкции, включающие в себя соединения силовых элементов или узлов, такие как клеевые соединения, болтовые и шарнирные соединения, подшипники в силовых приводах и эксплуатационные лючки топливных баков либо панели соответствующих размеров. Образцы должны быть достаточно большими, чтобы предоставлять достаточное поперечное сечения объекта испытания для достижения соответствующего действительности распределения тока молнии.

Для данного испытания необходимо использовать набор форм сигналов тока A, B, C и D согласно ARP5412 [2.4]. Уровни амплитуд должны быть промасштабированы на основе определения ожидаемой плотности тока для всех возможных путей тока молнии через конструкцию планера, содержащую область, имитируемую этим

испытываемым объектом. Плотности тока могут быть оценены с помощью компьютерного анализа или испытания низкоуровневым качающимся незатухающим сигналом, преобразованным так, чтобы давать отклик на формы сигналов молнии. Следует отметить, что плотности тока на границах испытываемой панели могут быть в 3 раза больше, чем в центре, вследствие воздействий магнитного поля. Данная ситуация может не отражать действительное состояние установки на ЛА.

При проведении данного вида испытаний разработчикам конструкций обшивки ЛА необходимо знать значение электрических характеристик объекта испытания при импульсных воздействиях. На рис. 2.29 приведена методика проведения испытаний панелей на проводимый ток молнии. Для проведения испытаний панелей на проводимый ток молнии применяется экспериментальная установка, общий вид которой приведен на рис.2.23 с.

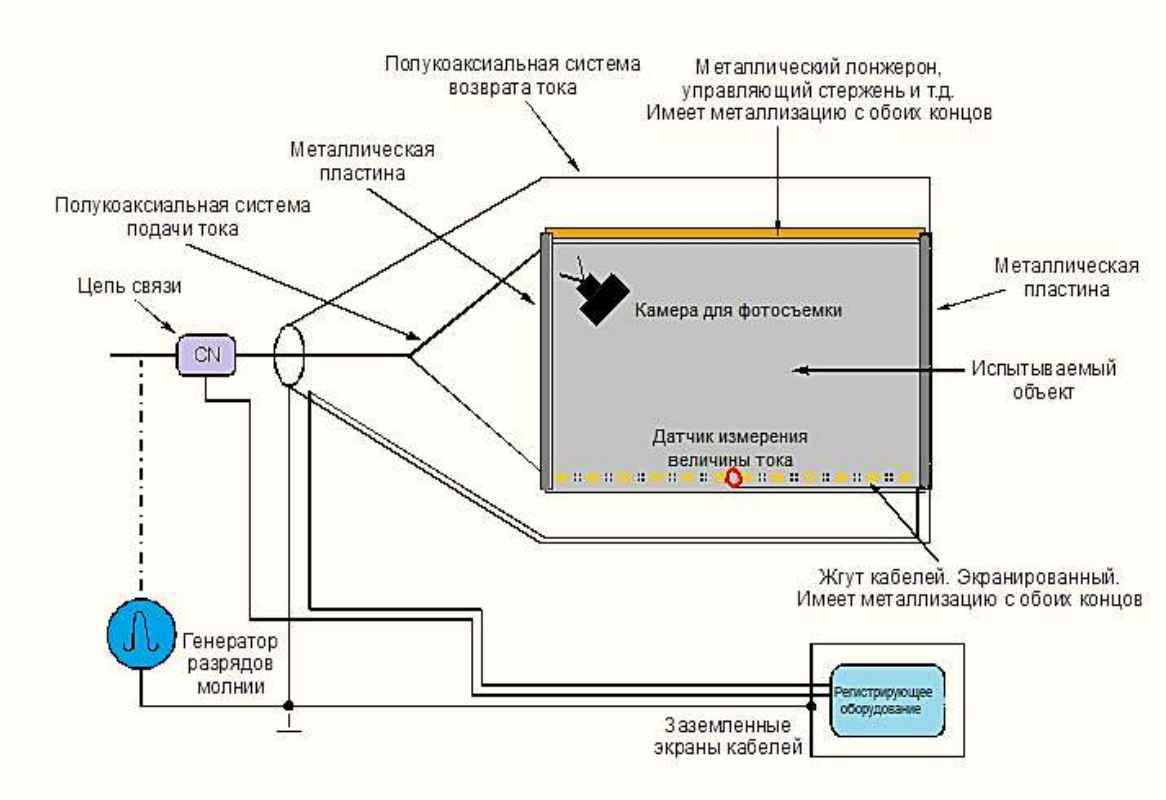


Рис. 2. 28 – Типовая установка для испытания на повреждение и расположение силовых кабелей [2.2].

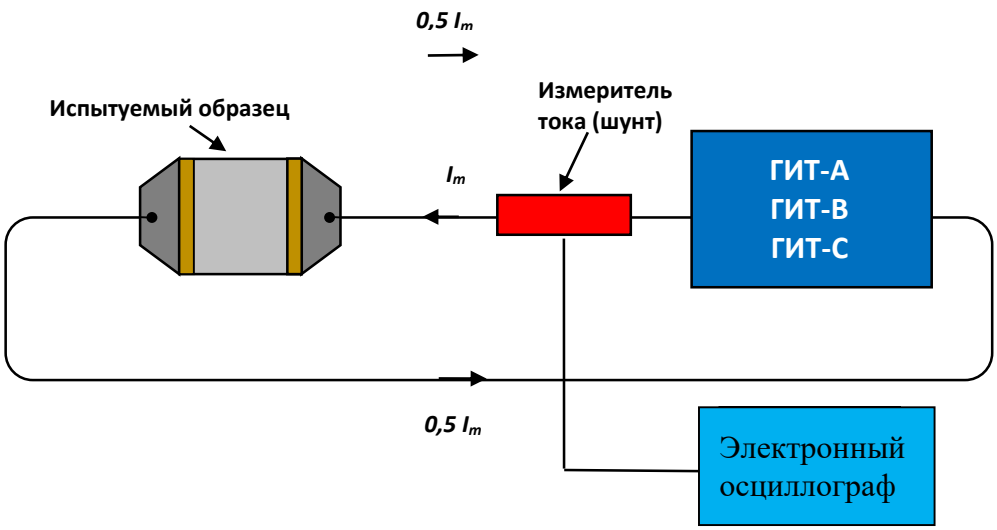


Рис. 2.29 - Методика проведения испытаний панелей на проводимый ток молнии.

2.2.1.3 Измерение переходных процессов, наведенных в устанавливаемом снаружи оборудовании.

Данные испытания проводят для элементов ЛА, устанавливаемых снаружи и расположенных в зонах 1А, 1В, 1С, 2А и 2В, имеющих электрические цепи, в которых могут возникать напряжения и токи, подаваемые в них прямым попаданием молнии. К таким элементам относятся антенны, датчики обледенения, датчики углов атаки, приемники полного давления с электрообогревом, навигационные огни и нагреватели электрической противообледенительной системы. Данное испытание может выполняться в комбинации с испытанием на *проникновение электрической дуги* или испытанием *на проводимый ток*. Это испытание может использоваться в дополнение к испытаниям всего ЛА на косвенные воздействия молнии, описанным в подразделе 6.1, которые проводятся для определения наведенного напряжения и тока в проводке, подсоединенной к установленным снаружи элементам ЛА, из-за проводимых токов в зоне 3.

В качестве испытываемого объекта необходимо использовать промышленно изготавливаемое полноразмерное оборудование или соответствующий действительности прототип. Конструкция,

проводка и установка оборудования должны быть в электромагнитном смысле аналогичными той промышленной конфигурации, которая здесь испытывается. Испытываемый объект должен включать в себя монтажные детали, такие как прокладки, перемычки металлизации, лакокрасочные материалы и герметики. Также необходимо включать в испытательную установку электрические жгуты, соответствующие действительной установке на ЛА.

На рис. 2.30 показана простая алюминиевая испытательная камера. Испытываемый объект установлен на панели, представляющей реальный элемент конструкции ЛА. Испытываемая панель должна быть изготовлена из того же материала, что и реальный элемент конструкции ЛА, например, алюминиевого сплава, стеклопластика, углепластика или титанового сплава.

На рис. 2.31 приведены методы проведения испытаний по определению наведенных переходных процессов в устанавливаемом снаружи оборудовании при прямых воздействиях молнии

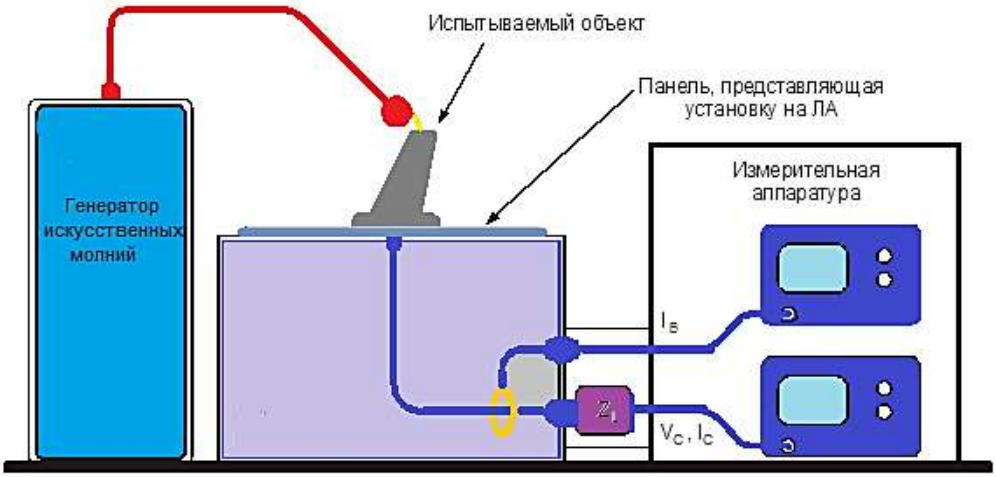


Рис. 2.30 – Типовая установка металлической обшивки [2.2].

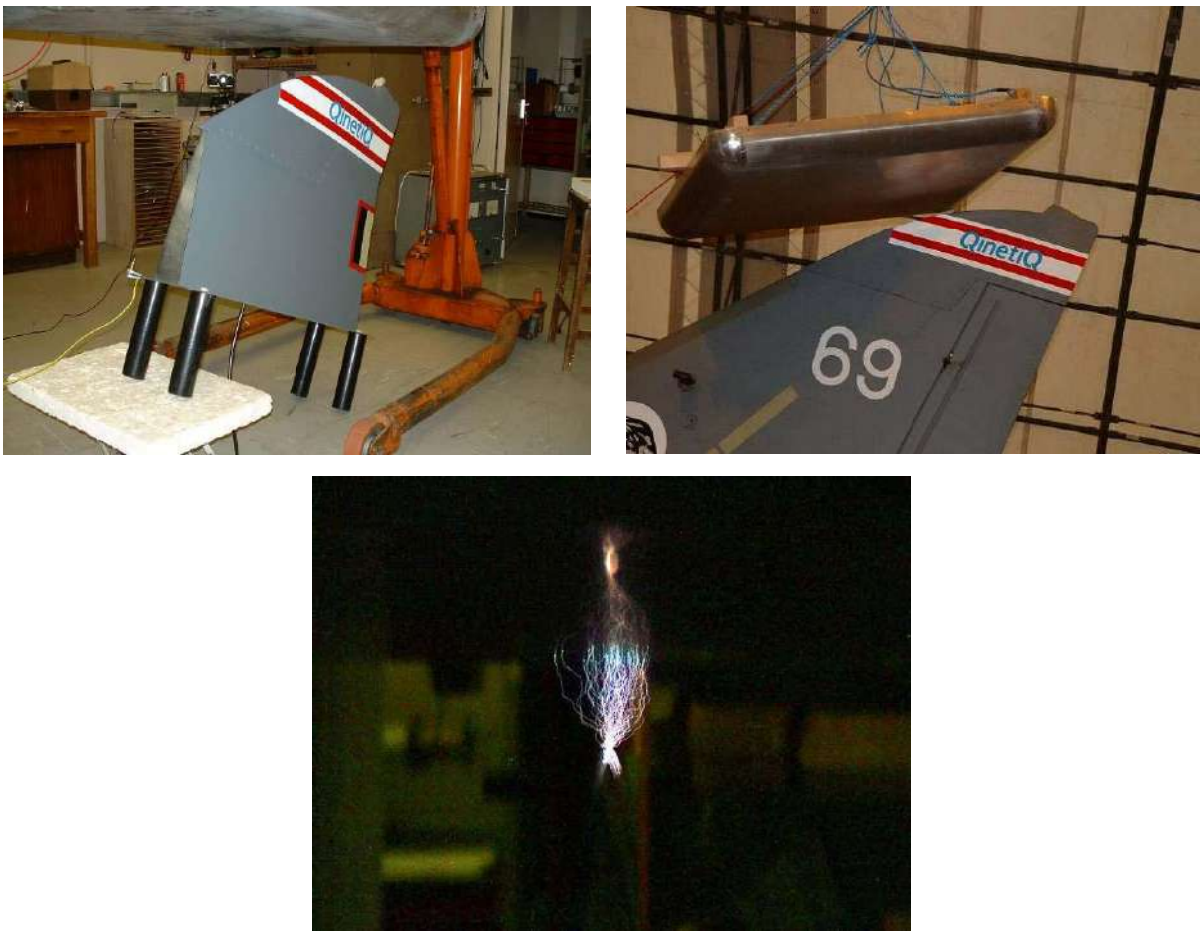


Рис. 2.31 – Метод испытания по определению наведенных переходных процессов в устанавливаемом снаружи оборудовании при прямых воздействиях молнии по SAE ARP5416 [2.11].

Для проведения испытаний этого вида используют формы сигналов тока A, D, и H согласно ARP5412 [2.4] обычно используются со специальными формами сигналов, в зависимости от зоны воздействия разряда молнии на ЛА, в которой испытываемый объект расположен в реальной установке. Эти формы сигналов применяются (формы сигналов тока B и C исключены) потому, что основные параметры формы сигнала, характеризующие соединение косвенных воздействий, связаны с указанными формами сигналов, в том числе с пиковым током и пиковой скоростью нарастания.

Оценка градиента напряжения на изоляции цепи. Это испытания проводится для оценивания косвенного воздействия, вызванного прямым воздействием. Это испытания проводят для зон ЛА (возможна любая из зон воздействия разряда молнии), в которых наведенные напряжения могут вызвать поверхностный разряд или пробой изолированной электрической проводки на окружающую

конструкцию вследствие изменения магнитного потока и падения напряжения на сопротивлении конструкции. Примером является напряжение $V_{наведенное}$, которое может возникнуть между нагревательным элементом приемника полного давления и самим приемником во время попадания молнии в ППД, смонтированный на обтекателе (см. рис. 2.32). Если возникает пробой, то импеданс в точке пробоя очень мал, и цепь нагревательного элемента приемника полного давления подвергается воздействию очень больших напряжений сверх тех, которые измеряются в ходе испытаний на косвенное воздействие.

В качестве испытываемого объекта необходимо использовать промышленно изготавливаемое полноразмерное оборудование или соответствующий действительности прототип. В испытываемом объекте должна быть полностью представлена являющаяся предметом испытания электрическая проводка, тип и монтаж оборудования, прокладка кабелей и проводка, относящаяся к проводимым испытаниям.

На рис 2.33 приведен места измерения наведенного напряжения при проведении испытаний на оценку градиента напряжения на изоляции цепи.

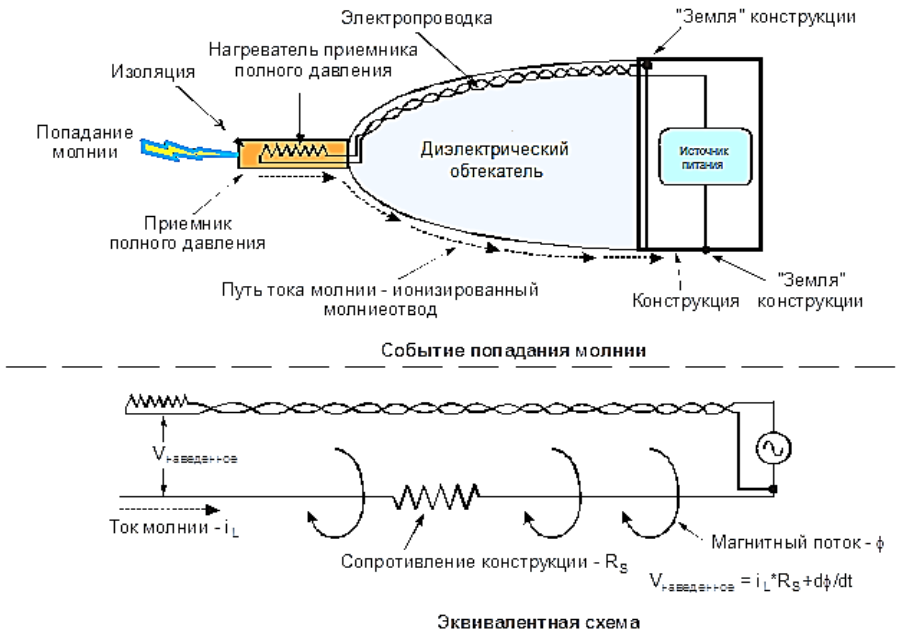


Рис. 2.32 - Наведенное молнией напряжение возникает на изоляторах нагревательного элемента приемника полного давления [2.2].

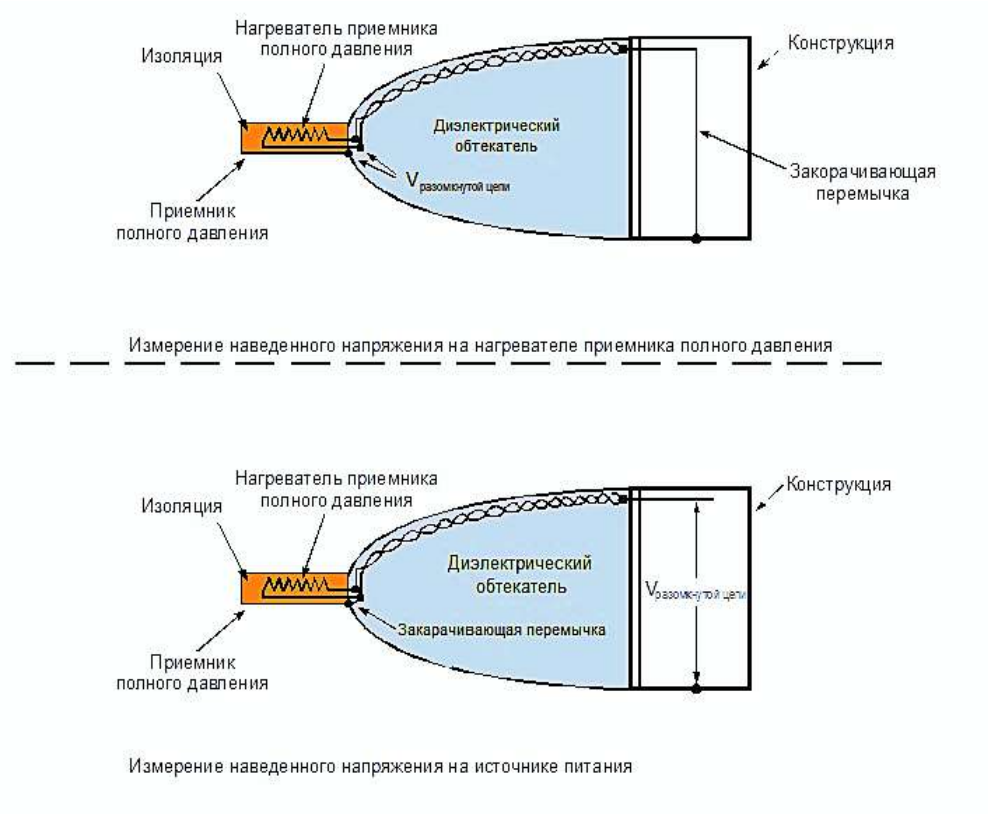


Рис. 2.33 - Места измерения наведенного напряжения при проведении испытаний на оценку градиента напряжения на изоляции цепи [2.2].

При проведении испытаний обычно используют формы сигналов тока A, D, и H согласно ARP5412 [2.4] в сочетании со специальными формами сигналов, в зависимости от зоны воздействия разряда молнии на ЛА, в которой испытываемый объект расположен в реальной установке.

2.2.2 Испытания на косвенные воздействия молнии

Методы испытаний на косвенные воздействия молнии используются для исследования переходных процессов, наведенных молнией в проводах и жгутах ЛА и включают в себя:

- испытания ЛА для измерения переходных процессов, наведенных молнией;
- испытания оборудования и систем;
- испытания для определения передаточной функции экрана жгута;

- испытания на передачу тока по жгуту/разъему.

Испытания подразделяются на испытания ЛА в *целом* и испытания *систем, блоков и узлов* ЛА.

2.2.2.1 Испытания ЛА в целом

Основными типами испытаний ЛА в целом являются испытания ЛА *качающейся частотой* и *испытания импульсами тока*. Результаты этих испытаний используют для получения инженерных данных необходимых для разработки систем молниезащиты ЛА, или для получения данных, эффективности молниезащиты, необходимых для сертификации ЛА или двигателя.

Данный вид испытания ЛА проводят для определения фактических уровней переходных процессов (ATL), в том числе форм сигналов переходных процессов, наведенных в проводке систем электрического и электронного оборудования ЛА. Амплитуду и форму сигналов наведенных переходных процессов обычно измеряют на установленных экранах жгутов и отдельных проводах. Измеренный фактический уровень переходных процессов может быть использован для определения или проверки соответствующих контрольных уровней переходных процессов (TCL) и расчетных уровней переходных процессов (ETDL) молниезащиты. Переходные процессы могут быть также измерены на токопроводящих элементах неэлектрических систем (таких как тросы системы управления, трубопроводы топливной, гидравлической и пневматической систем, а также элементы конструкции) при проектировании и сертификации топливных систем и молниезащиты конструкции ЛА.

Испытание ЛА может проводиться на полностью собранном и функционирующем ЛА. Также допускается проведение испытаний на большом отсеке ЛА или на двигателе в сборе. Если это испытание проводится для сертификации ЛА или двигателя, необходимо использовать промышленно изготавливаемый ЛА или двигатель. Рекомендуется использовать промышленно изготавливаемый ЛА или двигатель без устанавливаемой для летных испытаний проводки. Если проводка для летных испытаний установлена на ЛА, она должна быть отсоединена с обоих концов, а разъемы и экраны изолированы от конструкции на время испытания. Перед испытанием ЛА или

двигатель может проходить проверку на соответствие, проводимую соответствующим уполномоченным регулятивным органом.

Если испытание проводиться с целью определения данных, необходимых на этапе проектирования, то могут использоваться прототип, макет или большие отсеки ЛА или двигателя. Конструкция, жгуты и установка оборудования должны быть в электромагнитном смысле аналогичны таковым на подвергаемой испытанию промышленной конфигурации ЛА и двигателя. Если для этого испытания используется двигатель в сборе или большой отсек ЛА, возможно применение дополнительных проводящих ток элементов, моделирующих течение тока в отсутствующей части ЛА, не включенной в состав испытываемого двигателя или большого отсека ЛА.

Испытания на ЛА обычно проводят при обесточенных системах ЛА. Может понадобиться соответствующим образом включить силовые контакторы, автоматы защиты сети и выключатели электропитания оборудования для обеспечения целостности схемы питания.

Могут понадобиться незначительные модификации ЛА и двигателя, вызванные необходимостью установки контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков. Эти модификации должны быть спроектированы и установлены таким образом, чтобы не они не влияли на пути распространения тока молнии, и чтобы при этом не образовывались дополнительные отверстия в конструкции ЛА. Например, может быть установлена специальная оконная панель, позволяющая прокладку проводов или оптоволоконного кабеля от контрольно-измерительной аппаратуры внутрь ЛА без необходимости открытия дверей и люков.

При испытаниях больших отсеков ЛА или двигателя в них должны присутствовать пути, через которые ток молнии распространяется на оставшуюся часть ЛА, с целью получения реалистичного течения тока и точного измерения наведенных переходных процессов. Эти пути распространения тока могут включать в себя такие компоненты систем, как кронштейны крепления, трубопроводы топливной и гидравлической систем, тросы проводки управления и электрические трубопроводы/провода, перемычки металлизации и элементы конструкции.

Для двигателей необходимо рассматривать и включать в состав испытательной установки все пути распространения тока молнии между двигателем, гондолой, пилоном, подкосом и планером. Эти пути распространения тока могут включать в себя узлы навески двигателя, трубопроводы топливной и гидравлической систем, жгуты электропроводки, жесткую проводку системы управления, перемычки металлизации, контровочную проволоку и любые другие конструктивные элементы, специально предназначенные для обеспечения электромагнитной совместимости (EMC), защиты от полей излучения высокой интенсивности (HIRF) или молниезащиты.

Перед проведением испытаний необходимо демонтировать или обезопасить любые элементы топливной системы, компоненты, взрывоопасные при воздействии электрической энергии (EED), и пиротехнические устройства. Вместо EED допускается применение аналогичных безопасных устройств. Необходимо исключить легко воспламеняемые пары топлива, заправив топливные баки с целью уменьшения объема образования паров и заполнив остатки пространства топливных баков инертным газом, например, азотом.

На рис. 2.34 приведена методика проведения испытаний импульсными токами ЛА в целом по ГОСТ 30585-98 [2.9].

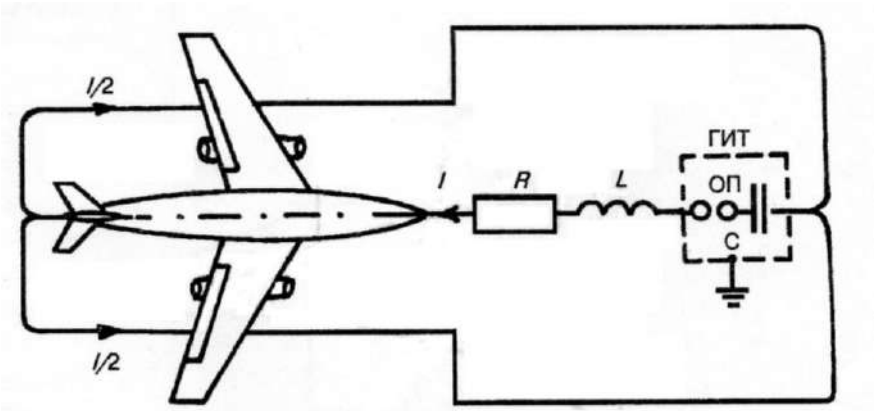


Рис. 2.34 – Методика проведения испытаний на косвенные воздействия тока молнии, протекающего по обшивке ЛА по ГОСТ 30585-98 [2.9].

Особые требования предъявляются к расположению обратных проводников [2.2]. В испытательную установку входит ЛА, подходящее расположение обратных проводников, генератор тока,

аппаратура управления и контроля генератора тока, а также приборы для измерения переходных процессов. Взаимодействие молнии с ЛА зависит от точек попадания молнии. Точки попадания молнии представлены местами подсоединения генератора тока и обратных проводников к ЛА. Обычно необходимо несколько конфигураций этого подсоединения для того, чтобы правильно определить фактические уровни переходных процессов. Конфигурации точек попадания молнии, используемые при испытании на ЛА, должны основываться на возможных местах попадания молнии, прокладке электропроводки и размещении систем в ЛА. В табл. 2.1 приведены типовые конфигурации подсоединения к ЛА.

Таблица 2.1 - Типовые конфигурации точек подведения испытательного тока [2.2].

Точка подсоединения генератора тока	Точка подсоединения обратных проводников
Самолет	
Носовая часть фюзеляжа	Хвостовое оперение
Стойка лобового стекла	Хвостовое оперение
Носовая часть фюзеляжа	Законцовка крыла
Носовая часть фюзеляжа	Двигатель
Носовая часть фюзеляжа	Шасси
Носовая часть фюзеляжа	Вертикальное оперение
Законцовка крыла	Хвостовое оперение
Законцовка крыла	Законцовка крыла
Входное устройство двигателя	Выхлопное сопло двигателя
Входное устройство двигателя	Хвостовое оперение
Вертолет	
Лопасть несущего винта	Лопасть хвостового винта
Лопасть несущего винта	Лыжа
Лопасть несущего винта	Носовая часть
Лопасть хвостового винта	Лыжа
Лопасть хвостового винта	Носовая часть

Например, измерения, проводимые для проводки, проложенной на участке между кабиной пилота и навигационным огнем на левом крыле, необходимо выполнять с использованием точек подсоединения, расположенных в носовой части и на законцовке

левого крыла. При данной конфигурации подсоединения моделируемый ток молнии будет протекать через конструкцию, в которой проложен являющийся объектом испытания провод, тем самым наводя в этом проводе максимальные переходные процессы.

Для моделирования важных характеристик взаимодействия молнии с ЛА необходимо определить конфигурацию подсоединений обратных проводников и генератора тока. Распределение тока в испытываемом ЛА должно как можно более точно имитировать распределение тока в ЛА в течение попадания в него разряда молнии в полете.

Расположение обратных проводников зависит от формы ЛА. ЛА и обратные проводники нельзя рассматривать как однородную линию передачи, такую как коаксиальную линию передачи, кроме случаев самого грубого приближения. Таким образом, необходимо обеспечить такую конфигурацию ЛА и обратных проводников, чтобы обеспечить воспроизводимые результаты испытания с таким распределением тока в планере, которое соответствует реальному случаю.

Это может быть достигнуто путем расположения ЛА на земле и совокупности обратных проводников. Наиболее предпочтительным вариантом установки является расположение обратных проводников вдоль фюзеляжа, крыльев и хвостового лонжерона, обеспечивая тем самым однородное распределение тока в ЛА. Как минимум, обратные проводники должны быть расположены в виде заземленной плоскости под фюзеляжем, крыльями и хвостовым лонжероном. Такое размещение является наиболее целесообразным для больших транспортных ЛА. Это приводит к завышенным значениям плотности тока в нижней части ЛА вблизи заземленной плоскости. Это обычно приемлемо для ЛА, в которых электропроводка и системы расположены в крыле, и для ЛА, в которых критическая электропроводка, системы и ключевые места соединения (например, двери и люки) расположены в нижней части ЛА. Но эта конфигурация приводит к заниженным значениям плотности тока в верхних частях ЛА, таких как верхняя часть фюзеляжа и области вблизи остекления кабины пилотов.

На практике конфигурации ЛА и обратных проводников формируют неоднородные линии передачи. Характеристический импеданс данной комплексной неоднородной линии передачи

обычно изменяется в пределах от 70 до 150 Ω. Сигнал от генератора испытательного тока подается на ЛА и обратные проводники в одну точку попадания молнии. ЛА и обратные проводники обычно замкнуты между собой в другой точке попадания молнии для данной испытательной конфигурации. Такое расположение ЛА и обратных проводников обеспечивает такой импеданс точки подачи тока, который имеет малое сопротивление при низких частотах, является индуктивным в диапазоне от 10 кГц до частоты высокодобротного четвертьволнового резонанса линии передачи “самолет/обратный проводник”, и далее, на более высоких частотах – с последовательно-параллельными резонансами линии передачи.

Это отличается от характеристик естественного контакта молнии с ЛА. Характеристический импеданс или волновое сопротивление обратного удара молнии оценивается в диапазоне от1000 до 6000 Ω с некоторым продольным сопротивлением в канале молнии. Поэтому при попадании естественного разряда молнии в ЛА в нем не возникает высокодобротный четвертьволновой резонанс, а возникает низкодобротный полуволновой резонанс, зависящий от длины пути тока молнии через ЛА.

В схеме расположения ЛА и обратных проводников могут иметься на концах согласующие сопротивления вместо замыкания ЛА и обратных проводников между собой. Согласование линии передачи может исключить четвертьволновой резонансный отклик линии передачи, зависящий от испытательной конфигурации. Однако для большинства конфигураций мест попадания молнии летательный аппарат и обратный проводник в комплексе являются намного более сложными для того, чтобы быть представленными в виде однородной линии передачи. Даже если линия передачи ЛА-обратный проводник может оканчиваться согласующим импедансом, сопротивление согласующей нагрузки обычно настолько велико, что это приводит к уменьшению амплитуды входного тока, подводимого к ЛА с помощью данного генератора тока. Это приводит к неприемлемому отношению "сигнал/шум" и препятствует возможности измерения наведенных переходных процессов в проводке. Это также снижает нормальный полуволновой резонанс, типичный при естественном попадании молнии в ЛА.

При замыкании ЛА и обратного проводника в одной точке подсоединения четвертьволновой резонанс линии передачи

обеспечивает консервативное измерение наведенных переходных процессов на резонансной частоте. Четвертьволновой резонанс возникает на в два раза меньшей частоте, по сравнению с частотой полуволнового резонанса. Определенный спектр в условиях разряда молнии уменьшается на 40 дБ за декаду или на 12 дБ за октаву при увеличении частоты в диапазоне резонансных частот планера. Таким образом, характеристики наведенных переходных процессов, порожденных четвертьволновым резонансом, могут превышать характеристики наведенных переходных процессов, порожденных полуволновым резонансом.

На рис. 2.35 показано типовое расположение обратного проводника для вертолета.

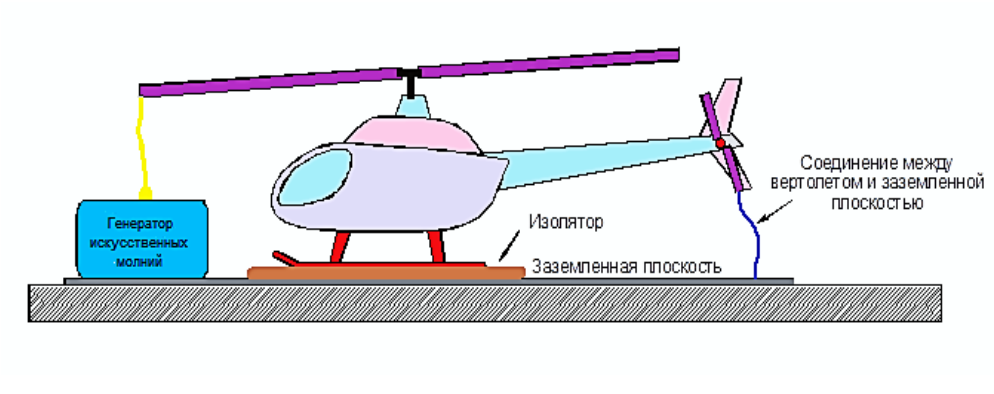


Рис. 2.35 – Расположение заземленной плоскости для вертолета [2.2]

В этой компоновке в качестве обратного проводника тока используется простая заземленная плоскость. Расположенные сверху обратные проводники обычно не требуются, поскольку лопасти несущего винта оказывают наиболее значительное воздействие на распределение тока в вертолете.

Для небольших ЛА наиболее целесообразной схемой расположения обратных проводников является равномерное размещение проводников вокруг ЛА. На рис. 2.36 показано данное расположение обратных проводников, обеспечивающих достаточно однородное распределение тока между верхней и нижней поверхностями ЛА. Для такого расположения не требуется дополнительный анализ распределения тока в конструкции во время полета, за исключением случая рассмотрения резонанса короткозамкнутого подсоединения обратного проводника по

сравнению с ожидаемым импедансом канала молнии при попадании молнии в полете.

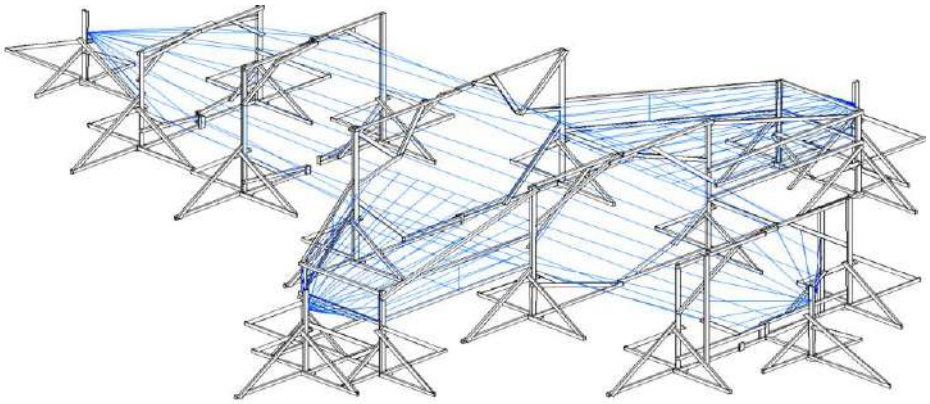


Рис. 2.36 - Схема расположения обратных проводников для небольшого самолета [2.2]

Для больших ЛА схема расположения обратных проводников более сложная, и может оказаться нецелесообразным располагать проводники над ЛА. Поэтому необходимо провести дополнительный анализ с целью оценивания распределений тока в ЛА при испытаниях и в полете при естественном попадании молнии. Данный анализ необходим для определения влияния наличия обратных проводников в условиях испытания и влияния способа подсоединения обратных проводников на распределение тока по поверхности ЛА. Цель анализа – определить различие между распределениями тока при испытаниях и ожидаемым распределением тока по поверхности ЛА при попадании молнии в полете. Эффективными методами оценки распределения тока молнии по поверхности большого ЛА являются метод моментов, конечно-разностный во временной области и конечно-элементный методы.

Для анализа характеристик переходных процессов, наведенных молнией в электропроводке, расположенной в определенных зонах ЛА, таких как киль, стабилизаторы или двигатель, могут применяться местные обратные проводники. На рис. 2.37 показана схема расположения местных обратных проводников, используемых для измерений, связанных с проводкой, расположенной в киле.

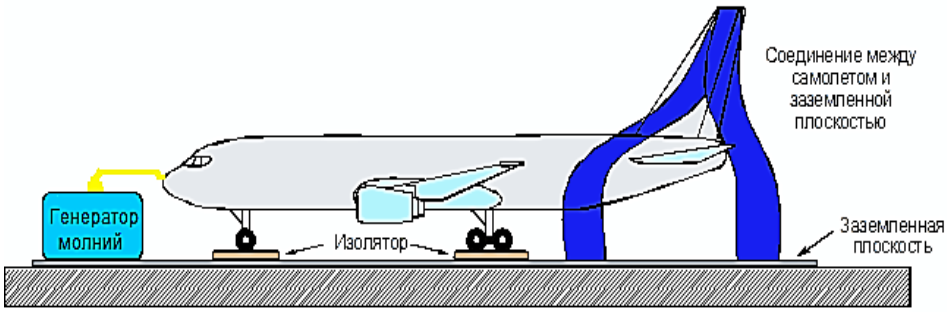


Рис. 2.37 – Схема расположения обратных проводников для большого транспортного самолета [2.2]

Испытываемый ЛА может быть изолирован от обратных проводников, за исключением точек подключения генератора тока и обратного проводника. Необходимо изолировать от заземленной плоскости шины или лыжи вертолета с помощью изолирующих ковриков или подставок. Изолирующий коврик или подставка должны выдерживать напряжения, возникающие между ЛА и обратным проводником, особенно во время испытаний сильноточными импульсами.

Для обеспечения требований безопасности желательно, чтобы заземленная плоскость была замкнута на “землю” сооружения в единственной точке, расположенной возле точки заземления генератора. Необходимо обеспечить меры для минимизации явлений бегущей волны или паразитных колебаний между обратными проводниками и сооружением (т.е. ангаром). Это может быть обеспечено путем тщательного выбора места заземления, или путем заземления обратных проводников на сооружение через резистор с целью подавления указанных резонансных явлений, или же путем заземления обратных проводников через соединение с малым сопротивлением постоянному току, имеющее большой импеданс при высоких частотах.

Испытания ЛА в целом позволяют получить такие характеристики *наведенных переходных процессов*, которые могут быть использованы для определения фактических уровней переходных процессов (ATL), сравниваемых с контрольными уровнями переходных процессов (TCL) и расчетными уровнями переходных процессов (ETDL). Поэтому необходимо выбрать такие измерения воздействия молнии на ЛА, которые соответствуют методам

определения TCL летательного аппарата и ETDL оборудования или систем. Например, если TCL определяются как напряжения разомкнутой цепи и токи короткого замыкания отдельных проводов, то проводимые на ЛА измерения должны включать в себя напряжения разомкнутой цепи и токи короткого замыкания отдельных проводов. Или, если TCL определяются как суммарные токи всего жгута, то проводимые на ЛА измерения должны включать в себя суммарные токи всего жгута.

Также в ходе испытаний необходимо определить величины, которые можно непосредственно сравнить с ETDL и соответствующими квалификационными испытаниями оборудования. Например, если ETDL и соответствующие квалификационные испытания оборудования основаны на DO-160/ED-14, раздел 22 [2.13], испытания наводок в жгутах, то уровни испытаний наводок в жгутах основываются на напряжениях разомкнутой цепи и/или токах в жгутах контура. Поэтому измерения воздействия молнии на весь ЛА должны включать в себя напряжения разомкнутой цепи и токи короткого замыкания.

При этом, могут выполняться несколько типов измерений, а именно:

a). Напряжения разомкнутой цепи (V_{oc}), представляющие собой наведенные напряжения, измеряемые между отдельным неподсоединенным с одного конца проводом и соседним “корпусом” ЛА. Другой конец провода заземлен на удаленном месте оборудования с использованием малоимпедансного концевого соединения на землю. Оборудование с любого конца подвергаемого измерению провода отсоединено от содержащего этот провод жгута, но экран подвергаемого измерению провода (если таковой имеется) и любые другие экраны в том же жгуте необходимо заземлить стандартным образом либо на месте, либо к разъемам оборудования, если эти экраны на реальной установке заземлены с обоих концов.

b). Токи короткого замыкания (I_{sc}), представляющие собой наведенные токи, измеряемые в отдельных проводах, оба конца которых заземлены с помощью малоимпедансного концевого соединения на землю. Другие условия аналогичны описанным в параграфе a.

c). Токи в жгуте (I_{bc}), представляющие собой наведенные токи, измеряемые в жгуте, с установленным стандартным образом

оборудованием ЛА, использующим этот жгут, и со жгутами, стандартно подключенными к этому оборудованию на каждом конце.

d). Напряжения нагруженной цепи (V_l), представляющие собой наведенные напряжения, измеряемые между проводом и соседним “корпусом” ЛА, со стандартными концевыми соединениями обоих концов этого провода и с установленным стандартным образом оборудованием ЛА.

e). Токи нагруженной цепи (I_l), представляющие собой наведенные токи, измеряемые в отдельных проводах со стандартными концевыми соединениями обоих концов этих проводов и с установленным стандартным образом оборудованием ЛА.

На рис. 2.38 показаны конфигурации измерений, описанные в п. a – e.

Измерения в нагруженных проводах, описанные в d и e, обычно проводятся только в особых случаях, например, для цепей навигационных огней, системы обогрева окон и шин распределения питания, так как проведение данных измерений в любом случае требуют детальной разработки коммутационных коробок, присутствие которых может повлиять на измеряемые переходные процессы. Также может понадобиться проводить измерения в нагруженных проводах с включенными системами для оценки нелинейных импедансов нагрузок. Устройства защиты от перенапряжения должны включаться в проводящее состояние от наведенного напряжения при естественном ударе молнии, однако не должны проводить в процессе испытания при более низких значениях токов.

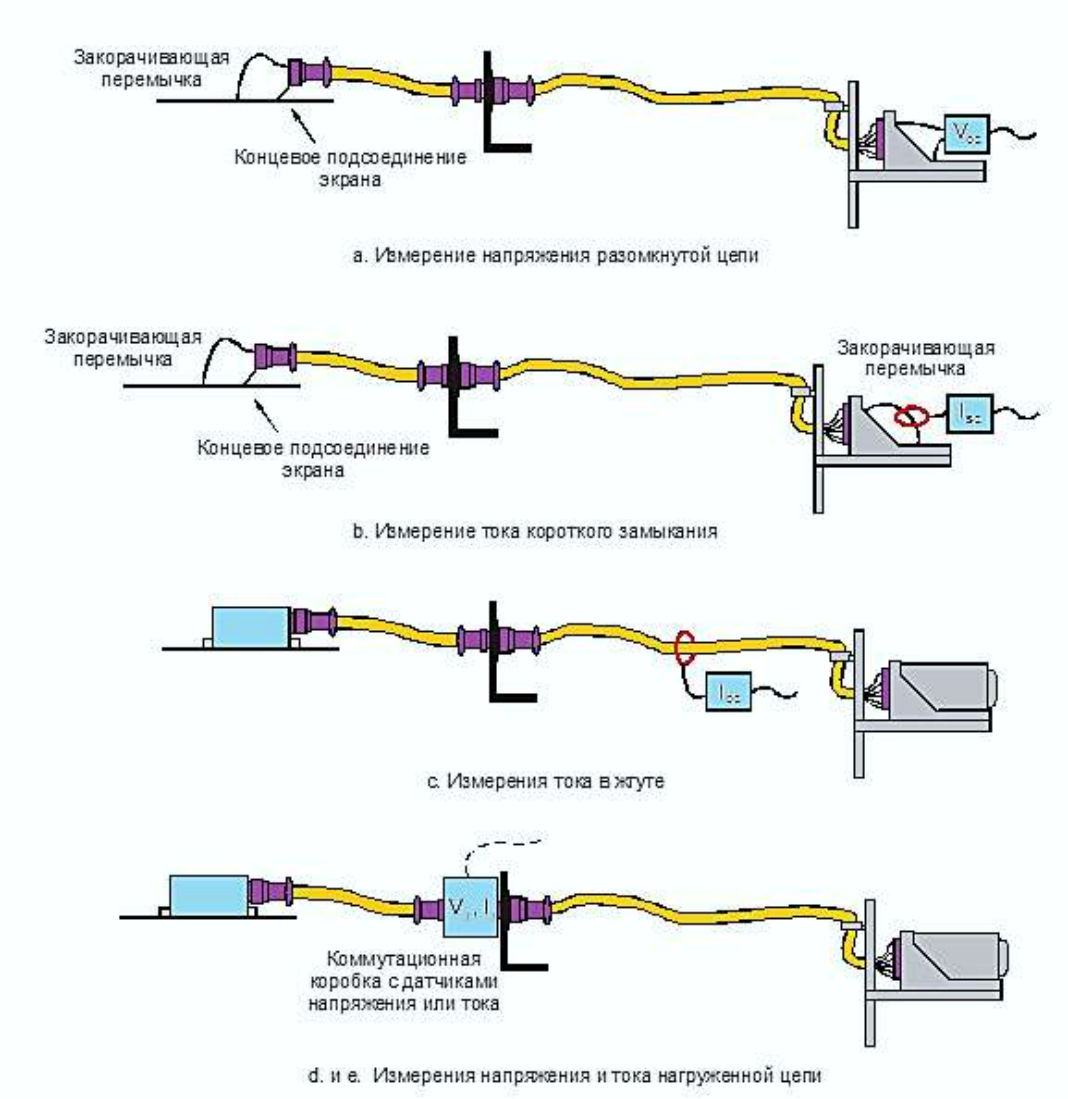


Рис. 2.38 – Схемы типов измерений [2.2].

Из приведенных на рис. 2.38 схем измерений наиболее часто используются первые три типа измерений, так как они наиболее просто могут быть связаны с ETDL, которые проверяются испытаниями согласно DO-160/ED-14, раздел 22 [2.13], а также потому, что эти измерения могут быть проведены с использованием относительно простых устройств закорачивания цепи. Для первых двух измерений (a и b) может быть получена эквивалентная схема с источником напряжения для каждой подвергаемой измерению цепи ЛА, из которой можно определить ATL. Последние два метода (d и e) обычно требуют применения более сложных коммутационных

коробок для установки датчиков измерения напряжения и тока без воздействия на характеристики цепи и экранировки жгута.

Для измерения напряжения разомкнутой цепи и тока короткого замыкания являющаяся объектом испытания электропроводка ЛА отсоединяется от быстросменного блока на конце измерения и на удаленном конце. Удаленные концы заземляются на ближайшую конструкцию планера с помощью перемычек. Длина перемычек должна быть минимальной для предотвращения влияния магнитного воздействия на результат испытаний. Заземление одного конца провода ЛА позволяет измерить на другом конце всё наведенное на этом проводе напряжение. Для данных измерений на разомкнутой цепи необходимо использовать датчики напряжения с высоким входным импедансом.

Измерения тока короткого замыкания выполняются путем установки дополнительной перемычки заземления на том конце, где проводятся измерения, таким образом, оба конца провода закорочены на конструкцию планера. Измерение тока, текущего в проводе, производится с помощью трансформатора тока, установленного вокруг перемычки на том конце провода, где проводятся измерения.

Дополнительные измерения могут включать в себя измерения напряжения, наведенного проходящими через отверстия магнитными полями, измерения напряжения, наведенного протекающими через сопротивления конструкции токами молнии, а также измерения плотности поверхностных токов. Измерение наведенного магнитным полем напряжения и напряжения на конструкции может быть проведено путем установки испытываемого провода на ЛА в том месте, где необходимо измерить эти конкретные напряжения. Для измерения наведенного магнитным полем напряжения и напряжения на конструкции испытываемый провод должен на одном конце иметь металлизацию на конструкцию ЛА, а измерение напряжения разомкнутой цепи выполняется с другого конца этого провода. Это аналогично измерению а, рассмотренному выше. Для измерения наведенного магнитным полем напряжения, провод располагается так, чтобы на него действовали магнитные поля, проникающие через отверстия. Для измерения напряжения на конструкции провод прокладывается в непосредственной близости от подвергаемой испытанию конструкции. Расстояние между проводом и конструкцией должно быть минимальным для уменьшения связи

магнитных полей с испытываемым проводом. Плотность поверхностного тока может быть измерена при помощи установки датчиков плотности поверхностного тока в заданных местах на внешней поверхности ЛА. Данные измерения используются для определения распределения тока вокруг ЛА. Эти результаты также могут использоваться для коррекции различий распределения токов в ЛА и обратном проводнике и прогнозируемого распределения тока в ЛА при попадании естественного разряда молнии. Данные измерения также используются для описания механизмов связи наведенных переходных процессов в определенных зонах ЛА. Это особенно важно при определении соответствующих масштабных коэффициентов, используемых в измерениях импульсных испытаний, если стандартные испытательные формы сигналов (компоненты А и Н) не применимы.

Места расположения быстросменных блоков и связанных с ними соединительных проводов должны определяться по монтажным чертежам систем ЛА и путем исследования монтажа непосредственно на самолете. Состояние экранов проводов также должно определяться по чертежам. Необходимо заземлить на конструкцию планера на том конце, на котором выполняются измерения, каждый экран, который на самолете в действительности либо заземлен на кожух разъема, либо через один из контактов разъема замкнут на корпус внутри быстросменного блока. Необходимо определить подходящее место вблизи от отсоединенного быстросменного блока для заземления экрана на время измерений наведенного напряжения.

Испытания ЛА качающейся частотой. Испытания ЛА качающейся частотой проводятся для измерения передаточных функций наведенного переходного напряжения или тока по отношению к току, подаваемому в ЛА. Передаточные функции в частотной области умножаются на соответствующий спектр в условиях молнии и преобразуются обратным преобразованием Фурье для получения результирующей характеристики молнии во временной области. При испытаниях ЛА качающейся частотой обычно используются подаваемые токи малой амплитуды, а передаточные функции, в том числе амплитуды и фазы, измеряются с помощью векторных схемных анализаторов.

Схема расположения ЛА и обратных проводников определена в 2.2.2.1. Поскольку в ходе испытаний ЛА качающейся частотой не возникает высокого напряжения между ЛА и обратными проводниками, расстояние между ЛА и обратными проводниками должно выбираться для обеспечения однородности распределения тока, а не величины отклонения напряжения. Желательно, чтобы импеданс генератора был согласован концевыми устройствами с аналогичными импедансами на каждом из концов ЛА. Если при данной схеме расположения невозможно провести через ЛА ток, достаточный для получения приемлемых результатов измерения при низких частотах (например менее 1 МГц), удаленный конец самолета следует замкнуть накоротко на сборку обратных проводников. На рис. 2.39 приведен эскиз типовой испытательной установки.

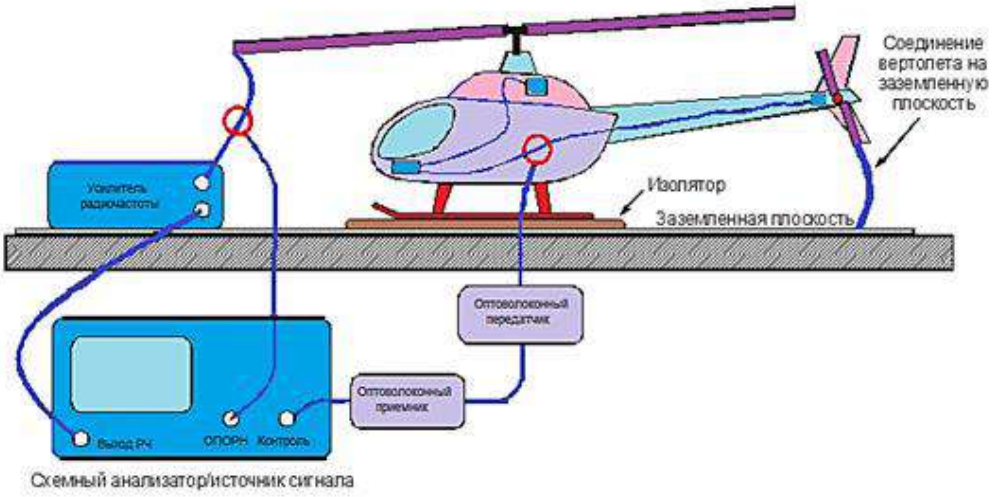


Рис. 2.39 – Испытательная установка для испытаний качающейся частотой [2.2].

Испытания качающейся частотой обычно проводятся с использованием относительно малых токов, которые создают относительно малые напряжения на сочленениях или других местах соединения, которые являются потенциальными источниками возникновения дугового разряда при естественных ударах молнии. Поэтому, необходимо использовать малоимпедансные перемычки через сочленения или места соединения для моделирования ожидаемых путей распространения тока молнии. Например, привод поверхности управления может быть токонепроводящим при низкой амплитуде испытательного тока, однако может стать

токопроводящим во время самых опасных разрядов молнии. Если измеряются переходные процессы в системе управления приводом или системе датчиков позиционирования, то одна испытываемая конфигурация может содержать перемычки, закорачивающие концы привода.

При проведении испытаний качающейся частотой используется синусоидальный ток малой амплитуды, подводимый в точке подсоединения к ЛА. Частота тока качается или ступенчато изменяется в заданном диапазоне частот. Диапазон частот, необходимый для определения характеристик, наведенных молнией переходных процессов, зависит в некоторой степени от ЛА, от механизма связи между подведенным в планер током и внутренними зонами ЛА, а также от взаимодействия с электропроводкой ЛА. Однако в общем случае низшая частота диапазона должна быть порядка 100 Гц для определения характеристик диффузии и напряжения на конструкции. Высшая частота диапазона должна быть порядка 50 МГц для определения явлений резонанса в ЛА и жгутах.

Эффекты связи и резонанса при частотах выше этой частоты не существенны, поскольку на этих частотах спектр условий молнии уменьшается на 40 дБ за декаду.

Амплитуда подводимого тока должна быть достаточно высокой для того, чтобы измерить передаточные функции при соответствующем отношении "сигнал/шум". Частота подводимого тока при заданной выходной мощности высокочастотного (РЧ) усилителя мощности изменяется. Подводимый ток будет высоким при низких частотах, при которых сопротивление ЛА и обратных проводников мало. При более высоких частотах подводимый ток уменьшается с возрастанием индуктивного сопротивления ЛА и обратных проводников. Из-за резонансов ЛА подводимый ток изменяется в значительной мере.

Источником тока является генератор качающейся или ступенчато изменяющейся частоты. Выходной сигнал генератора обычно усиливается с помощью широкополосного РЧ усилителя мощности для формирования тока, подводимого в ЛА в одной точке подсоединения. РЧ усилитель мощности должен работать на сильно несогласованную нагрузку, так как импеданс ЛА и обратных проводников обычно малорезистивный и индуктивный при низких

частотах, однако изменяется в значительной мере из-за резонансов ЛА.

Трансформатор тока установлен на проводник, соединяющей выход РЧ усилителя мощности и ЛА. Этот трансформатор тока подсоединен к опорному каналу схемного анализатора, измеряющего подводимый ток. В некоторых случаях для обеспечения соответствующего рабочего диапазона частот 100 Гц-50 МГц можно использовать несколько трансформаторов тока.

Измерительный датчик установлен для измерения тока экрана, тока в проводнике или напряжения в проводнике в зависимости от требуемой передаточной функции. В качестве измерительного датчика может применяться трансформатор тока или датчик напряжения. Для обеспечения соответствующего рабочего диапазона частот и чувствительности во всем диапазоне частот можно использовать несколько измерительных датчиков для одной контрольной точки.

В качестве измерительных приборов обычно используют векторный схемный анализатор, измеряющий амплитуду и фазу измерительного датчика относительно датчика подводимого опорного тока. Большинство векторных схемных анализаторов используют датчики с фазовой синхронизацией, узкий диапазон частот измерений и повторяющуюся выборку для обеспечения требуемого отношения "сигнал/шум" и динамического диапазона. В случае применения трансформатора тока, необходимо обеспечить, чтобы на измерения не оказывал влияние вносимый импеданс, особенно для низкочастотной части спектра.

Для подключения датчиков тока или напряжения к схемному анализатору часто используют широкополосные аналоговые оптоволоконные линии связи. На участке между измерительным датчиком и аналоговым оптоволоконным передатчиком используется короткий коаксиальный кабель. Вывод оптоволоконного приемника подключается к входу схемного анализатора. Оптоволоконная линия позволяет исключить возникновение нежелательных токов в проводах измерительного датчика на участке между ЛА и контрольно-измерительной аппаратурой. Эти токи могут являться источниками серьезных помех при измерении. Аналоговая оптоволоконная линия должна иметь рабочий диапазон частот такой же, какой необходим и для передаточной функции.

Характеристики наведенных переходных процессов измеряется как передаточные функции относительно входного тока в точке подсоединения к ЛА. По существу, передаточная функция не зависит от компонентов тока молнии. Этот факт может быть использован для определения характеристик наведенных переходных процессов в электропроводке ЛА путем умножения частотного спектра компонентов A, D, D/2 или H и применения к произведению обратного преобразования Фурье. Для точного описания частотной области передаточной функции очень важно, чтобы данные брались для достаточного числа частот. Таким образом, необходимо тщательно отобрать данные по частотам для получения передаточной функции. Для этого обычно необходимо меньшее количество точек при низких частотах (от 20 до 50 точек на декаду), где передаточная функция слабо изменяется, и существенно большее количество точек для высоких частот (от 100 до 200 точек на декаду) в зоне резонансных частот передаточной функции. Приблизительной границей между высокими и низкими частотами является частота 1МГц.

Необходимо измерить передаточные функции помех системы для каждого типа измеренной передаточной функции молнии в каждой точке измерения на ЛА. Передаточные функции помех для токов в экране или проводе обычно измеряются с помощью трансформатора тока, снятого с экрана или проводов и установленного в непосредственной близости к проводам в этом месте ЛА. Необходимо изолировать трансформатор тока от конструкции ЛА.

Передаточные функции помех для напряжений в проводе обычно измеряется с помощью датчика напряжения, отсоединенного от контрольной точки на ЛА и заземленного на экран датчика напряжений. Для датчиков несимметричных синфазных напряжений экран датчика должен быть подсоединен к той же опорной точке на ЛА, например, к конструкции, которая использовалась для измерения передаточной функции в контрольной точке.

Импульсные испытания. Испытания ЛА импульсами тока используются для измерения форм сигналов и амплитуд наведенных переходных напряжений или токов. Допускается применение испытательных импульсов тока с амплитудой меньшей, чем заданная для компонентов A, D или H, поскольку результаты измерения для полной амплитуды испытательного импульса и малой амплитуды

импульса хорошо согласуются при использовании соответствующих масштабных коэффициентов. Обычно применяют испытательные импульсы с максимальным значением амплитуды в диапазоне от 1 до 20 кА. Иногда допускается проводить испытания при больших значениях амплитуды испытательного тока. Применение полноамплитудных компонентов форм сигналов A, D или H обычно нецелесообразно, так как они могут привести к повреждению ЛА и/или оборудования.

Испытания ЛА импульсами тока обычно проводят при обесточенных системах, если используются импульсы тока уменьшенной амплитуды. На рис. 2.40 показан эскиз типовой испытательной установки.

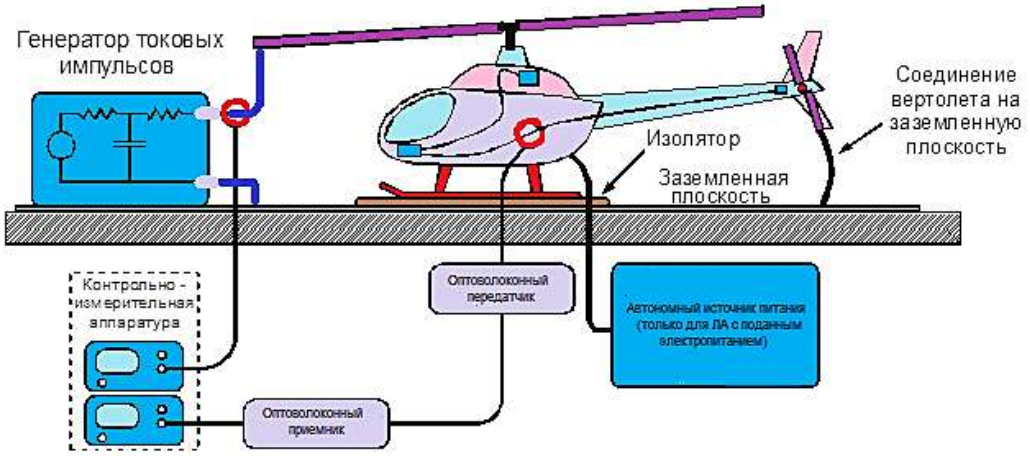


Рис. 2.40 – Испытательная установка для импульсных испытаний [2.2].

Однако в случае использования средних и высоких амплитуд компонентов форм сигналов A, D или H, испытания ЛА могут проводиться при работающих системах для обеспечения возможности контроля их характеристик, делая необходимым использование источника наземного питания. Источник наземного питания также необходим для питания некоторых являющихся объектами измерения цепей, с целью моделирования условий полета. В случае необходимости подключения источника наземного питания (электрического или гидравлического) к ЛА, эти источники должны подсоединяться к ЛА таким образом, чтобы не создавать дополнительных путей прохождения тока молнии в обратные проводники или местное заземление. Это необходимо проверить

путем сравнения измерений переходных процессов без источников наземного питания и с ними. Данные источники наземного питания должны иметь электрическую изоляцию, выдерживающую максимальные уровни напряжений возникающих между генератором импульсов, ЛА и обратными проводниками.

Для снижения помех переключения генератора импульсов и обеспечения его соответствующего импеданса генератор токовых импульсов должен содержать последовательно включенное сопротивление на участке между генератором импульсов и ЛА. Обычно это сопротивление составляет от одного до 2 Ω.

В выбранной конфигурации подсоединения провод соединяет генератор токовых импульсов и ЛА в одной точке попадания молнии, а обратные проводники и ЛА соединяются в другой точке попадания молнии. Обратные проводники должны располагаться таким образом, чтобы обеспечивать требуемое распределение тока в ЛА. Расстояние между обратными проводниками и ЛА должно быть достаточно большим, чтобы исключить возможность разрядов между ЛА и обратными проводниками при напряжениях, ожидаемых во время этих импульсных испытаний.

Испытательные импульсы тока уменьшенной амплитуды создают малые напряжения в сопряжениях или других местах соединения, которые являются потенциальными местами возникновения дугового разряда при естественном ударе молнии. Поэтому может понадобиться использовать малоимпедансные перемычки через сочленения или места соединения для моделирования ожидаемых путей распространения тока молнии. Например, на больших по площади поверхностях управления, таких как элероны, может возникать дуговой разряд между крайними точками элерона и примыкающей конструкцией крыла, особенно, если приводы и узлы навески расположены не в концевых точках элерона. Если измеряются переходные процессы в системе управления приводом или системе датчиков позиционирования, то одна испытываемая конфигурация может содержать перемычки между внешними концами элеронов и прилегающей конструкцией крыла.

Генератор импульсов должен генерировать стандартные формы испытательных сигналов, чтобы линейно экстраполировать результаты измерений до соответствующих форм сигналов компонентов A, D или H в соответствии с ARP5412 [2.4].

Очень важно пытаться получить типовые формы испытательных сигналов тока с целью упрощения процесса экстраполяции.
Определенные компоненты A, D и H представляют собой двойные экспоненциальные формы сигналов. Эти идеализированные формы сигналов имеют максимальную скорость нарастания тока в начале сигнала. Используемые на практике генераторы импульсов не могут мгновенно включить ток. Токи бегущей волны могут накладываться на испытательный ток вследствие рассогласований в линии передачи связанной с ЛА и обратными проводниками испытательного тока. Необходимо точно определить характеристику для максимальной скорости нарастания во время включения тока, так как она может доминировать над характеристиками переходных процессов, наведенных в проводке ЛА.

Источником тока является высоковольтный генератор импульсов тока. Обычно применяют генераторы импульсов с максимальным значением амплитуды тока в диапазоне от 1 до 20 кА. Необходимо установить трансформатор тока или резистор слежения за током на проводник, соединяющий вывод генератора испытательного тока с ЛА. Для некоторых высоковольтных генераторов импульсов для снижения напряжения, действующего на датчик, допускается установка трансформатора тока или резистора слежения за током в месте соединения генератора импульсов и обратных проводников. Система датчиков контроля тока генератора импульсов должна иметь эффективную полосу пропускания от 100 Гц до 50 МГц и достаточные возможности по произведению i*t.

Измерительный датчик установлен для измерения тока в экране, а также тока или напряжения в проводе, в зависимости от необходимой характеристики переходных процессов. В качестве измерительного датчика используют трансформатор тока или датчик напряжения с полосой пропускания, соответствующей ожидаемой характеристике.

Поскольку один датчик может не располагать требуемой полосой пропускания для охвата всех возможных характеристик переходных процессов, можно использовать низкочастотный и высокочастотный датчики в одной контрольной точке при последовательных импульсных испытаниях, чтобы обеспечить регистрацию соответствующих характеристик переходных процессов.

В качестве измерительного прибора для измерения переходных процессов обычно используется цифровой запоминающий

осциллограф или цифровой преобразователь переходного процесса. Цифровой осциллограф или преобразователь должны иметь соответствующую полосу пропускания для регистрации соответствующих характеристик переходных процессов. Эффективная рабочая полоса пропускания 100Гц - 50 МГц. Для многих цифровых запоминающих осциллографов полоса пропускания указана для повторяющихся форм сигналов, а не для одиночных переходных процессов. Поэтому цифровые запоминающие осциллографы должен иметь частоты отсчетов в 5 - 10 раз превышающие наибольшую частоту ожидаемой измеряемой характеристики. Так для резонансной частоты 20 МГц цифровой преобразователь или цифровой запоминающий осциллограф должен обеспечивать частоту 100 - 200 млн. отсчетов в секунду.

Цифровой запоминающий осциллограф или цифровой преобразователь переходного процесса может быть установлен в ЛА возле контрольной точки, в которой выполняется измерение. Коаксиальный кабель от измерительного датчика к цифровому запоминающему осциллографу или цифровому преобразователю переходного процесса должен быть коротким и хорошо экранированным. Можно использовать широкополосные аналоговые оптоволоконные линии связи для соединения измерительного датчика тока или напряжения с цифровым запоминающим осциллографом или цифровым преобразователем переходного процесса. Тогда цифровой запоминающий осциллограф или цифровой преобразователь переходного процесса может размещаться снаружи ЛА. Необходимо использовать короткий коаксиальный кабель на участке между измерительным датчиком и аналоговым оптоволоконным передатчиком. Вывод оптоволоконного приемника подсоединен к входу цифрового запоминающего осциллографа или цифрового преобразователя переходного процесса. Оптоволоконная линия связи позволяет избежать паразитных токов в проводке измерительного датчика на участке между ЛА и контрольно-измерительной аппаратурой. Эти токи являются существенным источником помех измерения. Аналоговая оптоволоконная линия связи должна иметь рабочую полосу пропускания такую же, как и диапазон частот желаемой характеристики переходных процессов.

Необходимо обеспечить экранирование измерительной системы от кондуктивных помех и помех от паразитного излучения. Необходимо поместить измерительную систему в экранированные корпуса для снижения влияния внешних помех на измерительную аппаратуру. Измерительная система также должна располагаться как можно ближе к точке, в которой производится измерение. Необходимо заземлить измерительную систему на конструкцию планера ЛА как можно ближе к точке, в которой производится измерение. Необходимо выполнить фильтрацию собственного питания измерительных приборов, находящихся в экранированном корпусе, используя проходные фильтры, установленные на боковой панели корпуса. Для исключения контуров заземления источники переменного и постоянного должны подключаться через соответствующие устройства развязки (например, разделительные трансформаторы для источника переменного тока или подведение мощности от источника постоянного тока через инвертирующий усилитель и фильтр).

Измерительные провода датчиков измерения напряжения и тока должны быть экранированы. Датчики для измерения перепада напряжений необходимо подбирать по их электрическим характеристикам. Они должны иметь малые размеры для использования в ограниченном пространстве. Для измерения тока в отдельных проводах и жгутах можно использовать трансформаторы тока, желательно с разъемными сердечниками, не нарушающими размещение установленной проводки.

2.2.2.2 Испытания оборудования и систем.

Данный вид испытаний используют формы сигналов переходного напряжения и тока для оценки способности отдельных компонентов оборудования или систем, содержащих несколько единиц оборудования, соединенных между собой жгутами, выдерживать воздействие наведенных молнией электрических переходных процессов.

Для инженерных расчетов и квалификационных испытаний оборудования и систем могут применяться три основных вида испытаний [2.8]:

- испытания на устойчивость оборудования к повреждениям, проводимые обычно с применением метода подачи сигнала через контакт или иногда через жгут (*штырьковые испытания*), для проверки того, что элементы цепи внутри части оборудования способны выдерживать прикладываемые переходные процессы без повреждения;
- испытания для оценки устойчивости к функциональному отказу систем, состоящих из нескольких компонентов оборудования, к воздействию переходных процессов, порожденных одиночным ударом молнии, многократным ударом молнии и многократными сериями разрядов, на соединительные жгуты систем, блоков и узлов, находящиеся в рабочих режимах с использованием разделительных систем и/или без разделительных систем посредствам емкостной или индуктивной связи.

Штырьковые испытания. Процедура испытаний на устойчивость оборудования к повреждениям для отдельных типов оборудования приведены в DO-160/ED-14, Раздел 22 [2.13].

Данный вид испытаний проводится методом подачи нормированных напряжений и токов непосредственно на разъемные соединения входов/выходов внешних цепей объектов. На рис. 2.41 приведена схема проведения штырьковых испытаний.

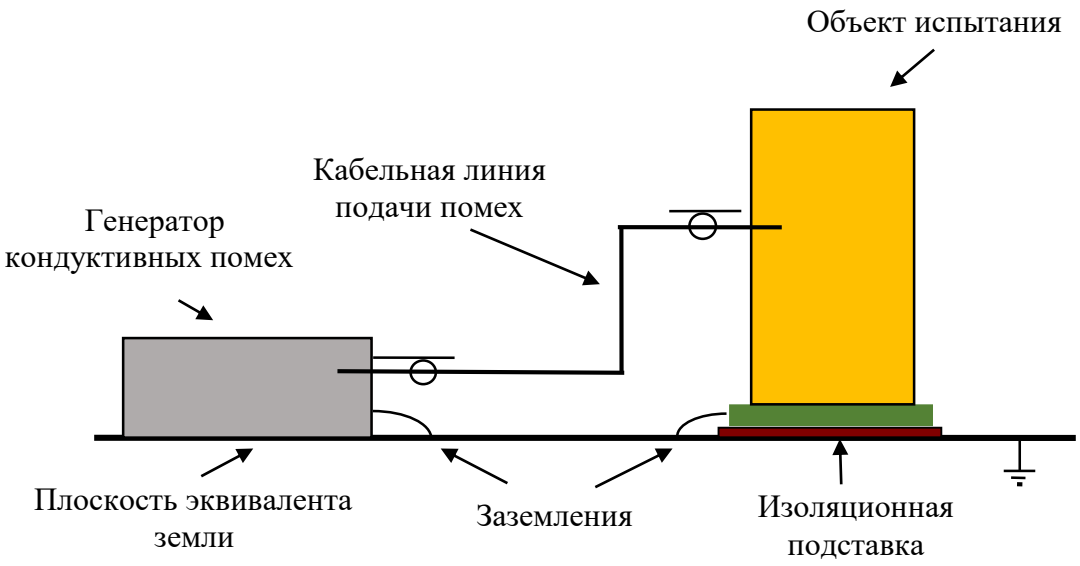


Рис. 2.41 – Структурная схема проведения штырьковых испытаний

Объект испытания и генератор кондуктивных помех располагаются на эквиваленте земли, который представляет собой плоскость, образованную металлическими листами. Его площадь должна превышать площадь объекта испытания и тестового генератора в три раза. Объект испытания располагается на изоляционной подставке толщиной не менее 0,1 м. Объект испытания и тестовый генератор должны иметь обязательную гальваническую связь с эквивалентом земли посредствам индивидуальных заземлителей. Генерируемые кондуктивные помехи подаются на вход /выход объекта испытания посредствам кабельной линии связи длиной менее 1 м.

Пример практической реализации штырьковых испытаний и метод ввода тестовых сигналов с использованием испытательного оборудования НИПКИ «Молния» (Украина) приведен на рис. 2.42.

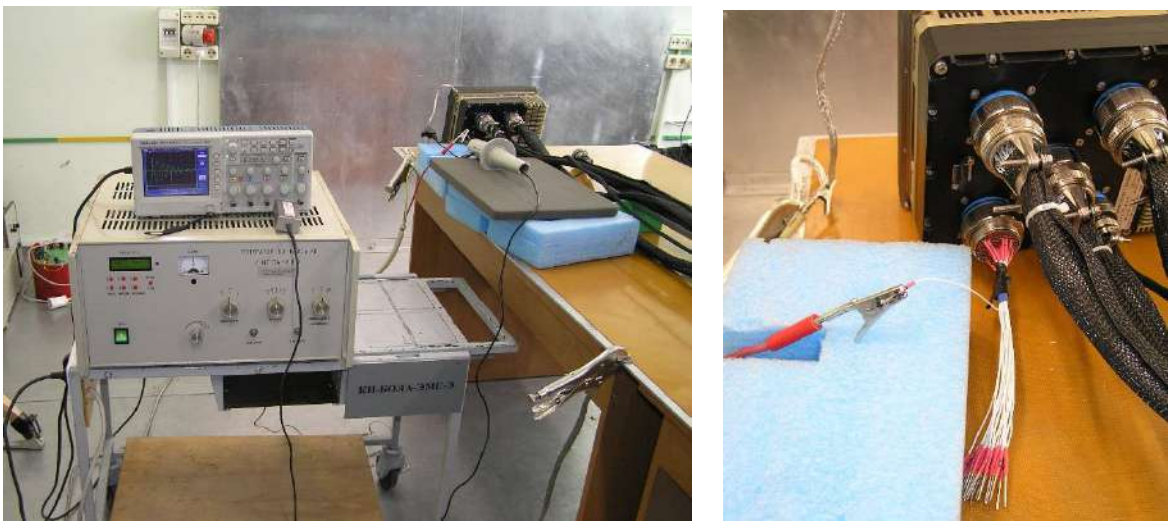


Рис. 2.42 – Общий вид экспериментальной установки и метод подвода тестовых сигналов при штырьковых испытаниях.

Как правило, целью данного вида испытаний является определение электрической прочности изоляции входных (выходных) цепей и электромагнитной стойкости их элементной базы. Данный вид испытаний проводится для цепей телекоммуникационной связи и антенно-фидерных трактов объектов.

Испытания на устойчивость оборудования, состоящего из нескольких элементов, к функциональным отказам. Процедуры оценивания функциональных отказов отдельных типов оборудования в результате воздействия одиночных разрядов, многократных разрядов и многократных серий разрядов молнии также описаны в DO-160/ED-14, Раздел 22 [2.13].

Данный вид испытаний проводят для систем, состоящих из нескольких единиц оборудования, реализующего функции визуализации и управления при анализе систем, содержащих большое количество жгутов, в особенности систем с множеством каналов или встроенных функций, таких как FADEC, ATM и системы дистанционного управления, где может понадобиться одновременная подача в несколько жгутов, чтобы гарантировать всестороннее воздействие на систему таким способом, который представляет воздействие в реальных условиях.

Одновременная подача осуществляется с помощью подачи на точку заземления быстросменных блоков или одновременной подачей на отдельные жгуты при помощи трансформаторов.

В последовательность испытаний с одновременной подачей необходимо включать наихудшие случаи, характеризующиеся наибольшими амплитудами наведенных напряжений или токов. Если в системе предусмотрен процесс изменения конфигурации в случае отказа, необходимо проводить испытания всех конфигураций или испытывать как минимум самые критические конфигурации, включая нормальную и последнюю возможную (в которой не осталось ни одного резервного элемента) конфигурацию.

Допускается использование альтернативных подходов одновременной подачи, если результирующее испытание направлено на определение потенциальных восприимчивостей системы. Например, в многоканальной системе допускается испытание жгутов, связанных только с одним каналом, если система сконфигурирована на одноканальную работу, исходя из предположения, что любая восприимчивость, возникающая в отдельном активном канале, такая же, как и для всех остальных каналов. Следует отметить, что альтернативные подходы, упрощающие конфигурацию испытания, могут приводить к состояниям отказов, которые не возникают в реальных условиях.

На некоторых ЛА установлены системы, содержащие резервные каналы управления или данных, и процедуры эксплуатации этих ЛА допускают отправку самолета при наличии одного или более неисправных каналов. Например, некоторые полностью автономные электронные системы управления двигателями допускают возможность отправки самолета при неисправности одного из каналов управления согласно процедурам отправки с ограничением по времени (TLD). Для этих типов систем испытания системы должны включать в себя испытания конфигураций с отказавшим каналом в соответствии с процедурами TLD. Таким образом, конфигурации системы для этих испытаний должны включать в себя нормальную полностью работающую конфигурацию и конфигурацию TLD с отказавшим каналом.

Испытания с использованием *устройств связи-развязки* проводится для жгутов оборудования в режиме их функционирования без отключения от объекта испытания и основного порта управления.

На рис. 2.43 приведена структурная схема проведения испытаний с использованием устройств связи-развязки.

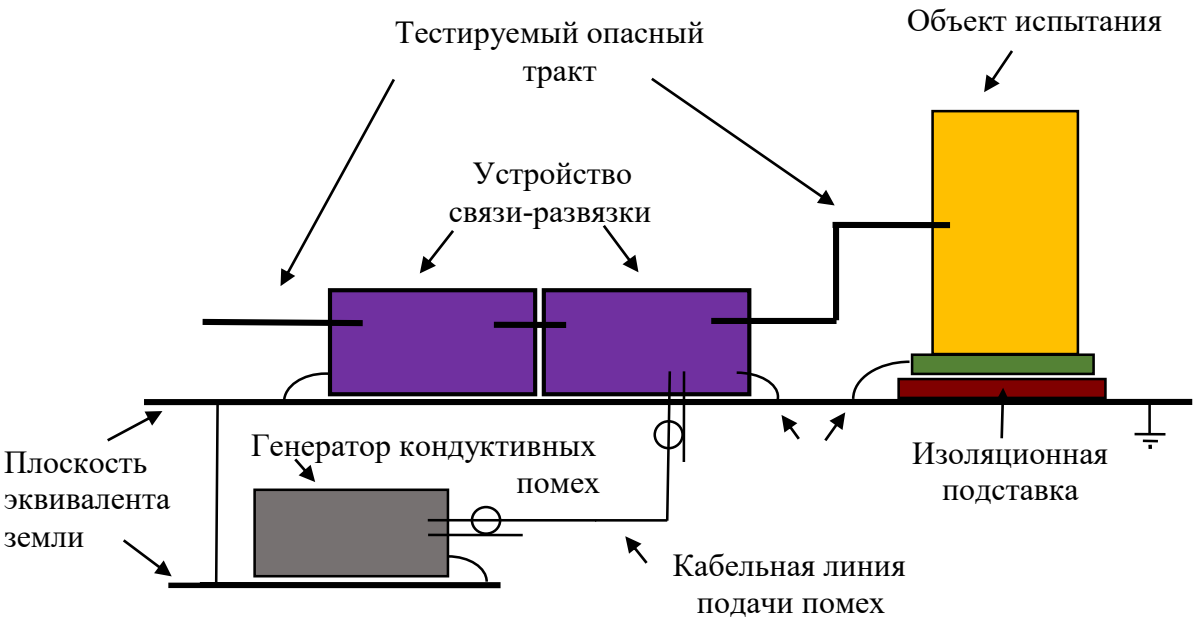


Рис. 2.43 – Структурная схема проведения испытаний с использованием устройства связи-развязки

Пример практической реализации испытаний с использованием устройства связи-развязки при помощи испытательного оборудования НИПКИ «Молния» (Украина) приведен на рис. 2.44.

Рис. 2.44 - Общий вид экспериментальной установки с использованием устройства связи-развязки

Как и в предыдущем случае, объект испытания и генератор кондуктивных помех располагается на эквиваленте земли, представляющий собой плоскость, образованную металлическими листами площадью, превышающую площадь объекта испытания и тестового генератора в три раза. Объект испытания располагается на изоляционной подставке толщиной не менее 0,1 м. Объект испытания и тестовый генератор должны иметь обязательную гальваническую связь с эквивалентом земли посредствам индивидуальных заземлителей.

Генерируемые кондуктивные помехи подаются на вход/выход объекта испытания посредствам кабельной линии связи длиной менее 1 м через устройство связи-развязки. Устройство связи представляет собой блок, который обеспечивает подачу генерируемых кондуктивных помех в тестируемый опасный тракт. Подача этих помех может осуществляться двумя способами – либо через емкость, включаемую в рассечку жилы кабеля, либо непосредственно через зажим.

Устройство развязки предназначено для предотвращения попадания имитируемых кондуктивных помех в основной порт управления и представляет собой полосовой фильтр с большой величиной затухания в полосе частот имитируемой помехи.

Целью данного метода испытаний является определение уровня электромагнитной стойкости входных/выходных цепей и элементной базы объекта испытания с подключенной непосредственно к нему линией связи (опасным трактом).

Испытания методом *инжекции помех в жгуты* проводится для определения уровня электромагнитной стойкости двух или более объектов, объединенных в единую функциональную систему, а также при отсутствии возможности разрыва и внедрения в линии связи по предыдущему методу испытаний.

На рис. 2.45 приведена структурная схема проведения испытаний методом инжекции помех в линию связи. В этом случае кондуктивная помеха воздействует одновременно на объект испытания и порт управления, что позволяет оценивать уровень электромагнитной стойкости системы в целом.

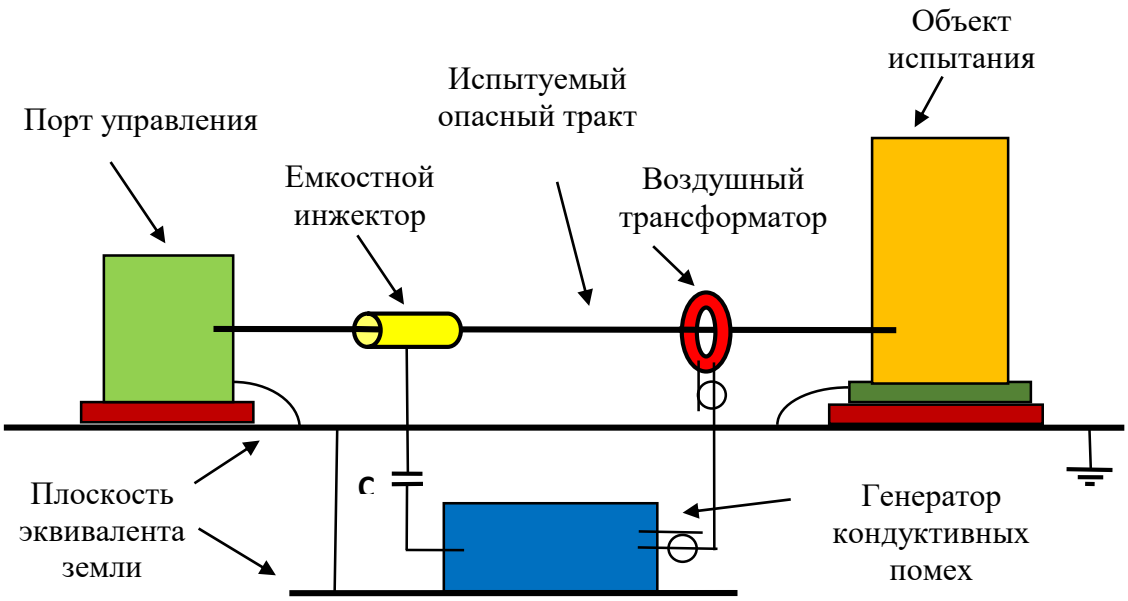


Рис. 2.45 – Структурная схема испытаний методом инжекции помех в линии связи

Пример практической реализации испытаний методом инжекции помех при помощи испытательного оборудования НИПКИ «Молния» (Украина) приведен на рис. 2.46.

Рис. 2.46 - Общий вид экспериментальной установки при испытании методом инжекции помех в линии связи

Обычно при таких испытаниях требуется подавать ток наводки во внутреннюю жилу кабеля связи. Для многожильного экранированного кабеля этот ток по амплитуде может достигать значений от нескольких десятых долей до нескольких десятков ампер. Он вводится с помощью искусственно созданной емкостной связи (путем обматывания фольгой кабеля) при постепенном возрастании степени связи за счет увеличения площади намотки этой фольги или путем увеличения емкости конденсатора ***C*** (см. рис. 2.43). Увеличение степени емкостной связи прекращают, когда в месте ввода возникает достаточный по условиям испытаний ток или падение напряжения.

Другой способ заключается в создании мощного сигнала в кабеле связи с помощью обычной токовой петли связи (воздушного трансформатора). Это решение аналогично подключению последовательно в кабель источника электродвижущей силы. При этом «землю» используют в качестве возвратного токопровода для обеспечения появления основной части падения напряжения на входных цепях блоков испытуемой системы.

В зависимости от количества соединительных жгутов оборудования ЛА испытания проводят для одного жгута или одновременно для нескольких жгутов.

Испытания отдельных жгутов проводят для систем с одним соединительным жгутом или в тех случаях, когда одновременная подача в жгуты невозможна. Специальные процедуры подачи в один жгут описаны в DO-160/ED-14 [2.13].

Испытания проводят для каждого отдельно взятого жгута с использованием заданных для него испытательных и предельных уровней (там, где это применимо). Если несколько жгутов проложены в общее место, так что типичной является угроза группового отказа, то предельные токи каждого жгута необходимо просуммировать. Ограничения по напряжению остаются теми же.

Провода питания могут проводить наведенные молнией переходные процессы из различных мест в ЛА. Поэтому для них часто задаются испытательные уровни, отличающиеся от уровней для других жгутов, связанных с тем же оборудованием. Провода питания можно испытывать как часть жгута, если для них не определены другие уровни ETDL, чем для их жгута (жгутов). Провода питания может также понадобиться испытывать как в режиме группового отказа, так и в режиме отдельного отказа, так как эти провода часто

проходят по всему ЛА, и переходные процессы могут возникать как между линиями питания, так и между обоими (линия высокого напряжения и обратный провод) проводами и местным заземлением.

При проведении этих испытаний необходимо использовать формы сигналов № 1 или 3, определенные в ARP5412 [2.4], с максимальным уровнем от 100 А до 1 кА.

Одновременная подача в различные жгуты или ветви жгутов обычно осуществляется наведением на жгут или подачей в точку заземления. Подача в жгут предусматривает наведение тока и напряжений на определенных участках жгутов системы. При подаче в точку заземления ток и напряжение подаются на корпус или корпуса испытываемого оборудования, что обеспечивает протекание тока через жгуты в зависимости от импедансов этих жгутов.

На рис. 2.47 и 2.48 показаны типовые испытательные установки для трансформаторной подачи и подачи в точку заземления, соответственно.

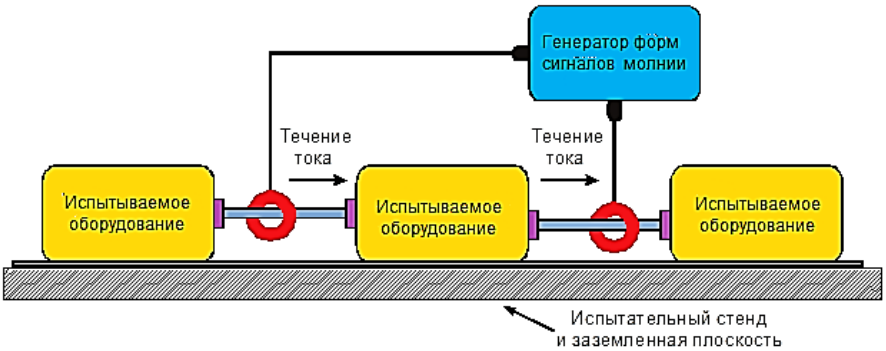


Рис. 2.47 – Одновременная подача с использованием трансформаторного подведения

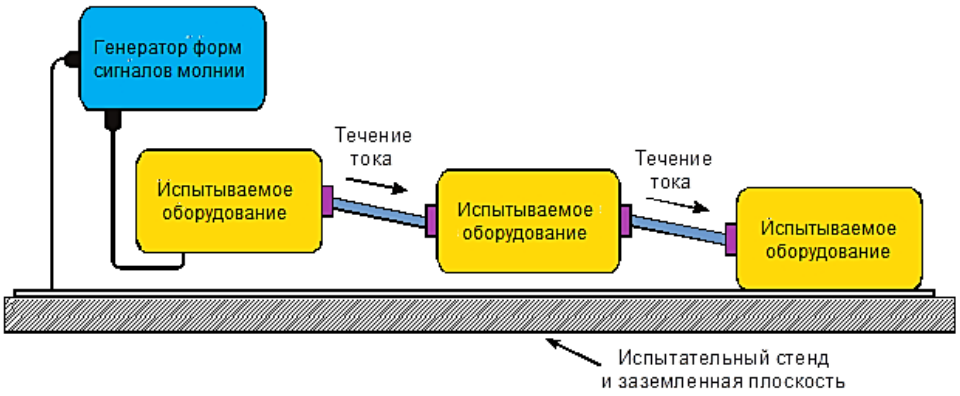


Рис. 2.48 – Одновременная подача с использованием подачи в точку заземления

На рис. 2.49 и 2.50 приведены примеры практической реализации испытаний с использованием трансформаторного подведения и методом подачи в точку заземления соответственно, при помощи испытательного оборудования НИПКИ «Молния» (Украина).

Рис. 2.49 - Общий вид экспериментальной установки при испытании методом трансформаторного подведения

Рис. 2.50 - Общий вид экспериментальной установки при испытании методом подачи в точку заземления

Подача в жгут обычно используется для подачи форм сигналов № 2 и 3 на жгуты системы. Подача в точку заземления обычно используется для форм сигналов № 1, 4 и 5 (см. гл.1, р. 1.5.2).

2.2.2.3 Выбор форм испытательных сигналов

Выбор испытательных воздействий осуществляется в соответствии с условиями эксплуатации бортовых жгутов, межблочных связей и оборудования на объекте.

Стандарт AECTP-250 [2.14] рекомендует производить выбор испытательных воздействий в соответствии со следующими принципами:

1. Когда переходные уровни отклика (CTL) не известны, максимальные амплитуды для тестовых сигналов выбранных в соответствии с установкой оборудования Категории A - D (электромагнитные среды (EME) оборудования) и E (критичность оборудования).

а. CAT A - Оборудование и кабели, установленные в защищенной EME, такие как полностью закрытого отсека в металлических материалах.

б. CAT B - Оборудование и кабели, установленные в частично разомкнутой EME такой как диэлектрический чехол в значительной металлической структуре.

с. CAT C - Оборудование и кабели, соединенные с той же частью материальной структуры и установлен в открытой EME, где большие части конструкции построены из плохо проводящих или Композиция из углеродного волокна (CFC).

д. CAT D - Оборудование и кабели, соединенные с различными частями материальной структуры и установлен в открытой EME, где большие части структуры построены из плохо проводимых материалов или ХФУ.

е. CAT E - оборудование, в котором переходные процессы молниеносного грунта оцениваются не иметь какое-либо влияние или когда нарушение или ущерб не будут компрометированы безопасность материальных средств или успех миссии.

2. Если оборудование и кабели могут быть определены более чем в одном из указанных выше категорий, применяются уровни испытаний, связанные с наиболее суровыми условиями окружающей среды.

3. Уровни тестов, соответствующие категориям испытаний, определенны в табл. 2.2.

Таблица 2.2 - Уровни испытаний для категорий установки оборудования [2.14]

Категория оборудования	Воздействующий импульс (напряжение/ток, V / A ±10%)			
	SP (короткий) V / A	IP (промежуточный) как ток, V / A	IP (промежуточный) как напряжение, V / A	LP (длинный) V / A
A	125/250	125/250	N / A	N / A
B	300/600	300/600	2000/1000	2000/1000
C	750/1500	750/1500	2000/10000	2000/10000
D	1600/3200	1600/3200	2000/3000	2000/3000
E	N / A	N / A	N / A	N / A

Уровни и частоты для DS сигналов при испытании качающейся частотой.

Во время инъекционных испытаний переходные процессы должны вводиться на частотах в соответствии с следующими принципами:

а). Наиболее чувствительные частоты в диапазоне от 2 до 50 МГц, найденные из любых предыдущая непрерывная волна (CW) объемный ток впрыск электромагнитный совместимости (EMC);

б). Частоты, при которых возникают максимальные и минимальные сопротивления кабеля;

с). В диапазоне частот от 2 до 50 МГц включительно не менее 50, так что любой резонанс в тестируемом оборудовании (EUT) внутренние возбуждения возбуждаются, поэтому подвергая любые активные или пассивные устройства максимальное напряжение или текущую угрозу. Эти частоты должны быть разнесены равномерно с логарифмическим приращением.

Пределы испытаний.

Когда CTL не известны то:

а). Предел тока 30 А от 2 до 30 МГц уменьшается до 15 А при 50 МГц;

б). Предел напряжения 3 кВ между 2 и 30 МГц, уменьшающийся до 1,5 кВ при 50 МГц;

с). Предел кВА 30 кВА от 2 до 30 МГц, уменьшающийся до 7,5 кВА при 50 МГц.

Примечание. Пределы тока, напряжения и KVA не применяются вместе. Максимальный тест уровень устанавливается, когда достигается какой-либо из этих пределов.

Испытательные сигналы для непрямого индуцируемого напряжения и проверки прочности изоляции. Часто желательно оценивать напряжения, которые могут быть вызваны молнией в отдельных подсистем или компонентов, таких как антенны и внешние датчики, когда считается, что они особенно уязвимы для пробоя изоляции или напряжения. Такие тесты могут проводиться отдельно или в сочетании с импульсными тестами AECTP-250 описано выше. В испытаниях на поток апертуры или быстродействующую муфту важную параметр формы волны *di / dt*; поэтому такие испытания должны проводиться с использованием Форма волны D2, которая определена в табл. 1.10.

2.3 Испытания объектов ракетно-космической техники

2.3.1 Мировая практика в подходах к испытаниям на молниестойкость объектов РКТ

Как показывает анализ мировой практики проведения испытаний объектов ракетно-космической техники (РКТ) на молниестойкость, основные требования касательно этих объектов заложены в серии стандартов по молниезащите самолетов и вертолетов SAE ARP 54XX[1] с соответствующей их адаптацией к конкретному транспортному средству – объекту РКТ [2.15].

Так, ссылки на SLS-SPEC-159 и требования к молниям космического аппарата Orion [2.15] разработаны на основе серии рекомендованных аэрокосмических практик Общества автомобильных инженеров (SAE), которые содержат информацию о взаимодействии молний с летательными аппаратами, руководство по проектированию и сертификации для прямого и косвенного воздействия, а также методы испытаний.

Данная процедура испытаний подробно приведена выше в разделе 2.3.

Также в качестве источника требований, методик проектирования и прогнозирования результатов испытаний объектов РКТ широко используются документы FAA AC 20-136B [2.16] и MPCV 70080 [2.17].

Специфика подхода к испытаниям на молниестойкость объектов РКТ по сравнению с испытаниями самолетов и вертолетов заключается в аспектах *учета линейных размеров, конфигурации и условий эксплуатации объектов РКТ* и *использование ракет-*

---

[1] **SAE ARP 54XX**
SAE ARP5412B, Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms, SAE International, Warrendale, PA, USA
SAE ARP5414B, Aircraft Lightning Zoning, SAE International, Warrendale, PA, USA
SAE ARP5415B, User's Manual for Certification of Aircraft Electrical/Electronic Systems for the Indirect Effects of Lightning,
SAE International, Warrendale, PA, USA
SAE ARP5416A, Aircraft Lightning Test Methods, SAE International, Warrendale, PA, USA
SAE ARP5577, Aircraft Lightning Direct Effects Certification, SAE International, Warrendale, PA, USA

носителей в качестве объектов вооружения и военной техники (ОВВТ).

2.3.2 Специфика подхода к испытаниям объектов РКТ на молниестойкость

2.3.2.1 Подходы к испытаниям объектов РКТ с учет условий их реальной эксплуатации

Данный аспект связан с испытанием объекта РКТ в целом и используются для определения фактических переходных уровней, в том числе переходных сигналов, индуцированных в проводке его электрических/электронных систем. Эти амплитуды и формы индуцированного переходного тока и напряжения обычно измеряются на установленных экранах жгутов и отдельных проводах. Измеренные ATL могут использоваться для определения или проверки связанных расчетных уровней наводок молниезащиты и проектных уровней наводок для оборудования. Переходные процессы могут также измеряться на проводниках неэлектрических систем, таких как топливные, гидравлические и пневматические линии и конструктивные элементы для молниезащиты.

Испытание ракет-носителя (РН) может проводиться на полностью собранной РН или на большом отсеке РН. Если это испытание проводится для сертификации (как зачетные испытания) РН, необходимо использовать промышленно изготавливаемую (штатную) РН.

Если испытание проводиться с целью определения данных, необходимых на этапе проектирования, то могут использоваться прототип, макет или большие отсеки РН. Конструкция, жгуты и установка оборудования должны быть в электромагнитном смысле аналогичны таковым на подвергаемой испытанию промышленной конфигурации РН. Если для этого испытания используется большой отсек РН, возможно применение дополнительных проводящих ток элементов, моделирующих течение тока в отсутствующей части РН, не включенной в состав РН.

Испытания на РН могут проводиться как при обесточенных системах РН так и при включенных.

При этом, могут понадобиться незначительные модификации РН вызванные необходимостью установки контрольно-измерительной аппаратуры и датчиков. Эти модификации должны быть спроектированы и установлены таким образом, чтобы они не влияли на пути распространения тока молнии, и чтобы при этом не образовывались дополнительные отверстия в конструкции РН.

Перед проведением испытаний необходимо демонтировать или обезопасить любые элементы топливной системы, и пиротехнические устройства.

Для моделирования важных характеристик взаимодействия молнии с РН необходимо определить конфигурацию подсоединений обратных проводников и генератора тока. Распределение тока в испытываемой РН должно как можно более точно имитировать распределение тока в РН в течение попадания в нее разряда молнии в полете.

Для испытаний небольшими токами может использоваться схема с заземляющей плоскостью показанная на рис. 2.51.

При использовании такой схемы испытаний более высокие плотности будут наблюдаться в нижней части корпуса ракеты и требуется дополнительный анализ представления распределения тока по поверхности ракеты в полете. Для уточнения полученных данных можно развернуть ракету вдоль оси на 180 градусов и провести дополнительные испытания.

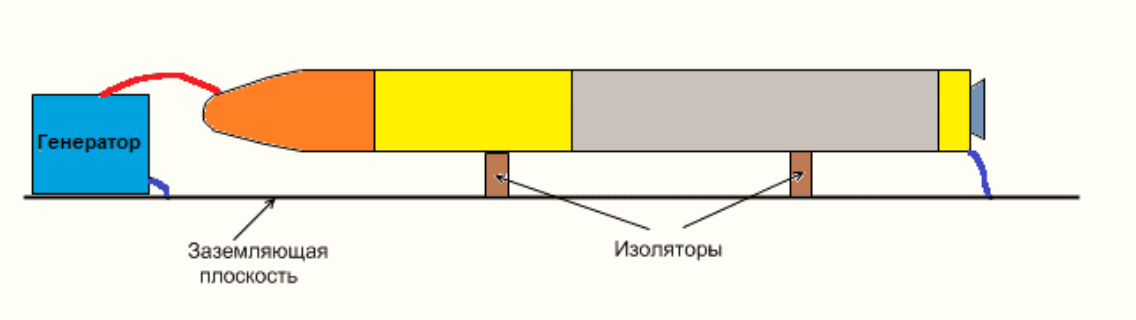


Рис. 2.51 - Использование заземляющей плоскости в качестве обратного проводника.

Конфигурация с коаксиальным расположением обратных проводников, показанная на рис. 2.52, более предпочтительна. Такое расположение обратных проводников обеспечивает достаточно однородное распределение тока на поверхности РН. Дополнительный анализ распределения тока в конструкции во время полета не

требуется, за исключением случая рассмотрения резонанса короткозамкнутого подсоединения обратного проводника по сравнению с ожидаемым импедансом канала молнии при ударе молнии в полете.

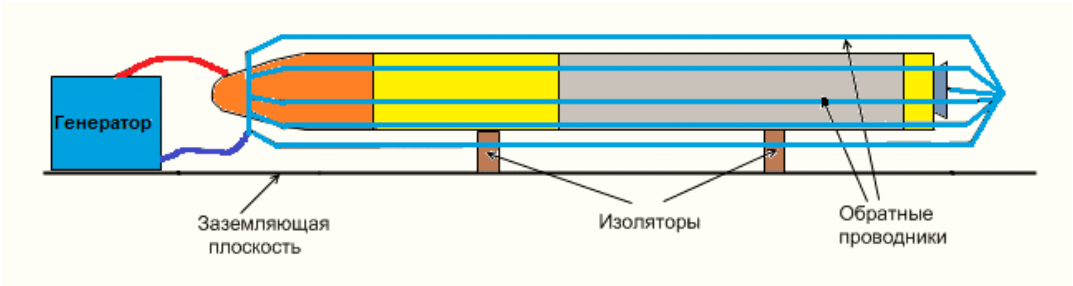


Рис. 2.52 - Коаксиальное расположение обратных проводников.

Метод испытания объектов РКТ наземного базирования на прямое воздействие токов молнии может проводится по схеме с заземленной плоскостью, аналогичной приведенной на рис. 2.51, или по схеме, приведенной на рис. 2.52.

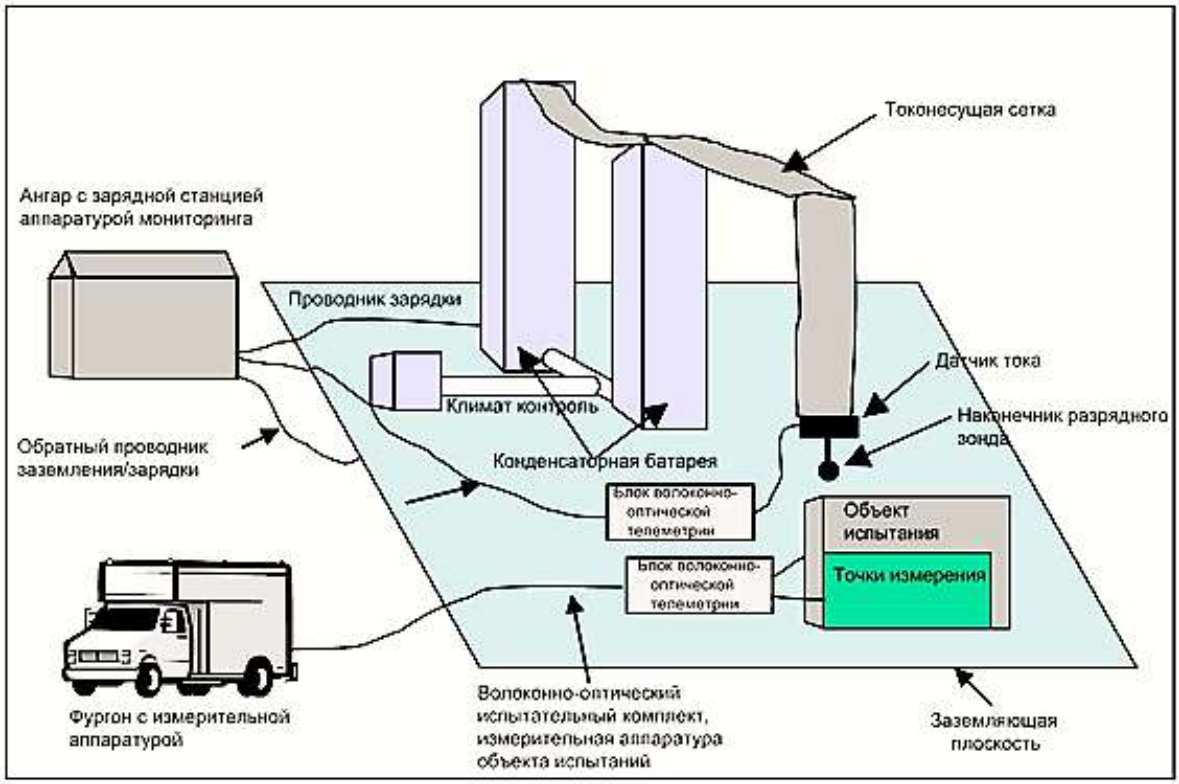


Рис. 2.52 - Испытания наземных объектов РКТ

Испытание по параметрам молниестойкости объектов РКТ высокими напряжениями и токами молнии при вертикальной ориентации объекта больших размеров не проводятся в виду трудностей технического характера при реализации требуемых амплитудно-временных параметров испытательных сигналов тока и напряжения в разрядных контурах «объект испытания – генерирующая аппаратура».

2.3.2.2 Испытания на молниестойкость в целом объектов вооружения ракетной техники

Объекты вооружения и военной ракетной техники связанных с ЛА имеют свою специфику по обеспечению требований молниестойкости [2.1, 2.14].

Также, как и ТС общего назначения, эти системы должна удовлетворять своим эксплуатационным требованиям как по отношению к эффектам прямых, так и косвенным воздействия молнии. При этом, боеприпасы должен отвечать эксплуатационным требования после того, как они подверглись прямому воздействию молнии в период их хранения. Боеприпас должен оставаться безопасным вовремя и после прямого удара молнии. Эти требования должны распространяться на их системы, подсистемы, оборудование и компоненты или их комбинации. Требуемый уровень молниестойкости боеприпасов и связанных с ними систем к прямым ударом молнии включает в себя также пусковую установку. Термин «боеприпасы и связанные с ним системы» следует понимать, как боеприпас и все системы, необходимые для его запуска и контроля. Когда соответствующая система часть платформы (например, корабль или самолет), которая имеет отдельный уровень молниестойкости.

В табл. 2.3 приведены требования по обеспечению молниестойкости боеприпасов при воздействии на них разрядов молний.

Таблица 2.3 – Классификация молниевых воздействий на объекты вооружения и связанные с ними эффекты [2.14].

КЛАССИФИКАЦИЯ ВОЗДЕЙСТВИЙ МОЛНИИ	ЭФФЕКТЫ И ВИДЫ ИСПЫТАНИЙ
ПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ	Прожиг металла корпуса Формирование точки прожига Смещение канала по поверхности Поверхностное повреждение слоистой непроводящей панели корпуса Поверхностное повреждение металлизированной слоистой панели корпуса Поверхностное повреждение сотовой непроводящей панели корпуса Омический нагрев Магнитные силы Акустическая ударная волна
НЕПРЯМОЕ ЭФФЕКТЫ НА ОБЪЕКТ В ЦЕЛОМ	Импульсные испытания
НЕПРЯМОЕ ЭФФЕКТЫ НА СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ ОБЪЕКТА	Измерения индуцированных напряжений Испытания на целостность изоляции
НЕПРЯМОЕ ЭФФЕКТЫ НА ОБОРУДОВАНИЕ ОБЪЕКТА	Импульсные испытания Инжекция синусоидальных помех Нагружение по системе заземления Многократные всплески, классы оружия А и только D1
ЛИДЕРНАЯ СТАДИЯ МОЛНИИ	Испытания на диэлектрические пробои
ПРЯМЫЕ И НЕПРЯМЫЕ ЭФФЕКТЫ, КОТОРЫЕ МОГУТ ВЛИЯТЬ НА ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА И ТОПЛИВО	Точка прожига и другие испытания, связанные с прямыми эффектами. Испытание на искрение. Испытание на горючий газ. Измерения индуцированных напряжений Испытания на диэлектрические пробои.

Эти требования применимы для оценки и испытания на молниестойкость всех классов оружия как определено ниже.

Класс оружия А. Боеприпасы, транспортируемые на самолете и связанные с ним системы которые не базируются на самолете.

Класс оружия В. Сухопутный боеприпас, включая его пусковой и контрольный комплекс.

Класс оружия С. Боеприпас морского базирования и его пусковая платформа, но не корабль, на котором установлена пусковая установка.

Класс оружия D1. Наземная пусковая управляемая ракета для целей и ее пусковая система.

Класс оружия D2. Воздушная пусковая управляемая ракета для целей и связанные с ней системы, но не самолет.

Класс оружия Е. Боеприпасы, не сертифицированные против прямого воздействия, но которые должны сохранять работоспособность при непрямых воздействиях. Примерами оружия класса Е являются ракеты и небольшие боеприпасы.

2.3.2.3 Методы испытаний объектов вооружения ракетной техники на воздействие прямых и близких разрядов молнии

Оружие может подвергнуться опасным воздействиям молнии как от ее прямого попадания, так и от ближайших разрядов. При этом прямое поражение представляет собой более серьезную опасность и связанные с нею последствия. Однако есть исключения в отношении тех ОВВТ наземного базирования, которые требуется учитывать, чтобы они выдерживали ближайший удар в землю, но не прямое поражение. Для оценки молниестойкости этих ОВВТ необходимо определить электромагнитную обстановку у земли с точки зрения магнитного и электрического полей и скорости их изменения на конкретных расстояниях от канала разряда [2.1].

Это расстояние будет минимальным расстоянием (R), на котором оружие может находиться от канала разряда, и будет зависеть от высоты и формы ОВВТ и топография окрестностей. Поскольку топография для широкой разнообразие ситуаций невозможно определить заранее, стандартные условия достигается за счет предположения, что окружающий грунт плоский, без значительных выступов. Тогда минимальное расстояние R можно предсказать по местоположению точки удара, используя метод "катящейся сфера", который применяется при расчете молниезащиты зданий и сооружений [2.18]. Практика показала, что сфера радиусом 50 м обычно репрезентативен для наихудшего сценария наземного удара, и поэтому он должен использоваться для определения минимальной дистанции удара.

На рис. 2.53 показана основа для расчета катящейся сферы и полученный результат значения для сферы радиусом 50 м, которые приведены в табл. 2.4.

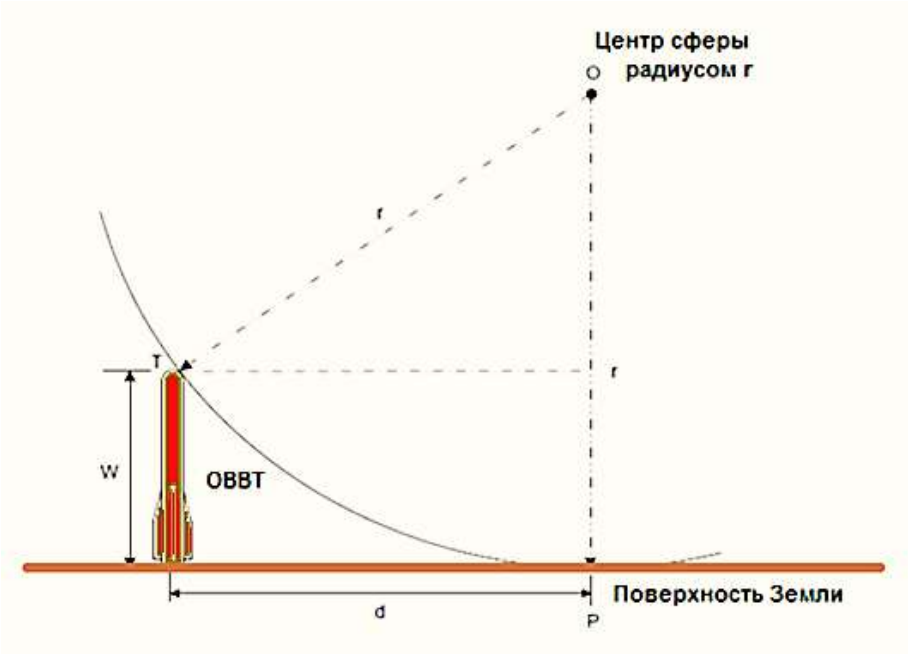


Рис. 2.53 – «Катящаяся сфера» адаптированная к минимальному расстоянию от канала разряда до ОВВТ без его прямого поражения молнией [2.1]

Таблица 2.4 - Значение минимального расстояния (d) для разной высоты оружия [2.1]

Высота ОВВТ (W), м	1	2	3	4	5	10
Минимальное расстояние (d), м	9,9	14,0	17,0	19,6	21,8	30,0
Округленные значения (d), м	10	14	17	20	22	30

Следует четко понимать, что, для приближения «плоской поверхности» в худшем случае нет гарантии, что оружие, молниестойкость которого оценено таким образом, не будет подвергаться риску при использовании в грозовой обстановке. Это связано с тем, что вблизи друг от друга, как правило располагаются другие объекты (упаковки, штабеля, местные постройки и т. п.) сильно влияющие на результат. Поэтому особая точность в этих расчетах не важна, за исключением, возможно, стационарной установки.

Считается, что метод нельзя применять для оружия высотой менее 1 м. потому что тогда неизбежная шероховатость земли опровергает предположение, что земля ровная по сравнению с высотой оружия. Значения напряженности магнитного и электрического полей, влияющих на оружие (см. табл. 2.5) не действительны для *R* менее 10 м, что соответствует высоте оружия 1 м. Для оружия высотой 1 м и менее *R* принимается равным 10 м. Это значение может также использоваться в целом как «дефолтное» значение в предварительных оценках.

Считается, что магнитное поле возникает при протекании обратного тока молнии по вертикальному каналу разряда и его вектор имеет горизонтальное направление в соответствии с Законом Ампера:

$$H=I/\,2\pi R \qquad (2.1)$$

Максимальное электрическое поле на земле по существу вертикальное и возникает только перед импульсом обратного тока, в момент, когда нисходящий лидер молнии встречает отвечающую ленту с земли, завершая путь, по которому обратный ток будет течь. Предполагается, что соединение происходит при типичном высота 50 м, а также предполагается, что лидер несет заряд с линейной плотностью 10^{-3} кулон/м и движется со скоростью 10^{8} м/с. По оценкам, в отсутствие стримеров лидер на высоте 50 м будет производить поле напряженностью 0,36 х 10^{8} В/м над идеально ровной поверхностью под каналом лидера только часть процесса инициирования стримеров.

Электрическое поле в месте расположения ОВВТ будет усилено небольшими выступами на земле (так как земля вряд ли быть идеально плоским), пока оно не достигнет значения 3,0 х10^{6} В/м, что является пробоем воздуха на уровне земли.

Однако это значение не должно использоваться в определении ГЭМО потому что это является пробоем поле для воздуха на уровне земли. Соответствующее значение скорости изменения поля был рассчитан в предположении, что это поле изменяется за время, необходимое для развития встречного лидера. Соединение нисходящего и восходящего лидеров, происходит на высоте 50 м за время 0,5 мс, что дает скорость изменения напряженности электрического поля непосредственно под каналом встречи лидеров

6 x 10^{12} В/м/с. И напряженность электрического поля, и скорость его изменения уменьшаются с увеличением расстояния по горизонтали (*R*) от точки удара. Принимая во внимание высоту стыка 50 м и максимальную скорость изменения ток молнии 10^{11} А/с, окружающая ГЭМО на расстоянии *R* по горизонтали от канала молнии, где *R* не менее 10 м, будет соответствовать численным значениям, приведенным в табл. 2.5 [2.14].

Таблица 2.5 – Параметры ГЭМО в ближней зоне разряда [2.14]

Параметры	Обозначения, размерность	Значения
Максимум (горизонтального) Н-поля	Н, А/м	$3{,}2 \cdot 10^4$ / R
Скорость нарастания Н-поля	dH/dt, А/м/с	$1{,}6 \cdot 10^{10}$/ R
Максимум (вертикального) Е-поля	Е, В/м	$3 \cdot 10^6/(1+R^2/50^2)^{1/2}$
Скорость нарастания Е-поля	dE/dt, В/м/с	$6 \cdot 10^{12}/(1+R^2/50^2)^{1/2}$

Для оценки воздействия ближайшего разряда молнии на оружие, необходимо соблюдать соответствующие требования, которые должны включать грозовые переходные процессы и оценку взрывоопасности. Обычно методы расчета проникновения поля могут использоваться для установления внутренней ЭМО и, следовательно, для оценки наведенных переходных процессов. Если LHDA указывает, что наведенные эффекты оцениваются значительно ниже допустимого уровня, тогда обычно не нужно будет переходить к дальнейшему анализу или тестам на близкие разряды молнии. Если, с другой стороны, такая предварительная оценка прогнозирует высокие уровни переходных процессов, тогда потребуется дополнительные мероприятия.

Как и в случае оценки прямых воздействий молнии, необходимость тестирования и деталей этих испытаний должны быть подтверждены как для кратковременных, так и для взрывоопасных

факторов оценки. Когда необходимы испытания, они должны проводиться отдельно для обоих как *H*, так и *E* - полей.

Испытания на воздействие *H*-поля. В этом виде испытаний объект испытания подвергается воздействию магнитного поля требуемой формы. В общем, при испытаниях, возбуждающий ток с требуемыми параметрами, может течь в вертикальном стержне, представляющем канал молнии, расположенный на соответствующем расстоянии. Однако, это невозможно из-за сложности моделирования растекания натурного тока молнии. (При ударе молнии в землю ток распространяется радиально в ее толще, а при моделировании он должен вернуться к заземлению генератора импульсов тока, что в конечном итоге приведет к изменению распределения магнитного поля вокруг объекта испытания).

В этом случае используется метод испытания, приведенный на рис.2.54.

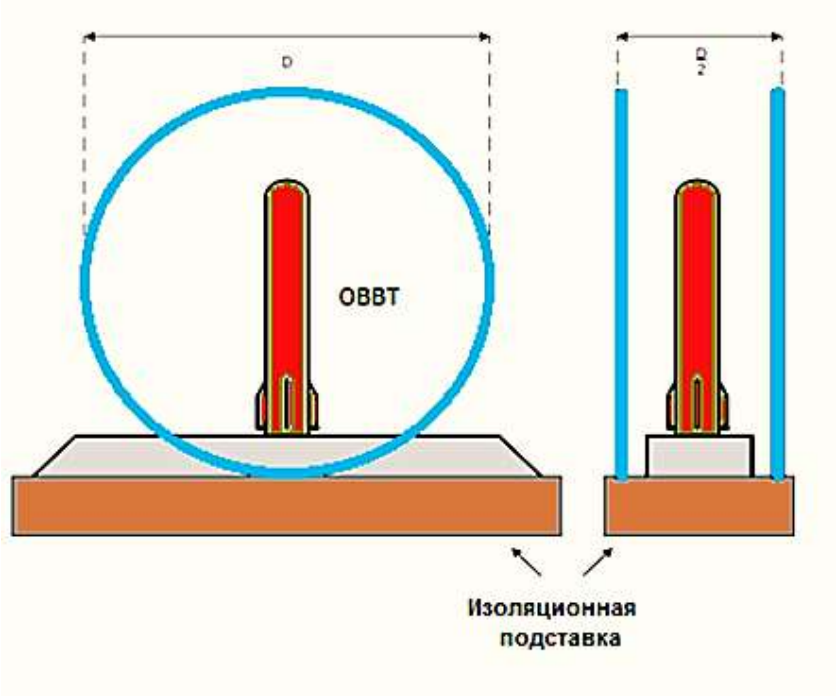


Рис. 2.54 – Метод испытания ОВВТ на воздействие магнитного поля ближнего разряда молнии [2.1]

В этом случае объект устанавливается на непроводящей (диэлектрической) платформе и размещается посередине точка М между двумя круговыми коаксиальными проводящими контурами катушки Гельмгольца диаметр *D* (метры), при этом осевое расстояние между петлями равно *D/2*. С участием эти пропорции магнитного поля из-за тока в петлях (в отсутствие оружия) не сильно зависит от

положения вдоль оси по обе стороны от М. Петли соединены последовательно, так что они несут одинаковый ток (i), и петля диаметр должен быть выбран так, чтобы обеспечить достаточный зазор между петлями объекта испытания. Магнитное поле в точке М направлено вдоль оси петель и имеет величину:

$$H = 1{,}43\ i\ /D,\ А\ /\ м \qquad (2.2)$$

По сравнению с полем, создаваемым током, протекающим в вертикальный канал, расположенный на расстоянии *R* по горизонтали, видно, что для создания В том же поле току контура необходимо присвоить значение, равное каналу молнии ток, умноженный на коэффициент масштабирования 0,11 x *D/R*.

Петли получают питание от соответствующего генератора переходных процессов. Возврат проводники к генератору должны быть тщательно спроектированы, чтобы минимизировать их индуктивность. и избегать полей рассеяния, которые могут искажать магнитное поле, приложенное к оружию расположен внутри катушек Гельмгольца.

Испытания на воздействия электрического поля. Внутренние переходные процессы при воздействии внешних электрических полей вряд ли будут такими значительными, как вызванные внешними магнитными полями. Это связано с высокой степенью экранирования корпусом ОВВТ. Даже такие материалы, как CFC, с низким коэффициентом магнитного экранирования обеспечивает разумное защиту от воздействия электрического поля, и единственные пути существенного проникновения электрического поля происходит через электрические неоднородности корпуса ОВВТ (отверстия, лючки, стыковочные узлы и т.п.) или через элементы, выполненные из плохо проводящих материалов, таких как композит из стекловолокна. Поэтому вполне возможно, что LHDA может показать, что необходимы только испытания по воздействию магнитного поля, но это необходимо обосновать.

Высокий уровень напряженности электрического поля может вызвать коронный разряд на острых краях, законцовках или выступах, которые формируют радиочастотное (РЧ) излучение. Это эффект зависит от напряженности поля, но большинство других эффектов зависит от скорости изменения электрического поля. В

[2.14] указано, что окружающая среда в точке удара о землю просто перед ударом предполагается наличие вертикального электрического поля $3x10^6$ В/м со скоростью изменения электрического поля 6 x 10^{12} В / м / с.

Из табл. 2.5 значение E, когда R составляет от 10 до 20 метров, уменьшается от 2,94 до 2,79 x 10^6 В/м, что для всех практических целей составляет 3 x 10^6 В/м. Обеспечить воздействие на испытуемый объект такой напряженности электрического поле без прямого разряда сложно или практически невозможно. Следовательно, полевые испытания E либо нецелесообразны, либо практически нереализуемые. Как отмечалось выше, они не совсем необходимо, так как единственный производимый эффект - это коронирование на острых кромках, которое имеет второстепенное значение. Следовательно, в этих случаях необходимо только возбуждение dE / dt.

На рис. 2.55 показано метод испытания, который может дать примерно 6 x 10^{12} В/м/с на испытуемом объекте в 4 метрах от высоковольтного электрода.

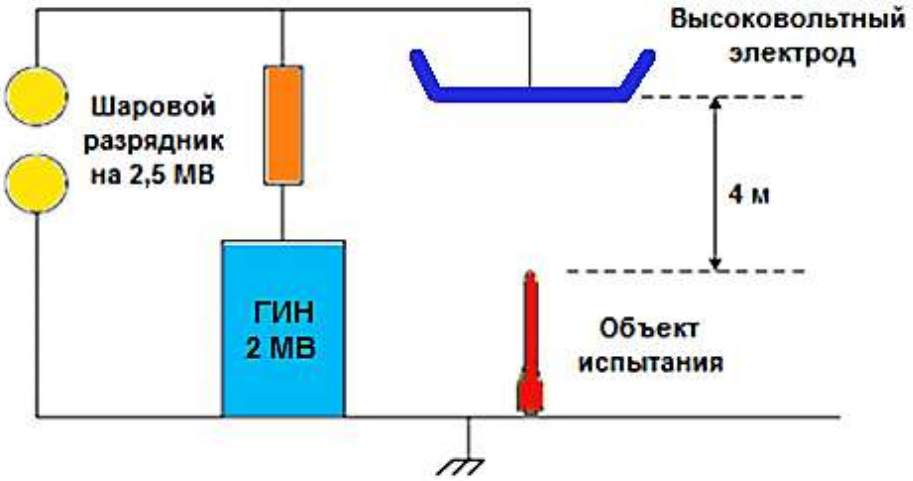


Рис. 2.55 – Метод испытания на воздействие изменяющегося во времени напряженности электрического поля [2.1]

Фактическое значение *dE / dt*, которое возникнет, будет зависеть от геометрии объекта испытаний и напряжения, при котором калибровочные сферы настроены на перекрытие вместе с пиковым напряжением, достигаемым от генератора. Генератор импульсных напряжений на 2 МВ обычно достигает пика 2,5 МВ, но, если это не

так, зазор между шаровым разрядником нужно установить на меньшее значение, зазор должен перекрываться примерно за 0,1 мкс.

2.3.2.4 Опыт наземных испытаний в целом объектов ракетной техники воздушного базирования на молниестойкость

Ниже, в качестве примера, описывается подход, приведенный в работе [2.19], которого придерживаются испытательные центры Министерства обороны Франции для оценки и квалификации ракеты воздушного базирования на соответствие требованиям молниестойкости заложенные в международных нормативных документах[2].

Цель данных испытаний является квалификация данного типа ракет в отношении угрозы прямого и косвенного воздействия на них молнии с целью обеспечения безопасности их транспортировки и эксплуатации на самолете.

Что касается испытаний оборудования ракеты, то первый шаг - это квалификация ракеты самой по себе. Далее, при необходимости, на втором этапе, ракета испытывается вместе с самолетом. При этом, также необходимы испытания как на прямые, так и косвенные эффекты воздействия молнии. Также, в обязательном порядке, следует учитывать, что эта системы оснащены электровзрывными устройствами.

Основная цель процесса квалификации по требованиям молниезащиты для ракета данного типа заключается в подтверждении, что эксплуатация ракеты может быть безопасной как во время, так и после удара молнии. Другими словами, боеприпасы не должны подвергать опасности персонал или несущий ракету самолет при указанном воздействия, или впоследствии во время обращения и утилизация объекта. Регламент процесса обеспечения молниезащиты боеприпасов по требованиям НАТО определен в STANAG 4327.

Реализация плана молниезащиты – это первый шаг процесса квалификации ракеты. Он должен выполняться в три ключевых этапа: *ракета, окружающая среда и зонирование*.

---

[2] Stanag 4327, Stanag 4236, MIL STD 464C, EUROCAE ED-84, RTCA / DO-160G.

Перечень характеристик ракеты, которую необходимо учитывать. Эта часть методики испытаний представляет собой техническое описание состав боеприпасов и включает определение конструкции и ее важнейших механических частей, список критическое электронное оборудование и анализ возможные электрические риски (например, синфазные напряжения, наведенные токи в кабелях или перекрытие).

Определение среды. В то время как среда HIRF для военной техники определяется особо, грозовая электромагнитная обстановка для военной техники регламентируется такой же, как и для гражданской. Эта среда описан в военных стандартах, таких как STANAG 4236 или MIL STD 464, а также гражданских стандартах, таких как EUROCAE ED-84. Соответствующая среда должны быть указана для каждой фазы эксплуатации (например, хранение, обработка и транспортировка, резервирование, авиаперевозка, запуск и свободный полет).

Зонирование. Цель зонирования - оценить разные сценарии удара молний вместе с уровнем угрозы с которым может столкнуться ракета во время конкретных этапов эксплуатации. Например, при воздушной транспортировке ракеты, можно представить три основных варианта молниевых воздействий: от носовой части к хвосту, от хвоста к носовой части или поперечное. Однако, эти три варианта актуальны не для каждого вида ракет. Действительно, носовая часть или хвост ракеты могут быть защищен крылом или фюзеляжем самолета. В этом случае в план испытаний будут включены только два варианта воздействия молнии. В последствии местоположение ракеты будет использоваться для определения уровень молниевой угрозы, с которой можно столкнуться. Например, ракета размещена под фюзеляжем самолета, который обеспечивает лучшую защищаемую зону, чем под крыльями, где может произойти прямой удар молнии.

Зная характеристики ракеты, указанное окружение и зонирование, возможно определить квалификационный план испытаний, подходящий для ракеты.

STANAG 4327 определяет набор тестов, которые можно используется для квалификации боеприпасов. У каждого из у них есть определенная цель и соответствующий тест-процедура. Испытательные центры Министерства обороны Франции

в основном применять процедуры, описанные в этом стандарте, но иногда предлагают и иной подход.

Испытание высоким напряжением объекта в целом.

Цель данного вида испытаний – определить точки крепления канала молнии на ракете и оценить возможность возникновения пробоя диэлектрического обтекателя ракеты.

Результаты испытаний используются для определения зоны 1А или 1В и абсолютно необходимы, если зонирование ракеты не известно.

При проведении данного вида испытаний ракета должна быть помещена на диэлектрическую испытательную площадку и должна быть изолирована от земли. Электрод, подключенный к генератору следует выбрать в соответствии с окружающей средой грозового электрического поля. Например, плоский электрод будет используется для моделирования условий вертикального поля (см. рис 2.56).

Для этого вида испытаний, согласно ED 84, могут быть использованы разные формы прикладываемых волн напряжения. Однако наиболее адаптирован для этих целей двухэкспоненциальный импульс напряжения 250/2500 мкс положительной и отрицательной полярности, поскольку исследуется возможность пробоя диэлектрического обтекателя ракеты.

Помимо измерений напряжения генератора и современных средств диагностики, в основное регистрирующее оборудование включают видеокамеры для определения точки входа канала разряда.

Рис. 2. 56 - Пример установки для испытания высоким напряжением

Испытания оборудования объекта. В зависимости от результатов испытаний на молниезащиту объекта в целом, может возникнуть необходимость проведения испытаний на уровне оборудования, порядок которых определен в разделе 22 DO 160.

Испытания боеприпаса в целом на воздействие высокоскоростного изменения ∂i/dt.

Этот вид испытаний в основном используется для оценки поведение критических электронных устройств (например, элементов электровзрывного устройства) или для определения фактического переходного критического уровня восприятия оборудования. Его также можно применить к эксплуатируемой ракете, чтобы оценить ее поведение после удара молнии, который должен быть репрезентативным при более пятидесяти процентов ударов молний.

Этот вид испытаний заключается в подаче пониженного тока форма волны (например, 50 кА), имеющая такую же частотное содержание как форма волны A или D, как определено в ED 84. Измерения тока, напряжения и выделяемой энергии выполняются в системе, а результаты далее экстраполируются на указанную в нормативных документах внешнюю среду.

Чтобы оценить точность экстраполяции, выполнят ряд инжекций для разных уровней (20 кА, 30кА, 50кА).

STANAG 4327 определяет установку испытуемой ракеты на имитационном крыле самолета-носителя. Французский тест-центр МО Франции проводят этот вид испытаний на всем боеприпасе, базирующемся на реальном самолете, а также боеприпас сам по себе (имитирующий полет в свободном пространстве после запуска). Главный проблемой данного вида испытания (не использовать смоделированную испытательную установку для интерфейса между самолетом и оружием) заключается в том, что достаточно сложно получить точную электрическую имитацию реального самолета. Более того, в предлагаемом методе уровни наводок на реальные связи могут быть надежно зафиксированы. Таким образом можно постоянно контролировать

порог по сохранению уровня работоспособности оборудования испытуемых боеприпасов.

Для токовых испытаний объекта требуется коаксиальная система соединение ракеты с генератором (см. рис. 2.57 и 2.58), чтобы обеспечить свободное пространство конфигурации растекания токов по объекту.

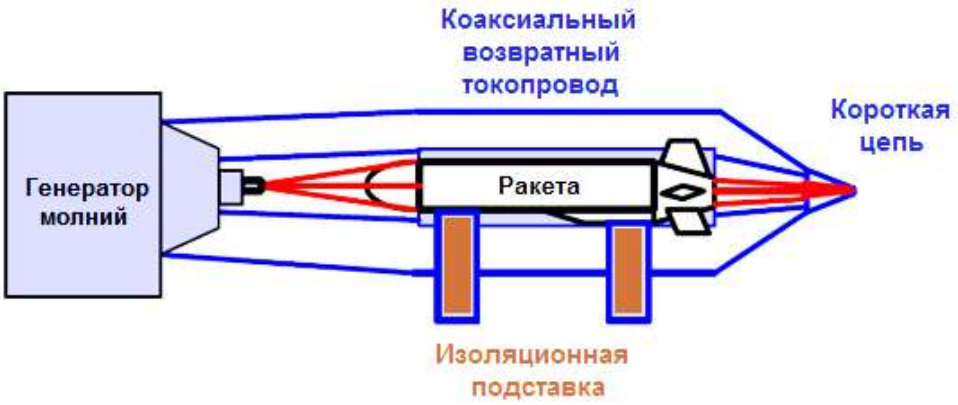


Рис. 2.57 – Схема установки для испытаний ракеты без самолета с большой скоростью изменения *∂i/dt*

Рис. 2.58 - Внешний вид установки с реальной ракетой, испытуемой без самолета

Коаксиальный возврат фактически обеспечивает достижение двух целей.

Во-первых, это снижает общий импеданс испытательной установки, что позволяет настроить ее таким образом, чтобы время нарастания воздействующего фактора было как можно меньше.

Во-вторых, что наиболее важно, поверхностное распределение тока по обшивке ракеты будет соответствовать реальному распределению в свободном пространстве. Этим достигается требуемый, близкий к реальному уровень воздействия на оборудование. Без такой конфигурации установки уровень воздействия на некоторые части ракеты может быть выше или ниже реального.

Следовательно, без коаксиальной системы невозможно произвести оценку уровня переходных процессов, поведения и фактической реакции элементов, систем и блоков оборудования ракеты в аспектах молниестойкости.

Чтобы определить положение этого коаксиального возврата, вычисление выполняется для сравнения уровня поля внешней поверхности в свободном пространстве с уровнем внешние поверхностные поля на земле в пределах испытательной установки.

STANAG 4327 определяет максимум 20% разницы между двумя внешними поверхностными полями что является целью испытаний для сложной геометрии объекта. Для изолированной ракеты требуется максимум 10% этого расхождения.

Метрологическое обеспечение испытаний. Во время проведения испытаний обычно проводят следующие измерения:

- подаваемый ток,
- синфазное напряжение и / или наведенная энергия КИПА,
- внешние поля,
- внутренние поля,
- уровни напряжений и токов на кабелях или жгутах (U_{xx}, $I_{кз}$),
- фиксация искровых пробоев и перекрытий.

В этих условия могут также выполняться исследования последствий воздействия *H*-полей. Поскольку энергия формы *H*-волны выше, чем энергия сигнала тока 50 кА, это инжекция считается более полезной для оценки функциональных аспектов, а не аспектов безопасности. В любом случае это позволит оценить формы волн и уровни индуцированных переходных процессов на кабелях

при воздействии множественной вспышки среды, определенной в ED 84. Эти результаты могут затем сравниваться с уровнями восприимчивости оборудования, которое было протестировано и использоваться для определения запаса по уровням сохранения работоспособности. Для не испытанного оборудование, результаты этого вида испытаний можно использовать для прогнозирования угроз выхода его из строя.

Испытание оборудования боеприпасов.

Основная проблема для определения молниестойкости оборудования боеприпасов заключается в том, что существующие технологии использования генераторов искусственных молний не позволяют проводить оценки уровней молниестойкости ракет по сравнению с реальной степенью угрозы грозовых разрушений от множественного удара.

Кроме того, следует иметь в виду, что воздушный носитель транспортирует ракету, которая непосредственно связана с оборудованием самолета. Таким образом, производитель самолета должен указывать фактические переходные уровни, с которыми сталкивается это конкретное оборудование при молниевом воздействии.

Используя эти уровни, можно проводить тесты по выводам и выводам согласно разделу 22 DO 160 или аналогичных военных стандартов. Эти испытания в основном связаны с молниестойкостью электровзрывных устройств. В зависимости от мероприятий молниезащиты, также замеры необходимы и на другом критическом в этих аспектах оборудовании. Такими испытаниями нельзя пренебрегать, так как это единственная возможность оценить поведение ракеты, при угрозах множественных вспышек и множественных разрядов молний.

Испытания на физическое повреждение сильными токами.

Этот вид испытаний (рис. 2.59) состоит из введения тока полного уровня в ракету и преследует следующие цели:

• Оценку механических повреждений конструкции ракеты;

• Оценку возможности возникновения искрения в области, где ожидается образование паров топлива;

• Оценка возникающих температур в электровзрывных устройствах.

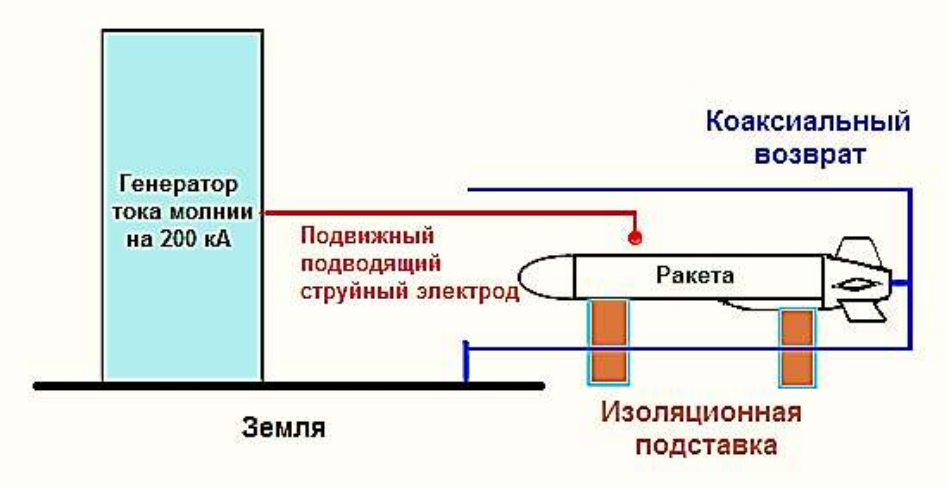


Рис. 2.59 - Установка для испытаний на физическое повреждение сильными токами.

Методика проведения молниевых испытаний этого вида молнии непосредственно связана с определением зон воздействия канала молнии на поверхность ракеты. Представляют интерес расположение многие точек инъекции тока молнии, но, вариант подачи тока от носовой части к хвосту должен быть оценен обязательно.

Используемая испытательная установка (см. рис. 2.59) аналогична коаксиальный испытательной установки с большой скоростью изменения $\partial i/dt$, кроме того факта, что открытая дуга должна использоваться на основных точках крепления канала молнии.

В дополнение к инжектируемым токам, как правило проводят измерения уровней токов, наведенных на внутренних цепях ракеты. Эти измерения используются для оценок ожидаемых уровней, которые квалифицированы по условиям сохранения работоспособности единиц оборудования.

Помимо безопасности электровзрывных устройств, термодинамические разрушающие эффекты удара молнии также могут поставить под угрозу безопасность полета ракеты. На самом деле, при ударе молнии дуги могут вызывать повреждения механических частей ракеты, участвующие в обеспечении летной годность ракеты или самолета. Например, в аспектах молниестойкости ракеты необходимо подчеркнуть тот факт, что недопустимы любые механические повреждения обтекателя (см. рис. 2.60) или стабилизаторов ракеты.

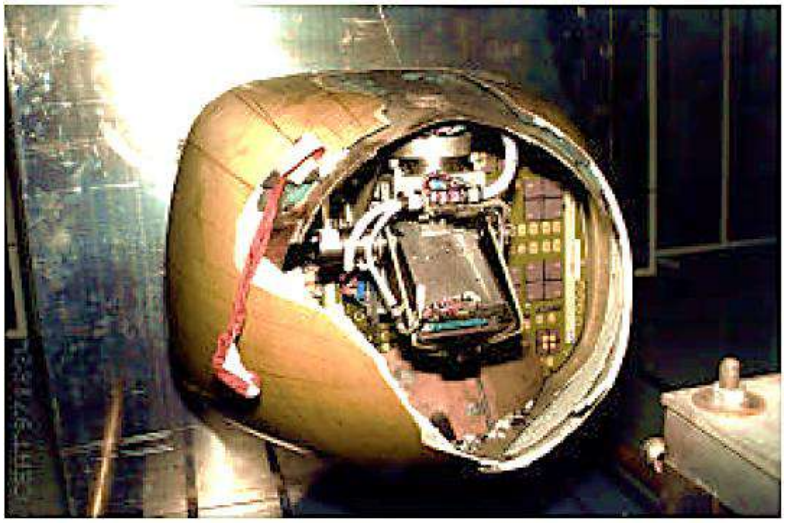


Рис. 2.60 – Последствия повреждение незащищенного обтекателя объекта испытаний. (Такие повреждения могут поставить под угрозу способность объекта к эксплуатации).

Кроме того, сильный ток может вызвать искры с достаточно энергии для «сваривания» отдельных механических частей ракеты, которые должны сохранять подвижность в процессе эксплуатации (например, рули высоты). Возможность последствия этих «свариваний» должны быть приняты во внимание как критерий прохождения/непрохождения этих испытаний.

В конце испытаний объект должны пройти полную тщательную оценку по параметрам определения соответствия его конструкции. Таким образом, помимо функциональных проверок электронного оборудования ракеты по параметрам молниестойкости, также должна проводиться оценка термодинамической стойкости обшивки ракеты к ударам молнии.

Тестовый объект. Для каждого из предыдущих видов испытаний тестируемый объект должна быть полностью репрезентативная для эксплуатации. Если существуют варианты со значительными структурными или электронными расхождения, могут потребоваться испытания для каждого варианта. Очевидно, при испытаниях ракета должна быть оснащена инертной бомбой. До и после каждого вида испытания для оценки работоспособность ракеты должен быть выполнен функциональный тест.

В зависимости от цели испытания во время тестирования ракета может быть во включенном или отключенном состоянии. Однако,

результаты недавних испытаний, проводимых кампанией CEAT на самолетах, показали, что индуцированные молнией переходные процессы во внутренних цепях самолета, полученные при отключенных системах, существенно отличаются, от варианта работающих в штатном режиме систем.

Функциональные испытания. В зависимости от результатов испытаний, их оценочные результаты могут быть признаны как функциональные испытания.

Эти инжекции потребуют проведения полных операционных проверок ракеты на специальном стенде для проверки работоспособности систем во время или после испытаний. Даже если эта функциональная оценка будет исчерпывающий, его продолжительность должна быть выдержана по всем параметрам испытаний.

Электровзрывные устройства. При испытаниях электровзрывных устройств по французским требованиям на воздействие HERO / LEMP натурные электровзрывные устройства заменяются на инертные, оснащенные датчиком для измерения либо межконтактной индуцированной энергии или межконтактного напряжения.

В связи с чем, ракета последовательно должна оснащаться оптоволоконными датчиками и коаксиальными зондами для точечных измерений и индивидуальных эффектов на электровзрывных устройствах в соответствии с требованиями STANAG 4327.

Измерения межконтактных эффектов. Целью этих испытаний является измерение тепловой вариации (эффекта выделения джоулива тепла) в перемычках электровзрывных устройств, возникающего в результате межконтактного перенапряжения на кабелях связи.

Боеприпас должен быть снабжен оптоволокном, датчики которого предназначены для измерения температуры на перемычках электровзрывных устройств, в процессе молниевого воздействия. Благодаря предварительным калибровки, этот нагрев преобразуется в индуцированный эквивалент энергии для сравнения с максимальным допустимым ее уровнем (без порога срабатывания).

Измерения индивидуальных эффектов. Цель этого вида испытаний - измерить пик напряжение, возникающего в результате

межконтурных эффектов между перемычками электровзрывных устройств и их металлическими корпусами. Таким образом, ракета оснащается датчиками напряжения для сравнения измеренного уровня напряжения при молниевом воздействии с предельно допустимым.

Подводя итог приведенного выше, следует иметь в виду, что квалификационный процесс ракеты прежде всего тесно связан с оценкой поведения электровзрывных устройств в отношении индуцированных в их цепях напряжений и токов непосредственными ударами в ракету или близкими разрядами молнии.

2.3.2.5 Опыт испытаний систем подвижного грунтового ракетного комплекса на молниестойкость

В данном разделе детально уделено внимание на проведение испытаний на молниестойкость непосредственно внутренних систем подвижного грунтового ракетного комплекса.

Краткая характеристика комплекса. В состав комплекса входят самоходная пусковая установка (СПУ) на гусеничном ходу с ракетой в транспортно-пусковом контейнере ТПК и машина управления (МУ), в которой размещается проверочно-пусковая аппаратура. При подготовке к пуску МУ располагается на расстоянии 80-100 м от СПУ и соединяется с СПУ проводной кабельной линией. Общий вид СПУ показан на рис.2.61.

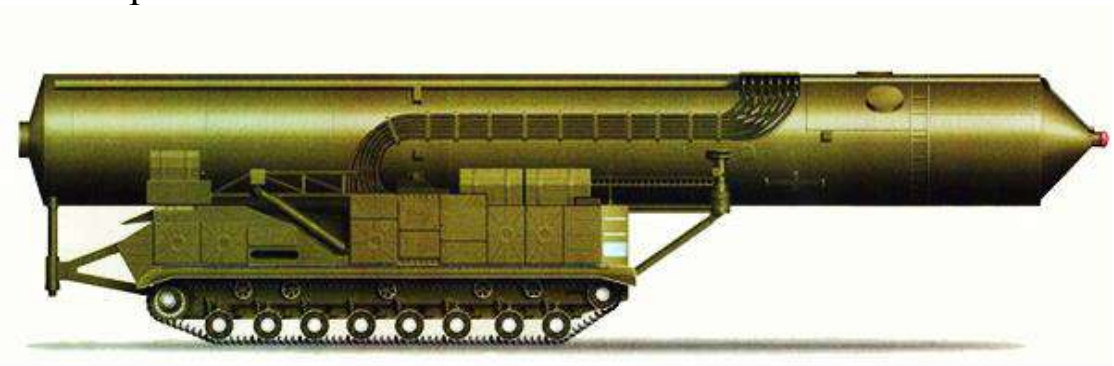


Рис. 2.61 - – Самоходная пусковая установка с ракетой в ТПК

Транспортно-пусковой контейнер из алюминиевого сплава с системой термостатирования. Передний торец контейнера закрыт крышкой, сбрасываемой перед пуском ракеты. На днище ТПК

установлен пороховой аккумулятор давления, служащий для выбрасывания ракеты из контейнера. Длина ТПК – 20 м, диаметр – 2 м.

Конструкция ракеты – двухступенчатая гибридная, с последовательным расположением ступеней и головной части.

Первая ступень с твердотопливным ракетным двигателем, вторая ступень с жидкостным ракетным двигателем. Продольное крепление ракеты в ТПК опорной плите контейнера производится с помощью разрывных болтов, установленных на нижнем торцевом шпангоуте двигателя первой ступени.

Старт ракеты из транспортно-пускового контейнера (ТПК) осуществляется с помощью порохового аккумулятора давления (ПАД), который размещается в придонной части ТПК. После команды «Пуск» подрывается удлинённый кумулятивный заряд крышки ТПК, запускается пороховой двигатель увода крышки и крышка отделяется от контейнера. После разделения блока разъёмов контейнера и разрыва болтов крепления ракеты в ТПК запускается ПАД и при достижении в подракетном объёме давления менее 10^3 кН/м^2 ракета начинает движение. Форма порохового заряда ПАД выбрана такой, что указанное давление в подракетном объёме в процессе движения ракеты в контейнере поддерживается постоянным. В момент выхода из ТПК ракета достигает скорости порядка десятков м/с. На высоте 10-20 м над срезом контейнера происходит запуск маршевого РДТТ первой ступени. Одновременно осуществляется отделение опорных колец и разделение блока разъёмов ракеты.

Требования по молниезащите. При формировании требований по молниезащите комплекса рассматривались следующие два возможных варианта построения молниезащиты:

1) полная защита всей территории, занимаемой комплексом, а также всех его устройств и элементов от прямого удара молнии при помощи многократных стержневых молниеотводов, создающих единую зону защиты на всей площади комплекса;

2) допущение удара молнии в отдельные элементы комплекса с тем, чтобы молниезащитные мероприятия были направлены на предотвращение недопустимых аварий, оговоренных в ТЗ.

В качестве основного варианта молниезащиты был принят вариант, допускающий прямой удар молнии в ТПК с ракетой,

находящийся на СПУ, на марше и при подготовке к пуску на стартовой позиции. При этом, в соответствии с требованиями технического задания, должна быть полностью устранена возможность возникновения недопустимых аварий: самопроизвольного запуска, взрыва, возгорания топлива ракетных двигателей.

Выбор способа экспериментальной оценки молниезащиты. В общем случае поражение молнией самого объекта или его коммуникаций вызывает целый ряд опасных воздействий на элементы и системы комплекса:

1) Соприкосновение канала молнии с металлическими проводниками (оболочками) и протекание по ним тока молнии сопровождается выделением тепла, разогревом, оплавлением и выгоранием материала. Это действие увеличивается с ростом тока и числа компонент молнии.

2) Протекание тока молнии по экранам и оболочкам кабелей вызывает появление разности потенциалов между оболочками и жилами кабелей, а также между отдельными жилами в случае их геометрической и электрической несимметрии. Эти разности потенциалов тем больше, чем больше ток молнии, длина и погонное сопротивление оболочки (экрана).

3) Электростатические наводки на проводе и элементах объекта могут вызвать появление значительных потенциалов на отдельных частях объекта и привести к искрообразованию, способному стать причиной возгорания и взрыва.

4) Электромагнитные наводки в контурах, образованных проводами или другими элементами объекта за счет сильного магнитного поля тока молнии, также могут привести к опасному искрообразованию.

5) В случае удара молнии в коммуникации комплекса (в кабели питания, связи, АФУ и т.п.), при перекрытии на коммуникации с молниеотводов или их заземлителей, а также при электростатических наводках на эти коммуникации высокие потенциалы по проводам будут переданы внутрь объекта и могут стать причиной аварии. Верхний предел таких перенапряжений определяется электрической прочностью подходящих линий (собственной изоляции кабелей, изоляции между ножками и корпусом штыревых разъемов и т.п.).

Анализ конструктивных особенностей комплекса, с точки зрения возможности недопустимой аварии при прямом ударе молнии, позволяет сделать следующие выводы:

1. Активные вещества, являющиеся источниками недопустимых аварий, воспламеняются при срабатывании пиротехнических средств, и что именно ложные срабатывания пиротехники при поражении молнией элементов комплекса является непосредственной причиной недопустимых аварий.

2. Все пиротехнические средства расположены внутри ТПК и практически защищены от непосредственного контакта с каналом молнии. Поэтому их ложные срабатывания будут вызываться только вторичными воздействиями молнии, которые могут привести или к протеканию импульсных токов наводок по запальным мостикам, или к появлению опасных перенапряжений на изоляции пиросредств.

3. Вопрос о возможности ложных срабатываний пиросредств и вызываемых ими недопустимых аварий однозначно решается соотношением величин возможных наводок, воздействующих на пиросредства при поражении молнией стартовой пусковой установки, и характеристиками пиросредств, т.е. их способностью выдерживать без срабатывания подобные воздействия.

В соответствии с вышеизложенным дальнейшая работа проводилась по двум направлениям:

1) Определение импульсных характеристик пиросредств, т.е. определение величин импульсных токов через запальные мостики и напряжений между мостиками и корпусом пиросредства, которые могут вызвать их срабатывание при малых временах воздействия, характерных для молнии.

2) Определение величин наводок, которые будут воздействовать на пиросредства при поражении молнией стартовых пусковых установок комплекса.

Импульсные испытания пиротехнических средств. В паспортные данные пиросредств различного назначения входят следующие электрические величины:

– активное сопротивление запальных мостиков (от 1 до 4 Ом);

– ток срабатывания (и время срабатывания при этом токе);

– безопасный ток (и гарантированное время протекания этого тока без срабатывания пиросредства);

– сопротивление изоляции между мостиком и корпусом.

Все эти величины определены для длительных воздействий:

– ток срабатывания протекает по запальным мостикам от момента подключения пиросредства к бортовой сети СПУ или ракеты до срабатывания;

– безопасный ток протекает по запальным мостикам при измерении их сопротивления, проверки целостности и т.п.;

– испытательное напряжение при измерении сопротивления изоляции действует десятки секунд.

Токовые испытания проводились путем подачи на параллельно соединенные запальные мостики пиросредства прямоугольных импульсов тока (длительность импульса составляла 2÷50 мксек, длительность фронта и спада порядка 0,5÷1 мксек).

Для определения импульсной прочности изоляции пиросредств применялись импульсы напряжения с фронтом 2÷8 мксек и скоростью спада, соответствующей скорости спада напряжения у реальной молнии.

Были испытаны 3 типа пиросредств: электровоспламенители (ЭВ), электродетонаторы (ЭД) и пироболты (ПБ). Результаты испытаний приведены в табл. 2.5 – 2.7.

Таблица 2.5 – Результаты испытаний пиросредств импульсными токами

Тип ПС	Средний ток срабатывания (А) при длительности импульса			Энергия срабатывания, Дж		σ
	2 мкс	15 мкс	50 мкс	Средняя	Минимальная	
ЭВ	117	50	14	$1{,}55\cdot10^{-2}$	$1{,}41\cdot10^{-2}$	10,2
ЭД	140	45	22	$1{,}408\cdot10^{-2}$	$0{,}75\cdot10^{-2}$	9,3
ПБ	47	20	9	$0{,}966\cdot10^{-2}$	$0{,}86\cdot10^{-2}$	8,4

Таблица 2.6 – Результаты испытаний изоляции пиросредств импульсным напряжением

Тип ПС	Среднее напряжение пробоя изоляции, кВ	Минимальное напряжение пробоя изоляции, кВ	% пробоев внутренней изоляции, приводящих к срабатыванию
ЭВ	5,0	4,5	100
ЭД	4,55	3,9	100
ПБ	4,20	3,5	30

Таблица 2.7 – Определение минимального тока искрового пробоя внутренней изоляции электровоспламенителя, приводящее к его срабатыванию

Ток искрового канала, мА	Реакция пировоспламенителя
500	сработал
200	сработал
50	сработал
15	сработал
8	не сработал

Измерение электромагнитных наводок в цепях пиросредств и аппаратуры системы дистанционного управления и контроля. Растекание токов молнии по корпусу ТПК или по оболочкам связанных с ним кабелей может явиться причиной электромагнитных наводок в цепях управления. При прочих равных условиях величина наведенных напряжений определяется крутизной и амплитудой тока молнии.

При проведении испытаний предполагалось, что основные процессы, определяющие величину электромагнитных наводок, являются линейными и допускают пропорциональный пересчет.

В данной работе основные измерения были выполнены с помощью разрядного контура, возбуждающего в нагрузке апериодический или колебательный импульс тока амплитудой до 20 кА и эквивалентной крутизной на фронте – 2 кА/мкс. Подача импульса возбуждения от генератора тока на объект испытания проводилась по схеме «носовая часть крышки ТПК – днище ТПК». В качестве обратного токопровода использовался металлический пол. Размещение оборудования на испытательном стенде показано на рис.2.62.

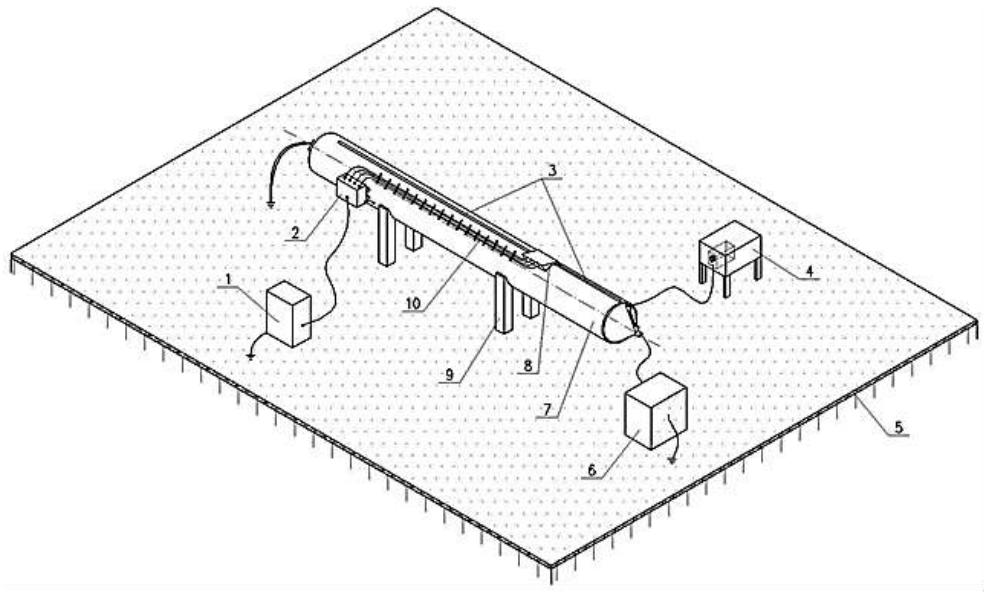


Рис. 2.62 – Испытательная установка:

1 – макет блока СДУК МУ, 2 – макет блока СДУК СПУ,
3 – кабельный желоб, 4 – экранированная кабина с измерительной аппаратурой,
5 – металлический пол, 6 – генератор импульсного тока,
7 – транспортно-пусковой контейнер, 8 – плата разъемов ТПК,
9 – изолирующая подставка,10 – кабели связи ТПК с РКН с аппаратурой СДУК СПУ

Так как в момент разряда различные точки корпуса ТПК находятся под высоким напряжением (до 30 кВ) относительно земли вся измерительная аппаратура вместе с экспериментатором изолировалась от земли и жестко связывалась с той точкой корпуса, относительно которой проводились измерения. Длина кабелей измерительных цепей (рк-50) не превышала 4 м, а входная емкость цепи – 100 пФ.

Для синхронизации измерительной аппаратуры с высоковольтным блоком в экспериментах использовалась оптическая связь, выполненная на фотоумножителе.

Блок-схема синхронизации показана на рис. 2.63.

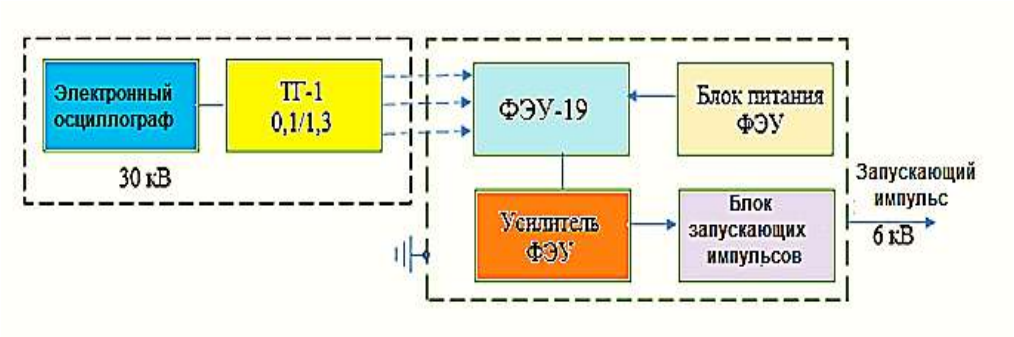


Рис. 2.63 – Схема синхронизации

Пуск схемы осуществляется экспериментатором, замыкающим пусковую кнопку осциллографа. Одновременно с началом работы осциллографа поджигался вспомогательный тиратрон (ТГ-0,1/1,3), находящийся под высоким потенциалом вместе с измерительной аппаратурой. Излучение газа в колбе тиратрона фотоумножителем (ФЭУ-19), установленном на земле. Импульс с выхода фотоумножителя вводился в блок запуска разрядного контура, формирующего импульс амплитудой 6 кВ, необходимый для поджига искрового разрядника.

Перед каждой серией опытов проводились контрольные измерения наводок в кабелях осциллографа. Суммарная погрешность измерения индуцированных напряжений в цепях управления исследуемого объекта не превышала 10%, чувствительность схемы не ниже 1 В.

В процессе работы измерялись напряжения между отдельными жилами кабелей (разомкнутыми и замкнутыми на эквивалентное сопротивление 4 Ом) и на жилах относительно корпуса ТПК, в той его точке, в которой расположен элемент, подключаемый к этим жилам. В каждом замере снималось не менее трех осциллограмм, по которым вычислялось среднее значение.

Все измерения были проведены на габаритном макете ТПК. Регистрировались напряжения наводок в местах установки пиротехнических средств в отдельных цепях макетов аппаратуры системы дистанционного управления и контроля (СДУК).

Макет входного блока аппаратуры СДУК СПУ устанавливался непосредственно на металлическое основание ТПК. Кабель связи, соединенный с блоком СДУК СПУ, произвольно прокладывался по металлическому полу высоковольтного зала и вторым концом

присоединялся к блоку СДУК МУ, моделирующему аппаратуру машины управления. Применялись кабели длиной 50, 125, 250 м.
В работе проведено две серии экспериментов: в первой наведенные напряжения измерялись на макете ТПК без присоединения наружных кабелей; во второй – был присоединен кабель К4.

Результаты измерений. Основные измерения, выполненные при воздействии на макет импульса апериодического тока амплитудой 8 кА, средней крутизной фронта 4 кА/мкс и длительностью на половине амплитудного значения 51 мкс .

Эксперименты показали, что основным источником перенапряжений является индуктивная связь между корпусом, по которому распространяется ток разряда, и жилами кабелей.

Поскольку кабели проложены или внутри металлического ТПК или в металлических (алюминиевых) коробах по внешней поверхности ТПК, ожидалось, что основной вклад в наведенные напряжения буду давать внешние кабели, соединяющие ТПК с аппаратурой управления и контроля установленной на СПУ.

Для проверки этого предположения проведены измерения наведенных напряжений между корпусом и жилами кабелей в различных точках ТПК при отключенных внешних кабелях. Результаты измерения приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 – Результаты измерения наведенных напряжений между корпусом и жилами кабелей

Точка измерения	Внешние кабели отключены, В	Внешние кабели включены, В
Пиросредства инициирования ПАД	4÷7	81÷86
Разрывные болты крепления ракеты в ТПК	3÷5	80÷82
Пиросредства толкателей отделения платы бортовых разъемов от разъемов ТПК от ракеты	< 2	74÷79
Пиросредства отсоединения крышки ТПК	8÷14	85÷91
Пиросредства инициирования двигателей увода крышки ТПК	47÷55	125÷132

Из табл. 2.8 видно, что значительные наводки были отмечены только в разъеме пиросредств и крышки ТПК, т.е. в тех местах корпуса ТПК, где плотности тока и электромагнитные поля наиболее велики. В остальных цепях напряжения не превышают 10 В.

Присоединение наружных кабелей (ТПК – блок СДУК СПУ) резко увеличивает наведенные напряжения. В отдельных цепях они возрастают более, чем на порядок величин.

Напряжения между отдельными жилами определяются при прочих равных условиях качеством изготовления кабельного жгута. Если шаг транспортирования жил в жгуте невелик и на используемых в макете отрезках кабеля все жилы находятся в среднем в одинаковых условиях, трудно ждать больших наведенных напряжений между жилами, особенно когда они замкнуты на низкоомную нагрузку.

В табл. 2.9 приведены результаты измерений наведенных напряжений между жилами в различных точках макета ТПК в режиме «холостого хода» (жилы разомкнуты) и при эквивалентной нагрузке Rэ = 4 Ом.

Таблица 2.9 - Результаты измерений наведенных напряжений между жилами

Точка измерения	При х.х. между клеммами разъема, В			При $R_э$=4 Ом между клеммами разъема, В		
	1–4	1–2	1–3	1–4	1–2	1–3
Пиросредства инициирования ПАД	~ 10	~ 10	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0
Разрывные болты крепления ракеты в ТПК	8	2,5	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0
Пиросредства толкателей	15	10	~ 0	~ 0	~ 0	~ 0
Пиросредства отсоединения крышки	9	0	8	~ 0	~ 0	~ 0
Пиросредства двигателя сброса крышки	20	0	15	~ 0	~ 0	~ 0

Анализ результатов показывает, что наведенные напряжения на жилах, подключенных к запальным мостикам пиросредств, малы и не разрешаются осциллографом (~1 В). Сколько-нибудь заметные напряжения возникают только в режиме х.х., который не представляет практического интереса.

Осциллограммы наведенных напряжений в цепях макетов аппаратуры СДУК показали, что форма импульса, создаваемого/действующего между жилами экранированных кабелей и землей, близко повторяет закон изменения тока (если исключить собственные колебания кабеля), что еще раз говорит об электромагнитном характере наводок. Величина таких наводок при прочих равных условиях определяется коэффициентом взаимной индукции между кабелем и элементами комплекса, по которым растекается разрядный ток.

При развертывании комплекса кабели связи между ТПК и машиной БУ прокладываются произвольно и потому величина коэффициента взаимной индукции до некоторой степени является случайной величиной. Это учитывалось при лабораторных измерениях произвольной прокладкой кабеля по высоковольтному залу лаборатории. Разброс результатов измерений, обусловленный случайной прокладкой кабелей, достигает 25%.

В работе не было обнаружено однозначной зависимости между величиной наведенных напряжений и длиной кабеля. Наблюдающиеся отклонения носят случайный характер, и по-видимому, больше связаны с методом прокладки кабеля, чем с его длиной.

В табл. 2.10 приведены данные о наведенных напряжениях между жилами и между жилами и корпусом на входе СДУК СПУ, установленной на ТПК, при разной длине соединительного кабеля.

Таблица 2.10 – Наведенные напряжения между жилами и между жилами и корпусом на входе СДУК СПУ

Измеряемый параметр	Длина соединительного кабеля, м		
	50	125	250
Средняя величина напряжения между жилами, В	11÷110	25÷50	4÷108
Средняя величина напряжения между жилой и корпусом, В	–	870÷1000	740÷920

В дальнейшем зависимость наведенных напряжений от длины кабеля не учитывалась, а для оценки уровня молниестойкости комплекса базировались на максимальных значениях измеренных перенапряжений на входе блоков аппаратуры СДУК СПУ и машины управления.

Таблица 2.11 - Наведенные напряжения на входе аппаратуры СДУК

Параметр	Блок СДУК	
	СПУ	МУ
Максимальное напряжение между жилами, В	26÷110	23÷90
Максимальное напряжение между жилой и корпусом, В	885÷1190	1030÷1350

Приведенные в табл. 2.8 – 2.11 значения наведенных напряжений получены для скорости нарастания тока $dI_{test}/dt = 4$ кА/мкс. Величину

наведенных напряжений при других значения скорости нарастания тока молнии можно определить из выражения:

$$U_m = U_{test}[(dI/dt)/(dI_{test}/dt)], \qquad (2.3)$$

где U_m – величина наведенных перенапряжений при скорости нарастания тока молнии dI/dt, В; U_{test} – наведенное напряжение при испытаниях, В; dI_{test}/dt – скорость нарастания испытательного импульса тока, А/сек; dI/dt – скорость нарастания тока молнии, для которой необходимо определить наведенное напряжение, А/сек.

Оценка уровня молниестойкости СПУ. Определение молниестойкости СПУ проводились для определения:

- вероятности повреждения аппаратуры за счет индуцированных напряжений (все цепи аппаратуры СДУК являются низковольтными, вполне очевидно, что воздействие, даже кратковременное, перенапряжений с амплитудой в единицы и десятки киловольт приведет к многочисленным пробоям на корпус и повреждению изоляции реле, полупроводниковых элементов и т.д).
- ложного срабатывания пиросредств за счет наводки между жилой и корпусом (пробой внутренней изоляции пиросредства между корпусом и запальным мостиком приводит к его срабатыванию даже в том случае, когда токи разряда намного ниже гарантированных безопасных). Дополнительные исследования показали, что для поджига инициирующего вещества достаточно, чтобы в канале разряда выделялась энергия, запасенная в емкости 100–200 пФ. Такой емкостью на корпус вполне обладают жилы кабелей, присоединенных к пиросредствам. Можно поэтому считать, что появление перенапряжений в кабелях, способных перекрыть внутреннюю изоляцию, вызывает ложное срабатывание пиротехнических элементов и ведет к недопустимой аварии.
- ложного срабатывания за счет наведенных токов в запальном мостике пиросредств.

Лабораторные измерения не обнаружили заметных напряжений между жилами кабеля, замкнутого на эквивалентное сопротивление запального мостика. Учитывая порог чувствительности схемы, можно утверждать, что величина наведенных напряжений не выше 3 В. Точный пересчет этой величины на реальные токи молнии невозможен и здесь требуются дополнительные оценки. По данным

импульсных испытаний минимальная энергия срабатывания пиросредств имеет порядок 10-2 Дж. Именно такая энергия должна быть внедрена в запальный мостик за счет электромагнитных наводок. Если учесть. Что в нормальном положении жилы кабеля отделены от источника питания и являются разомкнутыми, систему нужно рассматривать, как разряд емкости жил на сопротивление мостика, тогда условие поджига пиросредства за счет наведенных токов можно записать в виде:

$$C_{ж} \cdot U_{ж}^{2} / 2 > 10^{-2} \text{ Дж}, \qquad (2.4)$$

где $C_{ж}$ – емкость между жилами кабеля; $U_{ж}$ – амплитуда перенапряжений на жилах.

Поскольку $U_{ж} < 250$ В (пересчет на максимально зарегистрированный ток молнии $I = 250$ кА с эквивалентным фронтом 3 мкс), емкость жил кабеля должна быть не менее 0,3 мкФ.
Реальный кабель обладает емкостью 100–200 пФ и, следовательно, ложное срабатывание пиросредств за счет токов, наведенных в мостике, нужно считать маловероятным.

Оценка молниестойкости ракеты в составе комплекса. В работе не исследовалась вероятность ложного срабатывания бортовой пиротехники. Однако, можно полагать, что она находится в более благоприятных условиях из-за дополнительной экранировки корпусом ТПК и собственным корпусом ракеты. Уровень наведенных напряжений в цепях ракеты не может быть выше измеренного в кабелях ТПК (рис. 2.64). Конструкция комплекса исключает прямые удары в ракету, поэтому нет оснований ожидать в ее цепях опасных перенапряжений.

Оценка безопасности комплекса и мероприятия по молниезащите. На основании проведенных экспериментов и теоретических оценок установлено, что комплекс нельзя считать абсолютно стойким к грозовым воздействиям. Почти половина всех разрядов молнии, поразивших ТПК или связанные с ним цепи, приведет к повреждению аппаратуры СДУК. Вероятность такого повреждения для единого комплекса, развернутого в районе с грозовой активностью 25 грозовых дней в году, оценивается в 0,01 год$^{-1}$.

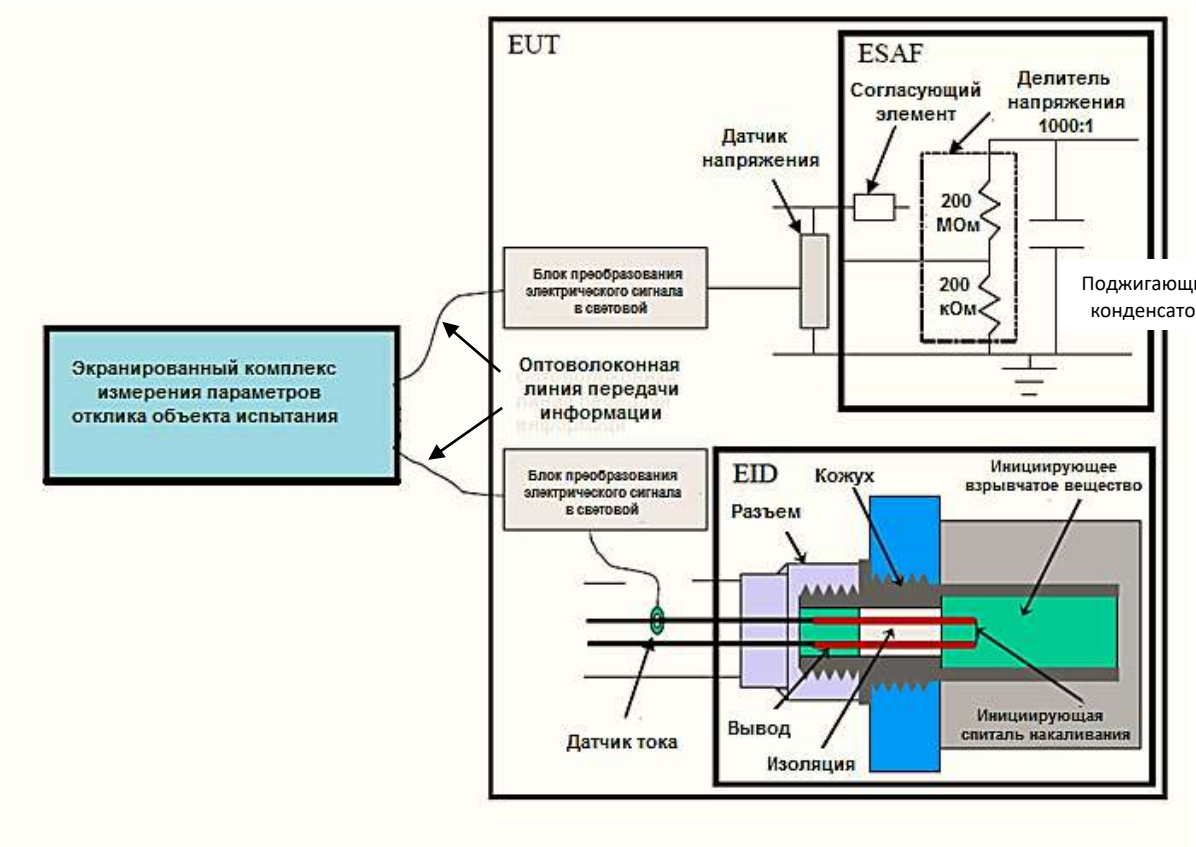


Рис. 2.64 – Метод проведения испытаний пиростреcтва объекта РКТ на молниестойкость; EID – взрыватель; ESAF – электронный предохранительно-исполнительный механизм; EUT – пиросредство.

Около 10% разрядов молнии являются опасными для пиротехнических средств ТПК и могут вызвать их ложное срабатывание. Вероятность недопустимой аварии за счет ложного срабатывания пиросредств для одного комплекса близка к $2 \cdot 10^{-3}$ год$^{-1}$.

Таким образом, вероятность недопустимых аварий за счет грозовых разрядов может быть резко снижена либо за счет снижения уровня электромагнитных наводок в цепях пиротехнических средств, либо за счет повышения стойкости всех элементов пиротехники.

Первое требует дополнительной экранировки кабелей управления и связано с утяжелением конструкции и повышением ее стоимости. Поэтому целесообразно рассмотреть возможности повышения стойкости пиротехнических средств.

Для устранения ложных срабатываний нет необходимости исключать любое перекрытие изоляции пиросредств – достаточно

только, чтобы канал разряда не мог соприкасаться с инициирующим веществом. Это будет обеспечено, если добиться 100% перекрытия изоляционной шайбы со стороны штыревого разъема и тем самым ликвидировать перекрытия внутренней поверхности изоляционной шайбы, соприкасающейся с инициирующим веществом.

Для этой цели рекомендуется сократить длину изоляционного расстояния с внешней стороны между ножками разъема и корпусом пиросредства путем запрессовки металлической шайбы или изменения конструкции внутренней стороны корпуса разъема.

Предложенные мероприятия иллюстрируются чертежами на рис.2.65.

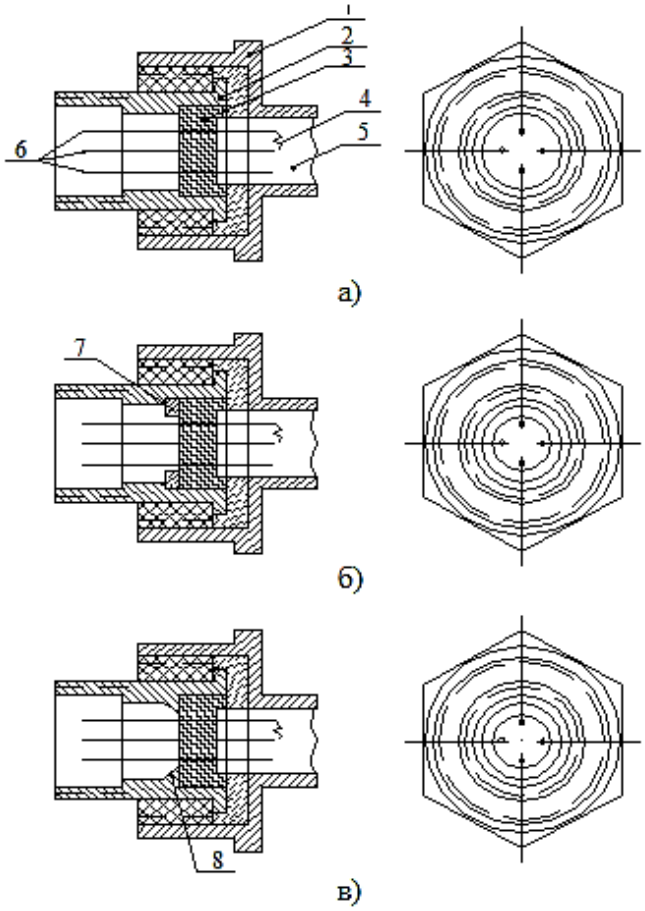


Рис. 2.65 - Варианты координации изоляции пиросредств:

а) – разрез пировоспламенителя без защитного промежутка:
б), в) – разрез пировоспламенителей с защитными промежутками:

1 – корпус пировоспламенителя;
2 – корпус штырьевого разъема;
3 – изоляционная втулка;
4 – запальные мостики;
5 – полость для инициирующего вещества;
6 – штырьки разъема;
7 – металлическая шайба, соединенная с корпусом разъема и приближающаяся к штырькам разъема на такое расстояние, чтобы при появлении перенапряжений перекрытие всегда происходило между штырьками и шайбой;
8 – кольцевой выступ, выполняющий ту же роль, что и шайба 9

Возможные перекрытия наружной поверхности изоляционной шайбы из-за малой энергии искрового канала не повредит изоляции пиросредства и не нарушит его работоспособности.

Предложенная модернизация всех пиротехнических средств комплекса позволит резко снизить вероятность их ложного

срабатывания за счет электромагнитных наводок в кабелях управления.

Таким образом из вышеприведенного можно сделать следующие выводы:

1. При импульсных воздействиях амплитуда тока, вызывающего срабатывание пиросредства, растет при сокращении длительности воздействия; энергия срабатывания сохраняется приблизительно постоянной, а ее минимальное значение для различных типов находится в пределах $0{,}75 \div 1{,}4 \cdot 10^{-2}$ Дж.

2. Перекрытие внутренней изоляции пиросредств приводит к воспламенению заряда, даже в том случае, когда ток разряда на порядок меньше гарантированного безопасного тока запальных мостиков. Напряжение импульсного перекрытия изоляции для отдельных типов колеблется в пределах 3,5÷5,0 кВ.

3. Наведенные напряжения в цепях аппаратуры СДУК достигают десятков киловольт относительно корпуса и единиц киловольт между жилами. Большинство разрядов молнии, поразивших комплекс, вызовет необратимые повреждения изоляции и входных элементов аппаратуры СДУК.

4. Ложные срабатывания пиросредств, происходящие за счет разогрева запальных мостиков при протекании по ним наведенных токов в момент поражения молнией СПУ, следует считать маловероятными.

5. При значительных токах молнии (вероятность которых не менее 10%) возможны ложные срабатывания пиросредств за счет перекрытия внутренней изоляции ПС.

6. Ложные срабатывания пиросредств за счет перекрытия внутренней изоляции могут быть устранены путем изменения конструкции штыревых разъемов ПС, заключающегося в сокращении изоляционных расстояний между ножками штыревого разъема и его корпусом с внешней стороны изоляционной шайбы.

Литература к главе 2

2.1. AECTP-500 NATO STANDARD Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1. -2016, 1125 p. (Category 508/4).

2.2. RTCA SAE ARP 5416 Aircraft Lightning Test Method, 2005. -145 p.

2.3. ОСТ 1 01160-88 Оборудование бортовое самолетов и вертолетов. Методы испытаний на молниестойкость. – 1988. -23 с.

2.4. RTCA SAE ARP 5412 Revision A. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. -2005. – 56 p.

2.5. RTCA ARP 5414. Aircraft Lightning Zoning. -2005. -33p.

2.6. IEC 60060-2 High-voltage test techniques. Part 2. Measuring Systems. 1994.-136p.

2.7. IEC 61000-4-25 EMC. Testing and measurement techniques – HEMP immunity test methods for equipment and systems. 2001. – 98 p.

2.8. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". 2010. – 292 с.

2.9. ГОСТ 30585-98 (ДСТУ 3681-98). Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний// В.И.Кравченко, Ю.В. Голодняк, Г.В.Кравченко и др.// Держстандарт України , Київ 1998. - 28 с.

2.10. Hall A. Thunderstorm Protection of Aircraft Rehomes. Intl. Conf. on Lightning and Static Electricity. – 2005.

2.11. Rapke E.J. Workshop: Evolution of Lightning Protection of Composite Airframes. Intl. Conf. on Lightning and Static Electricity. – 2005.

2.12. J. Anderson Plumer Laboratory Test Results and Natural Lightning Strike Effects : How Well They Compare, Intl. Conf. on Lightning and Static Electricity. – 2012.

2.13. RTCA DO-160G /ED-14G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. -2011. -438 p.

2.14. AECTP-250 NATO STANDARD Electrical and Electromagnetic Environmental Conditions. Edition C Version 1. - 2014, 253 p.

2.15. Scully R. Lightning Protection for the Orion Space Vehicle. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Источник: https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=20150009504 2017-1019T23:18:24+00:00Z

2.16. FAA AC 20-136B, Aircraft Electrical and Electronic System Lightning Protection, Federal Aviation Adminsitration.

2.17. MPCV 70080, Cross Program Electromagnetic Environmental Effects (E3) Requirements, NASA Orion Program

2.18. IEC 62305-3:2010 Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard. -2010. -160 p.

2.19. Lightning Assessment and Qualification of Missiles thierry.renou@dga.defense.gouv.fr

Приложение к главе 2

П.1 Обоснование адекватности результатов определения вероятности поражения прямым ударом молнии наземных конструкций путем испытаний на масштабной модели

П.1.1 Введение

П.1.1.1 Постановка задачи

Для определения вероятности поражения прямым ударом молнии проводят эксперимент, в котором имитируют молниевый разряд с помощью специального оборудования [П.1]. Одна из возможных схем проведения такого эксперимента показана на рис. П.1.

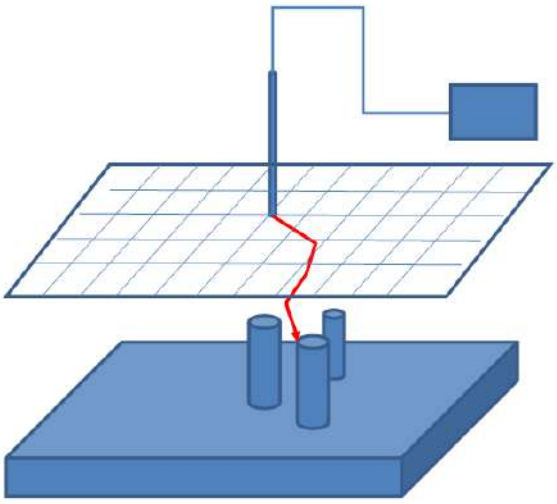


Рис. П.1. Схема проведения эксперимента по моделированию прямого молниевого разряда в наземные конструкции

При проведении эксперимента соблюдают следующую последовательность действий:

- последовательно размещают вертикальный стержень «А», на который подается разрядный импульс высокого напряжения, в узловых точках плоскости на заданной высоте;
- амплитуду импульса напряжения повышают до получения устойчивого разряда;
- в каждой из узловых точек получают статистику распределения мест попадания разряда;
- усреднением полученных результатов по всем узлам сетки определяют вероятности поражения молнией различных зон исследуемых объектов.

Задачей настоящего исследования является анализ и аргументация соответствия результатов, полученных при масштабном макетировании молниевого разряда реальному процессу. А также – оценка погрешности расчета вероятностей попадания молнии в различные точки наземных сооружений и

объектов с помощью экспериментов, проведенных на масштабном макете.

Для ее решения разработана информационная модель процесса разряда молнии и проверена ее адекватность с помощью численного моделирования в среде COMSOL (версия 5.4).

П.1.1.2 Проблемы согласования моделей различных стадий развития молниевого разряда

Общепризнанная стримерно-лидерная модель образования молниевого разряда предполагает несколько последовательных стадий, в основе которых лежат различные физические механизмы.

При моделировании молниевого разряда на масштабном макете в идеальном случае требуется полное соответствие как физических стадий двух процессов, так и геометрического подобия параметров каждой стадии разряда молнии и разряда в лабораторных условиях.

При масштабном макетировании системы молниезащиты неявно предполагается, что:

– вертикальный стержень имитирует спускающийся лидер молнии;

– вероятность пробоя в ту или иную область конструкции равна вероятности попадания в аналогичную область оригинального изделия;

– искровой разряд от конца стержня к точке конструкции аналогичен молниевому разряду.

Однако анализ подобных экспериментов и сравнение их результатов со статистикой попадания реальных молний в наземные объекты показывает [П.2], что полная физическая имитация молнии на макете невозможна. Это связано, прежде всего, с тем, что геометрические параметры, характеризующие различные компоненты молниевого разряда, такие как:

– характерный размер шага нисходящего ступенчатого лидера,
– длина конечного скачка,
– характерная длина стримерной головки,
– расстояние начала ориентации нисходящего лидера и др.

Также в разной степени могут зависеть от разности потенциалов между элементами разряда, напряженности поля в различных точках макета, градиента напряженности, тока молнии.

В то же время условия эксперимента предполагают возможность варьирования всего двух параметров импульса, подаваемого на верхний электрод – напряжение и длительность. Поэтому обеспечить одновременное пропорциональное уменьшение геометрических параметров разряда молнии не представляется возможным.

В этой ситуации удается отказаться от точной физической имитации молнии, а ограничились обеспечением лишь конечного результата – совпадения суммарной вероятности попадания в ту или иную область макета, и воспользоваться модифицированной версией вероятностного подхода к описанию процесса ориентации нисходящего лидера. Оказывается, что при таком подходе удается нивелировать отличия параметров физических процессов, или скорректировать их соответствующими поправками к полученным результатам.

П.1.2 Анализ процесса образования молнии и возможные упрощения

П.1.2.1 Основные элементы стримерной теории образования молнии

Для построения упрощенной (информационной) модели формирования и ориентации молниевого разряда необходимо проанализировать влияние отдельных этапов на распределение вероятности попадания.

Многочисленные экспериментальные исследования и феноменологические модели молнии позволяют выделить следующие основные этапы этого процесса:

– Из грозового облака начинает спускаться лидер. Траектория спускающегося лидера негативной полярности представляет собой случайную зигзагообразную линию.

– Скачкообразный характер движения лидера возникает в результате стримерного механизма образования его канала. В промежутках между скачками в области головки лидера образуется множество стримеров, которые формируют объемный заряд перед головкой лидера, разогревают эту область и создают условия для следующего скачка.

– Формирование и разогрев стримерной области, а также ее ориентация и размеры определяются в основном локальной напряженностью электрического поля вблизи текущего положения

головки нисходящего лидера и параметрами состояния атмосферы в этой области.

– Так как последние подвержены флуктуациям, то направление и длина следующего скачка головки лидера носит стохастический характер.

– При приближении к поверхности земли заряд нисходящего лидера начинает создавать на наземных объектах существенный заряд противоположного знака (дополнительно к зарядам, наведенным грозовой тучи).

– При достижении определенного уровня напряженности на выступающих острых концах наземных объектов возникают встречные лидеры

– Один из них своим зарядом «перехватывает» управление траекторией нисходящего лидера и сближается с ним.

– При достижении определенного значения напряженности между головками встречных лидеров возникает искровой пробой.

Схема возникновения молниевого разряда показана на рис. П 2 а. Упрощенная схема, приближенная к условиям макетного эксперимента показана на рис. П 2 б.

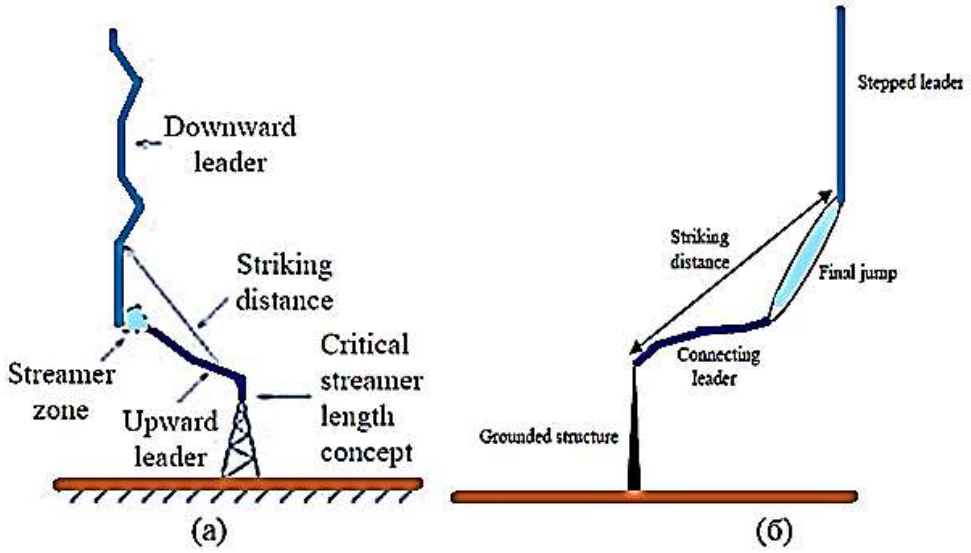


Рис. П.2 – Схема возникновения молниевого разряда
а - возникновение прямого удара молнии;
б - моделирование молнии в макетном эксперименте.

При прямом переносе результатов оценки вероятности прямого удара, полученных в эксперименте, на реальную конструкцию возникают погрешности двух типов:

– Погрешности, связанные с различием механизмов возникновения разряда в эксперименте и молнии.

– Погрешности, возникающие в силу масштабирования макета наземных сооружений и конструкций.

П.1.2.2. Предварительный анализ возможных упрощений модели

На этапе *движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров* отличие макетного эксперимента от реального разряда молнии заключается в том, что сам лидер моделируется проводящим жестким стержнем, а его конечное положение фиксируется, после чего на стержень подается высокое напряжение. При этом в макетном эксперименте движение верхнего лидера до некоторой высоты вообще не моделируется, а весовой вклад в интегральное распределение вероятности попадания разряда молнии считается одинаковым для всех точек сетки (рис. П 1).

Однако, неоднородность поля зарядов, наведенных на наземных конструкциях, приводит к тому, что нисходящий лидер начинает ориентировку - смещение в сторону выступающих концов наземных сооружений, на расстояниях, существенно превышающих их высоту.

На этом этапе развития молнии значения напряженности поля вблизи острых концов наземных сооружений еще недостаточны для возникновения встречных лидеров и влияние наведенных зарядов может быть учтено на основании решения электростатической задачи.

При этом влияние этого слабого поля можно свести к расчету поверхностей, разграничивающих силовые линии поля, попадающие в ту или иную область возможного удара молнии. Был разработан алгоритм такого расчета и проведены компьютерные эксперименты, подтверждающие его работоспособность.

Тем не менее, условия проведения макетного эксперимента (жестко заданное положение верхнего электрода на относительно малой высоте) не позволяют смоделировать слабые отклонения спускающегося с большой высоты лидера.

В связи с этим был разработан алгоритм коррекции результатов макетного эксперимента, который основан на численном решении электростатической задачи (см. раздел П.2.1.1).

На этапе «*ориентации» движения головки верхнего лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров* по мере снижения головки нисходящего лидера молнии электростатическое поле, наведенное на выступающих острых углах и ребрах наземных конструкций, увеличивается. Это приводит к тому, что интенсивность возникновения на них стримеров и их длина увеличиваются, температура стримерной области повышается, и возникают условия для образования встречных (восходящих) лидеров.

Далее головка одного из них оказывается в более выгодных условиях и «перехватывает» нисходящий лидер. Их дальнейшее движение навстречу друг другу не поддается простому моделированию. Однако на окончательное распределение вероятностей конкретный вид траектории сближения уже не оказывает существенного влияния. Поэтому при анализе второго этапа образования молнии мы ограничимся оценкой вероятности «выбора» активного лидера из множества возникающих встречных лидеров.

Такой выбор связан со стохастичностью свойств воздуха в промежутке между электродами. Ранее (на предыдущем этапе работы) для численной оценки мы ограничились феноменологической моделью рассеяния точки попадания молнии, используя экспериментально известный параметр стохастичности - 10%. На этапе макетирования мы можем более точно исследовать этот процесс и уточнить сделанную ранее оценку вероятностей, опираясь на данные макетного эксперимента. Анализ модели этого этапа и алгоритм ее привязки к реальному молниевому разряду (см. раздел П. 2.1.2.

На этапе *окончательного пробоя между сблизившимися головками встречных лидеров («final jump»)* происходит окончательное образование ионизированного проводящего воздушного канала между электродами. Естественно предположить, что при этом ранее образованные проводящие каналы встречных лидеров не меняют своего расположения. Поэтому этот этап не оказывает влияния на вероятность попадания молнии, и мы его рассматривать далее не будем.

П. 2.1 Обоснование оценки распределения вероятности попаданий молниевого разряда на основе данных макетного масштабного эксперимента

П.2.1.1 Моделирование распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата»

Отличие макетного эксперимента от реального разряда молнии заключается в том, что сам лидер моделируется проводящим жестким стержнем, а его конечное положение фиксируется до того, как на стержень подается высокое напряжение. При этом в макетном эксперименте движение нисходящего лидера вплоть до некоторой высоты вообще не моделируется, а задается априорно. В этой ситуации задача заключается в том, чтобы оценить погрешности макетирования, связанные с этим отличием, а также, по возможности, внести коррекцию в окончательные результаты.

Как показывают многочисленные экспериментальные исследования и разумные физические оценки, наведенные на наземных объектах заряды слишком малы, чтобы существенно влиять на траекторию движения ступенчатого лидера [П.3].

Очевидно, что при однородном вертикальном поле грозового облака случайные отклонения траектории лидера от вертикали симметричны. Если полагать, что плотность вероятности возникновения ступенчатых лидеров на большой высоте однородна, то координата головки лидера при ее снижении может существенно отклоняться от начального значения, но при этом распределение остается симметричным. Поэтому при снижении распределение вероятностей положения головки лидера остается почти однородным (неоднородность не более 5%) вплоть до той высоты, на которой она вызывает возникновение встречных (восходящих) лидеров.

В эксперименте на макете эта однородность обеспечивается серией измерений с регулярным расположением конца электрода в узлах сетки на заданной высоте (рис П3). Для имитации однородности распределения реальных молний над объектом эта высота должна в несколько раз превышать высоту выступающих конструкций макета.

Кроме того, в силу того, что масштабному подобию соответствует только стадия «выбора и захвата» одним из восходящих лидеров нисходящего, высота расположения верхнего электрода должна приблизительно совпадать (в масштабе макета) с высотой, на которой начинается эта стадия.

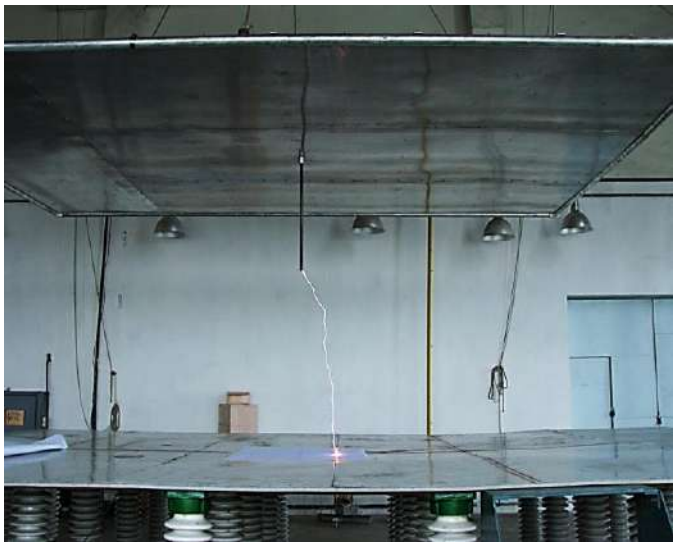


Рис. П.3 – Моделирования молниевого разряда при определении вероятности попадания в различные зоны наземных объектов

Для расчета возникающих погрешностей распределения неоднородности поля в плоскости расположения конца электрода, связанных с зарядами, наведенными на наземных конструкциях, можно воспользоваться численным методом с помощью программного пакета COMSOL 5.3a..

Пример одного из вариантов картины поля полученной для различных вариантов расположении головки нисходящего лидера, показан на рис. П.4.

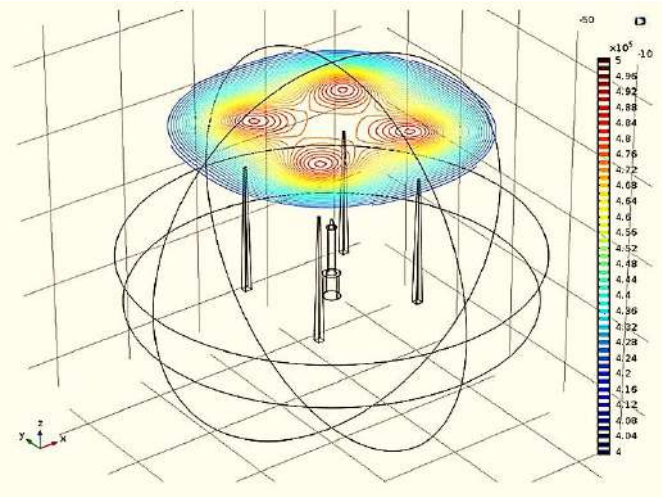


Рис. П.4 - Результаты численного расчета напряженности внешнего поля в плоскости расположения конца верхнего электрода при макетных экспериментах

Для расчета вероятностей попадания молнии в конечное число зон поражения наземных конструкций в первом приближении достаточно рассчитать силовые линии, (в трехмерной модели поверхности силовых линий), которые заканчиваются на границах этих зон.

Аналогичный принцип можно использовать и для корректировки неоднородности поля в макетных измерениях. Можно считать, что наиболее вероятная траектория ступенчатого лидера (до стадии возникновения встречного лидера) соответствует силовым линиям поля грозовой тучи [П.4].

Поэтому результаты, полученные при макетных измерениях для каждой из узловых точек (рис. П1), следует умножить на соответствующий поправочных коэффициент. Этот коэффициент пропорционален напряженности неоднородного поля в плоскости расположения конца верхнего электрода (рис.4) и рассчитывается с учетом нормировки на единицу общей вероятности молниевого разряда.

Заметим, что при этом поле грозовой тучи считается однородным, а неоднородность возникает только за счет влияния зарядов, наведенных на наземных конструкциях (без учета заряда нисходящего лидера). В приведенном примере вклад этой неоднородности в окончательное распределение вероятности попадания молнии в элементы наземных конструкций достигает 3% (отличие между напряженностью поля над верхушками мачт и острием ракетоносителя).

П.2.1.2. Обоснование подобия масштабного макетирования разряда молнии на стадии ориентировки нисходящего лидера одним из восходящих

П.2.1.2.1. Вероятностный подход к определению точки удара молнии

Как следует из общепризнанного феноменологического описания процессов образования молнии или длинной искры, в них присутствует закономерная и стохастическая составляющие. Наиболее простым представлением описания такого типа является вероятностное распределение пробивного напряжения, при заданной точке расположения головки ступенчатого лидера и точке попадания искры на наземной конструкции. Если возможных точек (зон попадания) несколько, то подобное распределение вероятностей можно получить для каждой из них.

В случае, когда статистики попадания длинной искры известны и независимы, вероятностная модель позволяет рассчитать статистику попадания в пару этих точек одновременно, а также – относительную вероятность попадания в каждую из них.

При подаче напряжения от общего источника в эти точки вероятность пробоя одного из двух разрядных промежутков определяется по формулам:

$$P_1 = \int_0^{\infty} \varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_1]}(U_f)\left[1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_2]}(U_f)\right]dU_f,$$

$$P_2 = \int_0^{\infty} \varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_2]}(U_f)\left[1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_1]}(U_f)\right]dU_f, \qquad (П.1)$$

где $\Phi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_2]}(U_f) = \int_0^{U_f} \varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_2]}(U_f{}')dU_f{}'$,

$\Phi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_1]}(U_f) = \int_0^{U_f} \varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_1]}(U_f{}')dU_f{}'$ и $P_1 + P_2 = 1$.

Распределение вероятности напряжения пробоя для системы двух точек определяется формальным соотношением:

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl},(\vec{r}_1,\vec{r}_2)]}(U_f) = \int_0^{U_f}\{\varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_1]}(U_f{}')[1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_2]}(U_f{}')] + \varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_2]}(U_f{}')[1 - \Phi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_1]}(U_f{}')]\}dU_f{}' \qquad (П.2)$$

Как показано в многочисленных экспериментах, распределение $\varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}(U_f)$ хорошо аппроксимируется гауссоидой:

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}(U_f) \approx \cdots e^{-\frac{\left(U_f - \overline{U_{f[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}}\right)}{2\sigma^2_{U[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}}} \qquad (П3)$$

При этом параметры распределения $\overline{U_{f[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}}$ и $\sigma^2_{U[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}$ зависят от расположения пары точек (концов длинной искры). Первая из них задана положением $\vec{r}_{sl}$ конца верхнего электрода, а вторая $(\vec{r}_i)$ – положением одной из возможных точек попадания искры или их набором.

П. 2.1.2.1. Проблемы, возникающие при использовании вероятностного подхода к определению точки удара молнии для близко расположенных объектов

Необходимо отметить, что в эксперименте по определению на макете сначала конец электрода помещают в точку, а затем плавно повышают напряжение на нем до получения длинной искры. В отличие от этого, при опускании ступенчатого лидера молнии разность потенциалов между его головкой и наземными объектами остается практически постоянной, в то время как меняется расположение головки лидера. Поэтому пробой в реальной молнии надо описывать статистикой – плотностью вероятности того, что ориентировка ступенчатого лидера, возникновение встречного лидера и пробой между ними произойдут из точки расположения первого при заданном напряжении и конечной точке попадания.

Для согласования этих двух статистик необходимо сделать дополнительные феноменологические предположения. Так, предполагают, что средние пробивные напряженности поля равны для различных и, тем самым жестко привязывая две статистики одну к другой.

В дальнейшем именно это допущение и приводит к «полному провалу теории», по выражению авторов [П.4], при близком расположении возможных точек попадания (получению расчетной вероятности 0.4 при фактической 0.01). Далее мы построим более корректную связь этих статистик и воспользуемся вероятностным подходом для привязки результатов макетирования к реальным вероятностям попадания молнии.

П.2.1.2.3. Учет стримерной стохастичности для алгоритмизации процедуры «перехвата» одним из восходящих стримеров ориентации головки нисходящего лидера

Необходимо отметить, что в качестве объяснения взаимного влияния близко расположенных наземных объектов авторы [П.4] привлекают эффект подавления зарядом уже возникшего встречного лидера поля близлежащих возможных мест попадания. В результате оказывается, что даже при возникновении множества встречных лидеров активным оказывается первый из них, в то время как

остальные лишь пассивно меняют конфигурацию поля и искривляют траекторию основного лидера.

В дальнейшем при анализе будет использоваться эта концепции выбора одного из встречных лидеров, при условии, что вероятность нарушения этого правила слишком мала, чтобы существенно повлиять на результат моделирования.

При этом учитывалось, что могут существовать и ранее возникшие встречные лидеры, но принималось, что они затухнут до того, как начнут оказывать влияние на ориентацию ступенчатого лидера и вероятность возникновения последующих встречных лидеров.

В этом приближении вероятность возникновения «активного» встречного лидера (того, который формирует длинную искру между собой и ступенчатым лидером) зависит только от напряженности поля вблизи наземных конструкций. А она, в свою очередь, от состояния атмосферы и текущего положения головки ступенчатого лидера $\vec{r}_{sl}$.

Другими словами, статистики возникновения длинной искры между головкой ступенчатого лидера $(\vec{r}_{sl})$ и двумя точками возникновения встречного лидера $(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ можно считать независимыми, если записывать их не для пробивного напряжения, а для напряженности поля в локальной области вблизи рассматриваемого острия.

При этом средняя локальная напряженность поля рассчитывается как решение электростатической задачи при заданном напряжении между головкой ступенчатого лидера и землей.

Некорректность применения формул вероятностного подхода при близком расположении наземных электродов заключается не в том, что пренебрегают влиянием уже возникшего встречного лидера на параметр случайного разброса σ_f. Мы полагаем, что причина в пренебрежении их взаимным влиянием на среднюю локальную напряженность электрического поля вблизи точек возможного образования встречных лидеров.

Ошибка может возникать потому, что в статистике среднего по всей длине значения напряженности, рассчитанного как

$$\overline{E_f} = \frac{U_f}{|\vec{r}_{sl} - \vec{r}_i|} \neq E_f(\vec{r}_i) \qquad (П.4)$$

учитывалось не взаимное расположения электродов (и электростатическое влияние друг на друга), а только расстояние между ними и головкой ступенчатого лидера.

Для корректного перехода от статистики макетных экспериментов к статистике реальных молниевых разрядов необходимо учитывать не просто расстояния до мест возможного попадания, а локальную напряженность электрического поля, индуцированного в этих местах.

При этом на остриях наземных конструкций напряженность поля уменьшается за счет процесса ионизации и коронного разряда. Поэтому необходимо учитывать напряженность не на самой поверхности проводника, а на некотором расстоянии, равном характерной длине возникающих стримеров.

Таким образом, как и в вероятностном методе, мы будем рассматривать стохастическую модель «выбора» точки попадания, но связывать ее случайный характер не с разностью потенциалов между электродами, а со стохастическими изменениями значения напряженности поля вблизи вероятной точки попадания, при которой возникнет встречный лидер.

Будем считать, что приближенно она может быть задана функцией Гаусса, как и экспериментальное распределение напряжений пробоя.

$$\omega_{\vec{r}_{sl}}\left(E_{r_0}\right) \approx \cdots e^{-\frac{\left(\overline{E_{r_0}}-E_{r_0}\right)}{2\sigma_{fE}^2}} \qquad (\text{П.5})$$

Здесь E_{r_0} – фактическая напряженность поля на расстоянии r_0 от точки возможного попадания искры (молнии), а $\overline{E_{r_0}}$ – ее среднее значение.

Недостатком такого подхода является сложность вычисления (оценки) $\overline{E_{r_0}}$ для различных вариантов расположения наземных сооружений. Однако, с другой стороны, именно это и позволяет учесть взаимное влияние различных областей возможного удара уже на стадии моделирования. Более того, в первом приближении мы можем считать, что параметры r_0, $\overline{E_{r_0}}$, σ_{fE}^2 одинаковы для различных областей, так как они зависят, в основном, от физики образования стримеров и свойств воздуха, и только потом от формы электродов.

Другим недостатком такого подхода является тот факт, что в эксперименте мы меряем зависимость $\varphi_{[\vec{r}_{sl},(\vec{r}_1,\vec{r}_2)]}(U_f)$, а не $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$. Тем не менее, мы можем получить аналитическую связь этих статистик для простой конструкции (например, прямой стержень заданной высоты). А затем, на основании экспериментальных данных $\varphi_{[\vec{r}_{sl},(\vec{r}_1,\vec{r}_2)]}(U_f)$ для этой конструкции рассчитать и $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$.

Заметим, что при фиксированном положении электродов в макетном эксперименте $\overline{E_{r_0}}/\,\sigma_{fE}^2 = \overline{U_f}/\,\sigma_U^2$. Решая электростатическую задачу отдельно для каждой начальной точки расположения головки ступенчатого лидера $\vec{r}_{sl}$, и используя функцию $\omega_{\vec{r}_{sl}}(E_{r_0})$, мы, в принципе, можем рассчитать вероятности попадания длинной искры (или молнии) в различные точки наземных конструкций при заданном значении $\vec{r}_{sl}$. Для этого необходимо использовать вероятностный подход к определению точки удара молнии.

Если дополнительно задать плотность вероятности того, что головка ступенчатого лидера окажется в точке $\vec{r}_{sl}$, то интегрируя по всей плоскости расположения $\vec{r}_{sl}$, мы получим общее распределение вероятностей попадания искры в различные области наземных конструкций. Таким образом, после описанной корректировки вероятностная модель длинной искры может быть использована для расчета вероятностей попадания в различные точки наземных конструкций.

П.3.1. Адаптация макетного эксперимента в рамках вероятностной модели

Описанную выше вероятностную модель можно использовать как для реального объекта и реальной молнии, так и для уменьшенного макета. Проблема переноса полученных на макете результатов на реальный объект заключается в том, что хотя случайные процессы и описываются одинаковыми стохастическими моделями, их параметры, такие, как r_0, $\overline{E_{r_0}}$, σ_{fE}^2, могут быть различны.

Воспользуемся геометрическим подобием макета и оригинального объекта и адаптируем параметры макета для получения максимального соответствия результатов.

Прежде всего отметим, что геометрическое подобие обеспечивает и электростатическое подобие поля, наведенного спускающимся ступенчатым лидером. Для того, чтобы возникновение встречного лидера было с той же относительной вероятностью, необходимо пропорциональное уменьшение и остальных геометрических параметров модели.

Таким параметром является значение r_0 – эффективное расстояние до поверхности, напряженность поля на которой определяет вероятность возникновения встречного лидера. Мы полагаем, что оно соответствует длине стримеров, генерируемых на поверхности электрода. Для определения этой длины используем данные экспериментов. В частности, в экспериментальных исследованиях установлено [П.6], что «стримерам в составе стримерной вспышки удается пересечь межэлектродный промежуток длины d, только если отношение $E_{\text{ср}} = U_{\text{а}}/d$ превышает определенное критическое значение $E_{\text{кр}}$, которое зависит от рода газа и его состояния. В воздухе при нормальных условиях в широком диапазоне $d \approx 0.1 - 10$ м $E_{\text{кр}} \approx 4.5 - 5.0$ кВ/см ».

Таким образом, можно полагать, что длина стримерной вспышки определяется расстоянием, на котором напряженность поля спадает до значения E_{cr}. Существенно то, что это значение одинаково в широком диапазоне межэлектродных промежутков (0.1-10 м). Можно предположить, что и для больших значений (недоступных в экспериментах) оно также меняется незначительно. Поэтому для обеспечения масштабного подобия стохастического закона образования встречных стримеров необходимо обеспечить такое же значение E_{cr} на пропорционально меньших расстояниях. Но это условие выполняется автоматически при пропорциональном уменьшении разности потенциалов между электродами (в соответствии с масштабным коэффициентом). Можно также учесть небольшие различия в значениях $E_{\text{кр}}$ для разных масштабов и соответственно уменьшить разность потенциалов еще на 10-20%.

Дополнительным условием подобия стохастических моделей является обеспечение одинаковости значений $\overline{E_{r_0}}$, σ_{fE}^2 при заданных значениях $\vec{r}_{sl}$ и $\vec{r}_i$ в объекте и в его макете. Ранее мы определили r_0, как эффективное расстояние до поверхности, на котором напряженность поля определяет вероятность возникновения

встречного лидера. Как следует из [П.4], таким расстоянием можно считать расстояние, на котором напряженность поля равна E_{cr}. Но тогда значение напряженности поля на расстоянии, определенном таким образом, точно равно E_{cr}, а случайный разброс значений следует отнести к параметру r_0.

В результате, вместо стохастической модели (5) мы можем использовать модель случайной длины стримера $\omega_{\vec{r}_{sl}}(r_0;\, r_i\,)$в которой функция распределения вероятности уже не является гауссоидой, а определяется спецификой электростатического поля вблизи наземных конструкций. Кроме того, она может быть различна для различных точек $\vec{r}_i$ на их поверхности.

Таким образом, стохастическая модель длинной искры между заданными точками (положениями концов электродов) может быть интерпретирована следующим образом.

П.4.1. Феноменологическая интерпретация стохастичности результатов измерения напряжения пробоя

Приведенные выше аргументы сводятся к формированию нового модифицированного вероятностного подхода к определению вероятностей попадания молнии. Перечислим его основные положения:

Физической причиной стохастичности напряжения пробоя при заданных положениях электродов $\vec{r}_{sl}$ и $\vec{r}_i$ является случайные флуктуации свойств воздушного промежутка и процессов ионизации и т.п., проходящих в нем при образовании длинной искры.

– Экспериментальные данные показывают, что напряжение пробоя может быть описано формулой

$$\varphi_{[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}\left(U_f\right) \approx \cdots e^{-\frac{\left(U_f-\overline{U_{f[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}}\right)}{2\sigma^2_{U[\vec{r}_{sl},\vec{r}_i]}}} \qquad (П.6)$$

– Описанная выше модель формирования длинной искры (возникновение встречного лидера и последующее его сближение с нисходящим лидером) позволяет интерпретировать эту стохастичность, как следствие стохастичности расстояния r_0, на котором напряженность электрического поля, наведенного верхним лидером, равна E_{cr}.

– Широко известный электро-геометрический метод определения возможных зон поражения может быть применен к полю, в котором стохастичность «выбора» одного из восходящих встречных лидеров сводится к стохастичности длины стримера (с напряженностью E_{cr} на конце стримера).

– Для определения вероятностного распределения значений $r_0(\vec{r}_i)$ для различных точек $\vec{r}_i$ на поверхности наземных конструкций может быть использована экспериментальная зависимость (П.6) и решение электростатической задачи.

– В масштабном макетном эксперименте подобие электростатических полей автоматически обеспечивает пропорциональное уменьшение значений $r_0(\vec{r}_i)$ при сохранении вероятностных распределений.

Отметим, что напряженность поля в каждой точке пространства между электродами также подвержена флуктуациям. Будем считать, что среднее значение напряженности в ней соответствует решению электростатической задачи при заданной конфигурации проводящих электродов и поданного напряжения.

При случайном увеличении напряжения между электродами напряженность в каждой точке пространства увеличивается пропорционально напряжению и значение r_0 также увеличивается. Однако, степень увеличения r_0 может существенно зависеть от конфигурации поля. Проиллюстрируем возможность «пробоя» защитного поля системы молниезащиты на примере численного расчета в COMSOL.

На рис. П.5 показаны результаты расчета изолиний напряженности электростатического поля, индуцированного на наземных конструкциях внешним однородным полем. Как видно из рисунка, при этом критическое значение напряженности $E_{cr} = 4.65\,kV/sm$ достигается на малом расстоянии от головки ракетоносителя (точка А). Следующая за этой точкой область меньшей напряженности не позволяет стримерам, возникшим на головке ракетоносителя, продвинуться дальше и «захватить» нисходящий лидер. В этом случае в соответствии с электро-геометрическим методом удар молнии будет перехвачен системой молниезащиты (попадет в верхушки мачт или соединяющие их проводящие тросы).

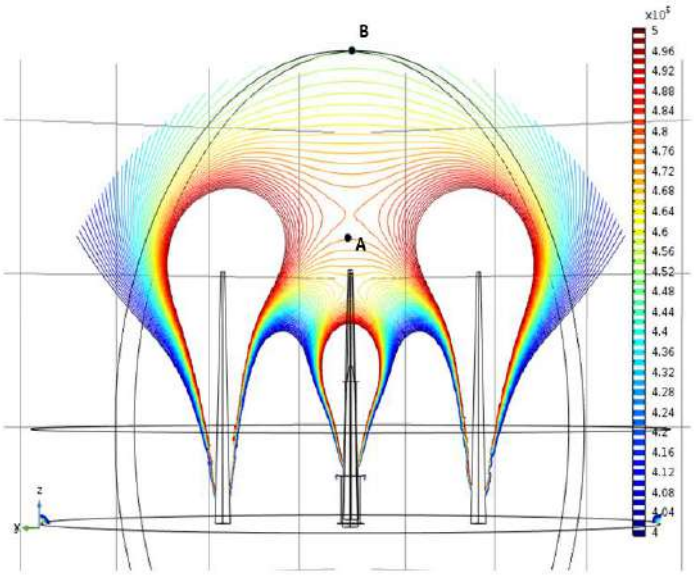


Рис. П.5 – Иллюстрация примера возможности перехвата молнии ракетоносителем при случайной флуктуации напряженности поля и соответственного увеличения длины стримеров.

Однако, даже в случае 5%-м случайного скачка напряженности поля в этой области, минимальное значение в ней оказывается больше чем E_{cr} , и стример, возникший на головке ракеты носителя будет перемещаться вплоть до точки B (в которой после 5% повышения напряженность окажется равной E_{cr}).

В этом случае он будет как бы «перехватывать» ориентацию нисходящего лидер у стримеров, возникших на верхушках молниезащитных мачт космодрома.

Таким образом, в вероятностной модели пробоя длинной искры случайный характер пробоя и взаимное влияние близкорасположенных наземных конструкций могут быть учтены на уровне решения электростатической задачи и не требуют детального рассмотрения физики пробоя.

Дальнейший расчет вероятности попадания в ту или иную область при этом требует численного моделирования. Так как стохастичность процесса уже учтена при задании вероятностного характера скачков пробивного напряжения (и соответствующей напряженности поля) то дальнейший алгоритм может быть детерминирован. Так, например, можно считать, что после случайного скачка напряженности активным оказывается тот стример, головка которого находится на минимальном расстоянии от головки нисходящего лидера. Он перехватывает его ориентировку и формирует длинную искру.

В этом алгоритме случайные скачки напряженности в локальной близости от возможных точек попадания могут считаться независимым. Однако, даже в этом случае алгоритм требует многократного численного пересчета длин стримеров и достаточно

сложен. Поэтому наиболее приемлемым методом оценки такой вероятности является натурный эксперимент с масштабным макетом.

В силу геометрического подобия полей, возникающих при одинаковых (на макете и на объекте) относительных скачках напряженности, изолинии E_{cr} также окажутся подобны. А это означает, что совпадут и относительные длины стримеров, генерируемых этими скачками. Поэтому относительные вероятности попадания молнии в различные области будут также совпадать для макета и объекта.

П.5.1 Предварительные экспериментальные исследования

П.5.1.1 Пробой в плоскую поверхность

На рис. П.6 показаны результаты макетного эксперимента, в котором исследовалась стохастичность мест попадания длинной искры в плоскую поверхность.

В этом эксперименте варьируется высота расположения конца электрода над плоской поверхностью. На него подается плавно повышающееся напряжение и фиксируется точка попадания длинной искры в нижний плоский электрод. Как видно из рисунка, полученные результаты позволяют (при достаточно большом количестве испытаний) определить функцию распределения $\omega_h\left(U_f;\ \vec{r}_i\right)$ для каждой из высот $h(\vec{r}_{sl})$ расположения конца верхнего электрода.

Специфика проводимого эксперимента заключается в том, что для плоской поверхности все возможные точки попадания находятся в равных условиях, а распределение напряженности электростатического поля над поверхностью может быть задано аналитически (при известных значениях U_f и h). Используя это выражение для связи случайных параметров пробоя $E_{r_0} = E_{cr}$ и $r_0(E_{cr})$, мы можем, как проверить адекватность используемой стохастической модели (П.5), так и определить ее параметры E_{cr} и σ_{fE}^2 из эксперимента.

В процессе решения электростатической задачи, принимается, что головка нисходящего лидера, обладающая зарядом q, находится на высоте h над бесконечной проводящей плоскостью. Тогда, используя

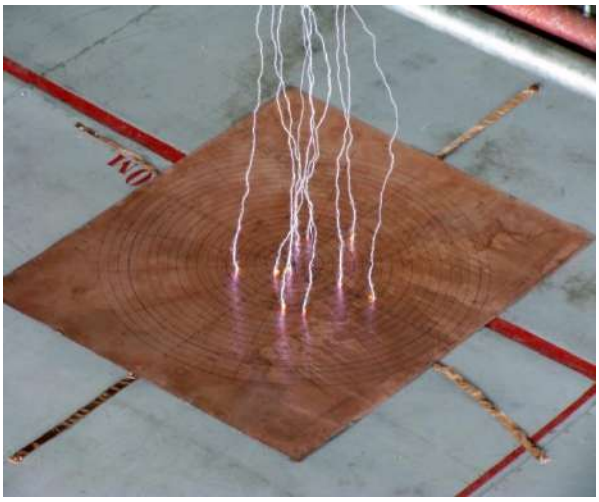


Рис. П.6 - Эксперименты по определению функции распределения мест попадания длинной искры в плоскую поверхность

метод электростатических изображений рассчитывается невозмущённое поле около плоскости, значение которого будет:

$$E_r = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0}\frac{h}{(h^2+r^2)^{3/2}}, \qquad (П.7)$$

где r – расстояние в горизонтальной плоскости от точки симметрии. Вводим величину $\omega(E)ds$ – вероятность того, что за единицу времени на участке площадью ds за счёт флуктуаций будет достигнуто поле E. Предполагаем, что это распределение – гауссово (за постоянным коэффициентом перед гауссоидой дальше следить не будем, поскольку для результата будут важны только соотношения вероятностей).

$$\omega(E) \propto exp\left\{-\frac{(E-E_r)^2}{\sigma^2}\right\} \qquad (П.8)$$

Для небольшого участка поверхности в точке r площадью ds вероятность того, что поле в ней превысит пороговое значение E_{cr}, пропорционально интегралу

$$\rho_r(E > E_{cr}) = \int_{E_{cr}}^{\infty} \omega(E)dE \propto erfc\left(\frac{E_{cr}-E_r}{\sigma}\right), \qquad (П.9)$$

где $erfc(x)$ – дополняющая функция ошибок.

Разобьём всю поверхность на концентрические кольца ширины dr вокруг центральной точки. Вероятность того, что за малый интервал времени от t до $t + dt$ точка пробоя окажется в этом кольце, пропорциональна произведению вычисленной выше вероятности на площадь кольца, а значит, зависимость этой плотности вероятности от r имеет вид:

$$d\rho(r) \propto r \times erfc\left(\frac{E_{cr}-E_r}{\sigma}\right)dt, \qquad (П.10)$$

где E_r подставляется из первой формулы.

Пусть $P_0(t)$ – вероятность того, что к моменту времени t не произошло ни одного пробоя. Тогда вероятность пробоя в кольцо dr за всё время равна

$$P(r) = \int_0^\infty P_0(t)d\rho(r) = \int_0^\infty P_0(t) \times r \times erfc\left(\frac{E_{cr}-E_r}{\sigma}\right)dt \quad (П.11)$$

Как видим, независящая от времени часть выносится из-под интеграла, а оставшаяся, по определению, даёт интеграл единицу. Таким образом, финальное выражение для вероятности пробоя на расстоянии r от центра имеет тот же вид, что и плотность этой вероятности за единицу времени (10), а коэффициент пропорциональности определяется из нормировки плотности вероятности: $\int_0^\infty P(r)dr = 1$. Сравнивая последнее выражение с результатами эксперимента, подбираем параметры E_{cr} и σ.

Заметим, что входящий в формулу (7) параметр высоты заряда h соответствует конечному положению нисходящего лидера, после которого, в соответствии с нашим предположением, возникает встречный лидер, определяющий ориентацию нисходящего лидера. Но в рассматриваемом случае на любой из высот напряжение между электродами повышают до возникновения пробоя.

Для достаточно большой высоты $h' > h$ нисходящий лидер возникает до того, как напряженность поля на поверхности пластины превысит критическую хотя бы в одной точке. До этого момента его движение хаотично, но не зависит от текущего положения головки. Если случайное отклонение от вертикали за один скачок не зависит от высоты его расположения над плоским электродом, то отклонение от центра описывается формулой случайных блужданий (двумерного броуновского движения).

$$\rho(x(z)=x) \propto e^{-\frac{X^2}{2\sigma_0^2(h'-h)}}; \quad \rho(y(z)=y) \propto e^{-\frac{Y^2}{2\sigma_0^2(h'-h)}} \qquad (П.12)$$

Здесь изначально в качестве аргумента функций входило время движения t, но, предполагая в среднем постоянную скорость вертикального движения стримера, заменяем его на путь $\Delta h = (h' - h)$ нисходящего лидера до той высоты h, на которой происходит «выбор» точки попадания.

Следовательно, дисперсия (среднеквадратичное отклонение от центра) координаты начального хаотического движения лидера рассчитывается по законам броуновского движения, и является линейным:

$$D_0(z) = \langle r(\Delta h)^2 \rangle = \langle x(\Delta h)^2 \rangle + \langle y(\Delta h)^2 \rangle = 4\sigma_0^2(\Delta h) \qquad (П.13)$$

Тогда все выражения для распределения вероятности выходной точки встречного стримера остаются справедливыми, но отсчитываются от смещённого с такой дисперсией центра координат (поскольку все параметры задачи однородны в плоскости). Независимость этих двух смещений, по законам суммирования случайных величин, означает независимость и обычное суммирование их дисперсий:

$$D(h) = 4\sigma_0^2(h' - h) + D_1, \qquad (П.14)$$

здесь h' - высота расположения конца верхнего электрода, h – высота расположения головки нисходящего лидера, на которой происходит «выбор» точки попадания, D_1 – дисперсия конечной траектории стримера, определяющаяся из формулы (П11).

Поэтому зависимость дисперсии распределения точек попадания искры от высоты расположения конца электрода должна иметь вид смещённой от начала координат линейной функции, по наклону и смещению которой можно определить параметры σ_0^2 и $(4\sigma_0^2 h + D_1)$.

Поскольку точность вычисления дисперсии на каждой высоте определяется количеством измерений, на практике эта зависимость будет линейной только приближённо, и должна быть интерполирована. Характерный вид такой экспериментальной

зависимости показан на рис. П 7. Более точный анализ параметров модели будет сделан после проведения дополнительных экспериментальных исследований.

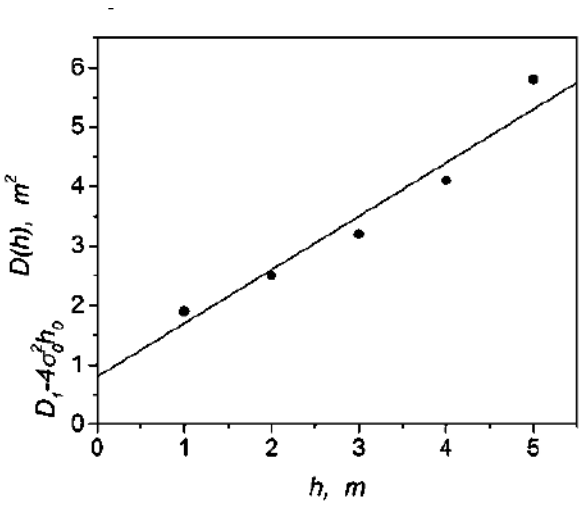


Рис. П.7 – Иллюстративный график результатов эксперимента по определению параметров модели

Дополнительно, используя априорно заданное значение, можно оценить параметры σ_0^2, h и D_1 для распределений (П.11) и (П.12).

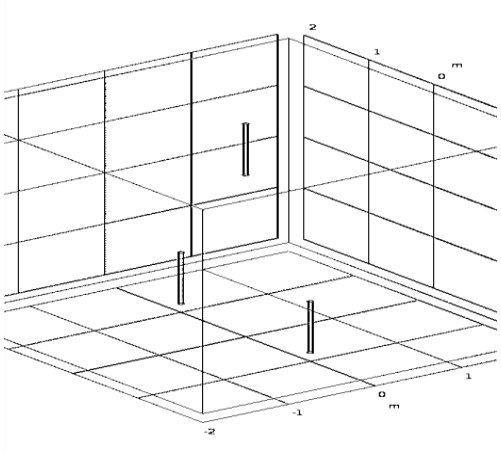
При оптимально подобранных значениях стохастической модели погрешности определения этих параметров могут быть определены путем сравнения теоретических и экспериментальных данных ширины распределения точек попадания от высоты верхнего электрода. Таким образом, проведенный эксперимент и анализ его результатов позволяет подтвердить адекватность используемых в модели приближений и оценить погрешность, связанную с этими приближениями.

П.5.1.2. Пробой в близко расположенные конструкции

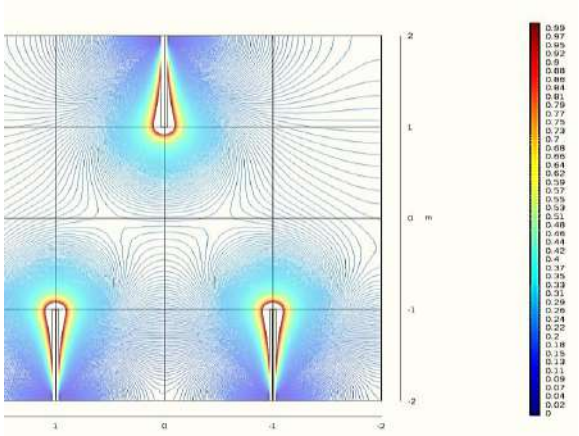
Рассмотренный выше эксперимент не в полной мере отражает используемую нами модель пробоя, так как напряженность электростатического поля растет по мере удаления от плоского электрода. В связи с этим, возникший в той или иной точке поверхности стример (при выполнении условия $E(\vec{r_i}) \geq E_{cr}$) далее уже не затухает и идет на сближение с нисходящим лидером. Поэтому концепция случайной длины стримера в этой модели теряет свою актуальность.

В связи с этим мы рассмотрели также модель пробоя в две близко расположенные конструкции. В этом случае уже не удается получить простое аналитическое выражение для напряженности электростатического поля. Поэтому использовались результаты численного счета, полученные в пакете COMSOL 3.5.

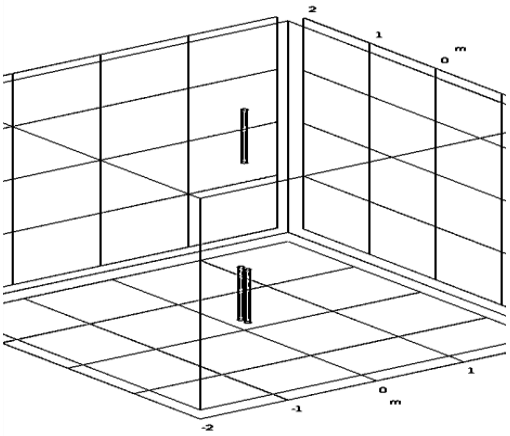
На рис. П.8 показана геометрии рассчитываемых систем электродов и соответствующие им распределения изолиний напряженности электростатического поля, которые хорошо совпадают с результатами экспериментов, описанных в [П3] (см. рис. П.9).



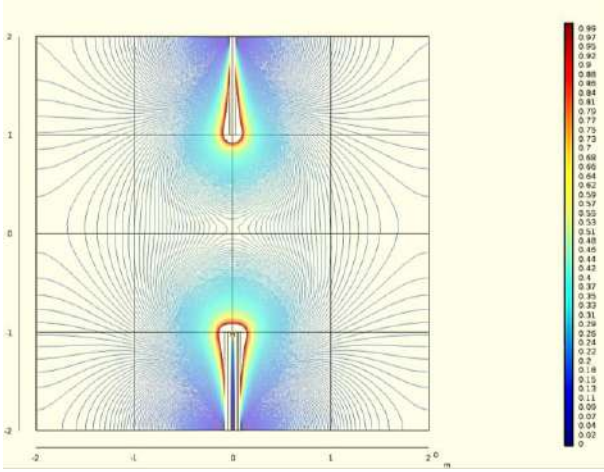
а)



б)



в)



г)

Рис. П.8 - Геометрии рассчитываемых систем электродов (а, в) и соответствующее им распределение изолиний напряженности электростатического поля (б, г)

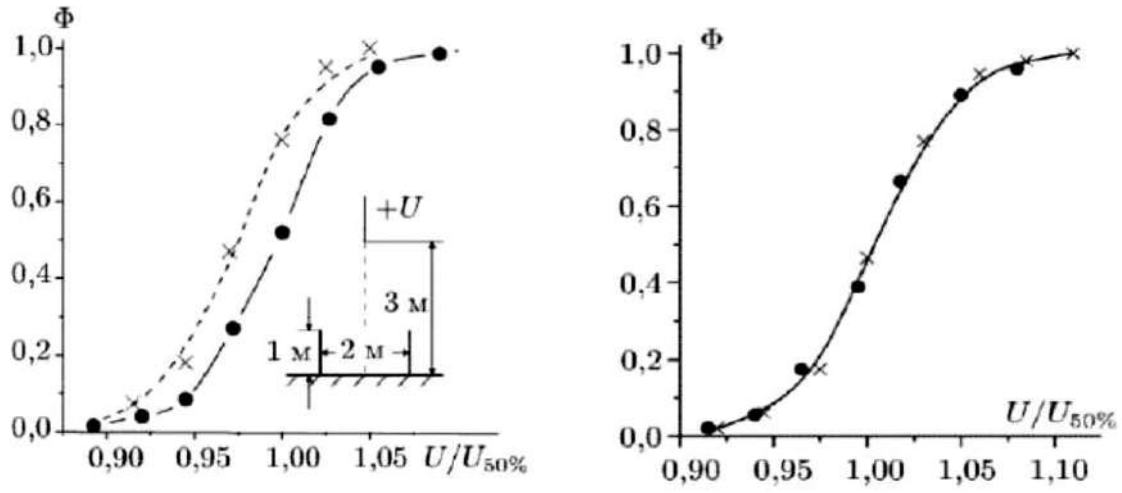


Рис. П.9 – Результаты эксперимента по исследованию распределения пробивного напряжения для системы взаимосвязанных электродов [П.3].

В соответствии с разработанной моделью мы полагаем, что:

– На остриях нижних электродов под воздействием внешнего поля возникает высокая напряженность, которая приводит к образованию стримерной «подушки».

– Длина этих стримеров является случайной величиной, которая определяется напряженностью поля $E_{cr} = 4.65\ kV/sm$.

– В отсутствии флуктуаций решение электростатической задачи дает нам границу концов стримеров.

– Если средняя напряженность между концом стримера и верхним электродом превышает пороговое значение E_0 (согласно [П.7] $E_0 = 5.00\ kV/sm$), происходит финальная стадия пробоя («final jump»).

– При наличии флуктуаций напряженности электростатического поля (описано выше) положение концов стримеров и образует «облако» вероятных точек.

– Для первого из стримеров, между концом которого и верхним электродом окажется выполнено условие «final jump», происходит «выбор» и дальнейшие стадии пробоя (включая возможное образование встречного лидера, его сближение с нисходящим лидером в реальной молнии).

Точный расчет вероятностей пробоя при различных напряжениях и сравнение с экспериментом требуют разработки

специального алгоритма и его программирования. Это планируется сделать на заключительном этапе работы.

П.5.2 Анализ погрешностей макетного моделирования

Источниками погрешностей при проведении макетного моделирования могут служить несколько факторов:

– Погрешности, связанные с неполным соответствием физических процессов, происходящих при пробое молнии и искры в макетном эксперименте.

– Погрешности экспериментального определения вероятностей на макете.

– Погрешности оценки численных параметров, входящих в используемую модель.

– Погрешности математических вычислений, необходимых для получения окончательного результата макетирования.

Проанализируем каждый из этих источников погрешности по отдельности.

П.5.2.1 Погрешности, связанные с неполным соответствием физических процессов, происходящих при пробое молнии и искры в макетном эксперименте

Это основной источник погрешностей, о неизбежности которого было сказано выше. Тем не менее, вносимая им погрешность может быть оценена и сведена к минимуму выбором оптимальных параметров моделирования. В описанной выше методике проведения эксперимента такими параметрами являются:

– Высота расположения плоскости конца верхнего электрода;

– Характерное время нарастания напряжения на электроде;

– Выбор максимального значения напряжения, обеспечивающего 50% или 90%-й или др. пробой межэлектродного пространства.

Как следует из анализа соответствия физических процессов, связанных с пробоем молнии или длинной искры, основной стадией пробоя, влияющей на погрешность моделирования, является стадия «выбора» нисходящим лидером встречного лидера и их последующей ориентировки.

Для оценки степени соответствия этой стадии в реальной молнии и модели (и связанной с этим погрешности) предлагается следующая методика:

– Сбор экспериментальных данных (или использование ранее полученных данных) вероятности попадания молнии в наземную конструкцию

– Моделирование этой конструкции и ее масштабного макета в среде COMSOL 3.5.a.

– Проведение экспериментальных исследований распределения вероятности попадания длинной искры на макете.

– Оптимизация параметров модели для наилучшего совпадения расчетных данных с экспериментальными

- для реальной конструкции

- для макета

– Оценка погрешности, вызванной перенесением параметров модели, полученных для макета, на модель реального объекта.

Фактически, эта методика позволяет предсказать, насколько данные макетных исследований (после их математической обработки и адаптации параметров) можно будет использовать для предсказания вероятности попадания молнии в реальный объект (для которого оптимальные параметры модели нам неизвестны).

По предварительным (качественным) оценкам эта погрешность не будет превышать разброса пробивных напряжений (5-10%). Окончательная оценка погрешностей этого рода будет проведена после получения необходимых экспериментальных результатов.

П.5.2.2 Погрешности экспериментального определения вероятностей на макете

Этот источник погрешностей связан с параметрами точности аппаратуры, используемой при измерениях и количеством испытаний, необходимых для оценки вероятности.

Для оценки этого количества будем полагать, что разброс значений количества попаданий в ту или иную область макета описывается нормальным распределением. Тогда при среднем количестве попаданий пробоя в i-ю область $\overline{N_i} = \omega_i N$ флуктуацию этого количества можно оценить, как $\delta N_i \approx \sqrt{\overline{N_i}}$. Ошибка в расчете

вероятности ω_i при такой флуктуации составит $\delta\omega_i = \frac{\delta N_i}{N} = \left(\sqrt{\omega_i}\right)\frac{1}{\sqrt{N}}$.

Если, например, вероятность попадания в «защищенные» части наземных конструкций ω_i не должна превышать 0.1%, то для оценки этой вероятности с точностью, не хуже $\delta\omega_i$ = 10% необходимо зафиксировать не менее N' случаев пробоя в наземную конструкцию, где

$$10^{-4} = \sqrt{10^{-3}}\frac{1}{\sqrt{N'}}, \qquad \text{откуда } N' \approx 10^5$$

П.5.2.3 Погрешности оценки численных параметров, входящих в используемую модель

Ранее [П7, П8] была показана возможность экспериментально-теоретической оценки погрешностей параметров модели. Используя формулы (П7-П14) можно оценить и влияние этих погрешностей на погрешность окончательного результата (оценки вероятностей пробоя молнии в ту или иную зону).

П.5.2.4 Погрешности математических вычислений, необходимых для получения окончательного результата макетирования

В рамках предложенной методики расчета использованы как результаты численного моделирования (модели в пакете COMSOL 3.4)), так и аналитические расчеты. Так как решение ограничено электростатической задачей и последующим расчетом стационарных вероятностных распределений, компьютерных ресурсов (оперативной памяти и т.п.) достаточно, чтобы обеспечить необходимую точность этих вычислений. Их погрешность на порядок меньше наибольшей из остальных погрешностей, следовательно, ее вкладом можно пренебречь.

Окончательная оценка погрешности макетных экспериментов и последующего их пересчета на реальный объект будет проведена после получения достаточного объема экспериментальных данных.

Следует отметить, что материалы этого приложения получены в результате научного сотрудничества с Мельником Сергеем Ивановичем, частично опубликованных в работах [П7, П8].

Выводы

Получены следующие результаты:

1. Проанализированы проблемы согласования существующих моделей различных стадий развития молниевого разряда при макетных испытаниях.

2. Показано, что модели развития молнии и длинной искры можно согласовать по отдельности для трех стадий:

– Этап движения головки верхнего лидера до начала образования встречных лидеров.

– Этап «ориентации» движения головки верхнего лидера за счет притяжения зарядами встречных лидеров.

– Этап окончательного пробоя между сблизившимися головками встречных лидеров («final jump»).

3. Разработана модель распределения положения головки нисходящего лидера до стадии «выбора и захвата».

Обосновано подобие масштабного макетирования разряда молнии на стадии ориентировки нисходящего лидера одним из восходящих.

4. Разработана методика адаптации макетного эксперимента в рамках вероятностной модели.

5. Проанализированы результаты предварительных экспериментальных исследований для двух случаев:

– Пробой в плоскую поверхность.

– Пробой в близко расположенные конструкции.

6. Проанализированы источники погрешностей при макетном моделировании вероятности пробоя и предложены методы их оценки.

7. Исследования привели к формулировке гипотезы о влиянии на выбор места удара молнии «седловой точки», которая оправляется из картины распределения силовых линий в электростатической постановке задачи. Подтверждение гипотезы планируется путем сравнения с результатами масштабных экспериментов.

Литература к приложению главы 2

П.1. Э. М. Базелян, Ю. П. Райзер, “Механизм притяжения молнии и проблема лазерного управления молнией”, УФН, 170:7 (2000), 753–769 / E. M. Bazelyan, Y. P. Raizer, “The mechanism of lightning attraction and the problem of lightning initiation by lasers”, Phys. Usp., 43:7 (2000), 701–716.

П.2. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Искровой разряд. Москва, изд-во МФТИ, 1997 г., 320 стр.

П.3. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. —320 с.

П.4. Ю. П. Райзер. Физика газового разряда. М.: Наука, Физматлит, 1987, 1992; Издательство Интеллект, Долгопрудный, 2009.

П.5. Молния и молниезащита / Г. Н. Александров ; Отв. ред. В. Н. Козлов ; Рос. акад. наук, Институт электрофизики и электроэнергетики . – М. : Наука, 2008. – 274 с.

П.6.Lightning Electromagnetics. Vernon Cooray. The Institution of Engineering and Technology; 1st edition (June 12, 2012) 976 pp.

П.7. Kniaziev V., Mel’nik S. Methodology of Computer Simulation of Lightning Electromagnetic Phenomena Action on the Elements of the Spaceport. Proceeding of 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 2018. Odessa. P. 44-49. IEEE Catalog Number: CFP18587-USB ISBN: 978-1-5386-2467-8.

П.8. Kniaziev V., Mel’nyk S. Adequacy of the Results of Determining the Probability of Damage by a Direct Shock of Lightness of a Ground-Door Design by Means of Tests on a Scale Model. Proceeding of 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week, Volume 4 on 2020 IEEE 10th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). – Kharkiv, 2020. -1049-1055 p.

Дополнительная литература к приложению главы 2

Rakov, V.A. and M.A. Uman, Review and evaluation of lightning returnstroke models including some aspects of their application, *IEEE Transactionson Electromagnetic Compatibility*, 1998; 40 (4): 403–26

Rachidi, F., V.A. Rakov, C.A. Nucci and J.L. Bermudez, The effect of vertically-extended strike object on the distribution of current along the lightningchannel, *Journal of Geophysical Research*, 2002; 107 (D23):4699.

Podgorski, A.S. and J.A. Landt, Numerical analysis of the lightning-CN towerinteraction, in 6th Symposium and Technical Exhibition on ElectromagneticCompatibility, Zurich, Switzerland, 1985.

Heidler, F. and T. Zundl, Influence of tall towers on the return stroke current,Presented at Aerospace and Ground Conference on Lightning and StaticElectricity, Williamsburg, VA, 1995.

Baba, Y. and M. Ishii, Numerical electromagnetic field analysis of lightningcurrent in tall structures, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2001;**16**(2):324–8.

Kordi, B., R. Moini, W. Janischewskyj, A. Hussein, V. Shostak and V.A. Rakov, Application of the antenna theory model to a tall tower struck by lightning, *Journal of Geophysical Research*, 2003;**108**(D17), doi:10.1029/2003JD003398

Harrington, R.F., *Field Computation by Moment Methods*, New York: IEEE & Wiley, 1993.

Visacro, S. and F.H. Silveira, Evaluation of lightning current distribution along the lightning discharge channel by a hybrid electromagnetic model, *Journal of Electrostatics*, 2004; 60:111–120.

Silveira, F.H., S. Visacro and A.R. De Conti, Lightning effects on the vicinity of elevated structures, in International Conference on Lightning Protection, Avignon, France, 2004.

Zundl, T., Lightning current and LEMP calculations compared to measurements gained at the Peissenberg tower, in 22nd International Conference on Lightning Protection, Budapest, Hungary, 1994.

Guerrieri, S., F. Heidler, C.A. Nucci, F. Rachidi and M. Rubinstein, Extension of two return stroke models to consider the influence of elevated strike objects on the lightning return stroke current and the radiated electromagnetic field: comparison with experimental results. EMC ’96 ROMA. International Symposium on Electromagnetic Compatibility. Univ. Rome ‘La Sapienza’, Rome, Italy, vol. 2, 1996.

Guerrieri, S., C.A. Nucci, F. Rachidi and M. Rubinstein, On the influence of elevated strike objects on directly measured and indirectly estimated lightning currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1998;**13**(4):1543–55.

Guerrieri, S., E.P. Krider and C.A. Nucci, Effects of traveling-waves of current on the initial response of a tall Franklin Rod, in International Conference on Lightning Protection, Rhode, Greece, 2000 908 *Lightning electromagnetics.*

Rusan, I., W. Janischewskyj, A.M. Hussein and J.-S. Chang, Comparison of measured and computed electromagnetic fields radiated from lightning strikes to the Toronto CN tower, in 23rd International Conference on Lightning Protection, Florence, 1996.

Motoyama, H., W. Janischewskyj, A.M. Hussein, R. Rusan, W.A. Chisholm and J.S. Chang, Electromagnetic field radiation model for lightning strokes to tall structures, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1996;**11**(3):1624–32

Rachidi, F., W. Janischewskyj, A.M. Hussein, C.A. Nucci, S. Guerrieri, B. Kordi, *et al.*, Current and electromagnetic field associated with lightning return strokes to tall towers, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2001;**43**(3):356–67.

Janischewskyj, W., V. Shostak and A.M. Hussein, Comparison of lightning electromagnetic field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower 1. Magnetic field, in 24th International Conference on Lightning Protection, Birmingham, UK, 1998.

Janischewskyj, W., V. Shostak and A.M. Hussein, Lightning electric field characteristics of first and subsequent return strokes to a tall tower, *11th International Symposium on High Voltage Engineering*, 1999, vol. 467, no. 5, pp. 270–74.

Shostak, V., W. Janischewskyj, A. Hussein and B. Kordi, Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower: a model that accounts for upwardconnecting discharges, in 25th International Conference on Lightning Protection, Rhodes, Greece, 2000.

Shostak,V., W. Janischewskyj,A.M. Hussein, J.S. Chang and B. Kordi, Returnstroke current modeling of lightning striking a tall tower accounting for reflections within the growing channel and for upward-connecting discharges, in 11th International Conference on Atmospheric Electricity, Guntersville, AL, 1999.

Goshima, H., A. Asakawa, T. Shindo, H. Motoyama, A. Wada and S. Yokoyama, Characteristics of electromagnetic fields due to winter lightning stroke current to a high stack, *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Part B*, 2000;**120**(1):44–9.

Bermudez, J.L., M. Rubinstein, F. Rachidi, F. Heidler and M. Paolone, Determination of reflection coefficients at the top and bottom of elevated strike objects struck by lightning, *Journal of Geophysical Research*, 2003; **108**(D14):4413, doi: 10.1029/2002JD002973.

Bermudez, J.L., F. Rachidi, W. Janischewskyj, V. Shostak, M. Rubinstein, D. Pavanello, *et al*., Far-field – current relationship based on the TL model for lightning return strokes to elevated strike objects, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2005;**47**(1):146–59.

Baba, Y. and V.A. Rakov, Lightning electromagnetic environment in the presence of a tall grounded strike object, *Journal of Geophysical Research*, 2005;**110**, doi: 10.1029/2004JD005505.

Rachidi, F. and C.A. Nucci, On the Master, Uman, Lin, Standler and the modified transmission line lightning return stroke current models, *Journal of Geophysical Research*, 1990;**95**(D12):20389–94.

ГЛАВА 3 ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

3.1 Генераторы импульсных напряжений

Для проведения испытаний ЛА высоким импульсным напряжением в основном используются генераторы импульсных напряжений (ГИН) емкостного типа (рис. 3.1), собранных по схеме Аркадьева-Маркса.

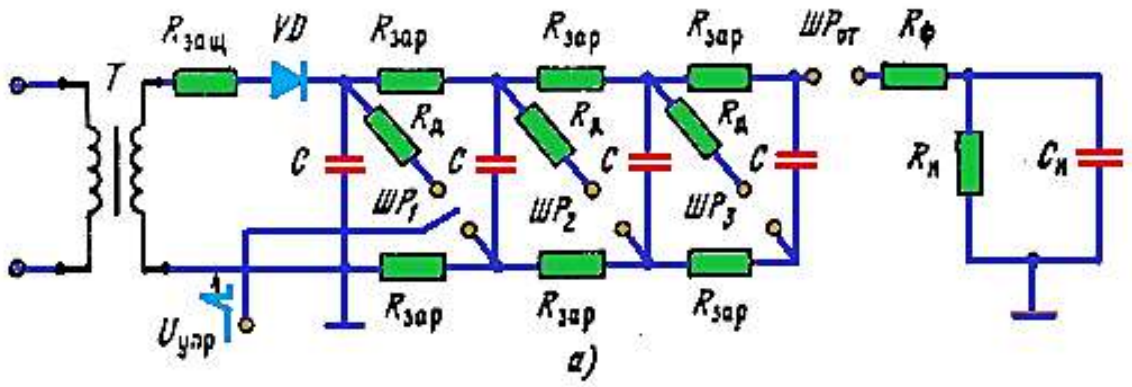


Рис. 3.1 – Принципиальная электрическая схема трехступенчатого генератора импульсных напряжений Аркадьева-Маркса

Работа ГИН основана на принципе умножения напряжения на выходе генератора в процессе перекоммутации с помощью искровых разрядников (ШР) с параллельно включенных для заряда конденсаторов С на их последовательное соединение. В результате на последней ступени ГИН будет формироваться высокое напряжение равное nU (где n – число конденсаторов ГИН, а U – величина зарядного напряжения одного конденсатора С). Заряд конденсаторов осуществляется через зарядные сопротивления $R_{зар}$.

На выходе ГИН включена нагрузка в виде емкости $C_н$ в которую входят емкость объекта испытания и измерительных средств. Для варьирования временных параметров импульса выходного напряжения в схему формирования ГИН вводятся фронтовой резистор $R_ф$ и резистор нагрузки $R_н$.

Длительность фронта импульса $\tau_ф$ и длительность импульса $\tau_и$ на выходе ГИН связаны с параметрами генератора следующими соотношениями: $\tau_ф \approx 2{,}3C_н R_ф$ и $\tau_и \approx 0{,}7CR_н / n$.

Генераторы импульсных напряжений позволяют формировать испытательные волны высокого напряжения, формы которых приведены на рис. 1.1. Для получения срезанных на фронте импульсов высокого напряжения (рис. 1.1 а) и максимуме (рис. 1.1 в) в схему формирования (рис. 3.1) параллельно нагрузке включают разрядник с требуемой величиной пробивного напряжения.

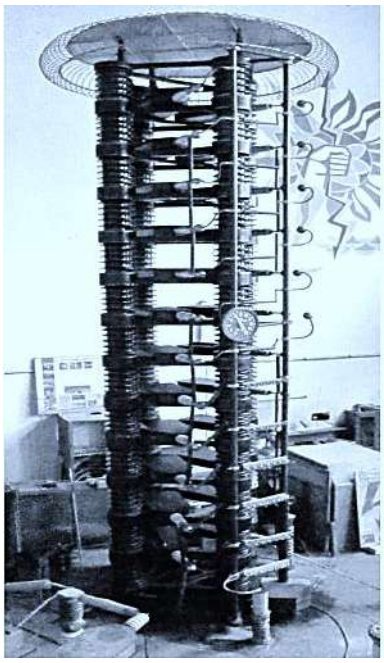
На практике встречаются конструкции ГИН лестничного, спирального, колонкового и этажерочного типа. Наибольшее распространение получила конструкция ГИН этажерочного типа (рис. 3.2).

Рис. 3.2 – Классическая конструкция ГИН этажерочного типа. с рабочим напряжением 1,2 МВ разработки НИПКИ «Молния» (Украина)

В странах СНГ разработчиком и создателем ГИН являлся, и в настоящее время остается, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт (НИПКИ) «Молния» Национального

технического университета «Харьковский политехнический институт» (рис. 3.3).

а)



б)

в)

г)

д)

е)

Рис. 3.3 – Генераторы импульсных напряжений разработки НИПКИ «Молния» (Украина)
а – ГИН 1,2 (1,2 МВ); б – ГИН 2,5 (2,5 МВ); в – ГИН 3 (3 МВ);
г – ГИНТ 4 (4 МВ, 120 кА); д – ГИН 14 (14 МВ); ГИН 5 (5МВ).

3.2 Генераторы импульсных токов

Для грозовых испытаний (воспроизведения и формирования токов молнии) широкое распространение получили генераторы импульсных токов (ГИТ) емкостного типа. В этих генераторах энергия запасается в конденсаторах в виде энергии электрического поля. Процесс заряда конденсаторов происходит от маломощного источника постоянного напряжения, а разряд вызывается подключением нагрузки через коммутирующее устройство – обычно высоковольтный разрядник.

На рис. 3.4 приведена эквивалентная электрическая схема одного модуля ГИТ, который состоит из емкостей накопителя C_n, высоковольтного коммутатора *P,* в суммарную индуктивность *L* включены внутренняя индуктивность накопителя, индуктивность нагрузки и индуктивность соединительных шин, то же относится и к сопротивлению $R_н$.

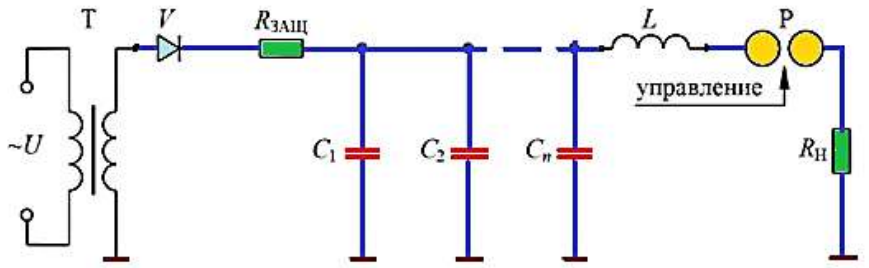


Рис. 3.4 – Эквивалентная электрическая схема ГИТ.

Универсальность ГИТ заключается в широком диапазоне возможности варьирования режимов его работы в зависимости от требуемой формы волны тока - от колебательной до апериодической,

Генераторы импульсных токов позволяют формировать испытательные волны тока, приведенные на рис. 1.3 – 1.8.

На рис. 3.5 показан общий вид генератора импульсных токов ГИТ-100/70 на 100 кА.

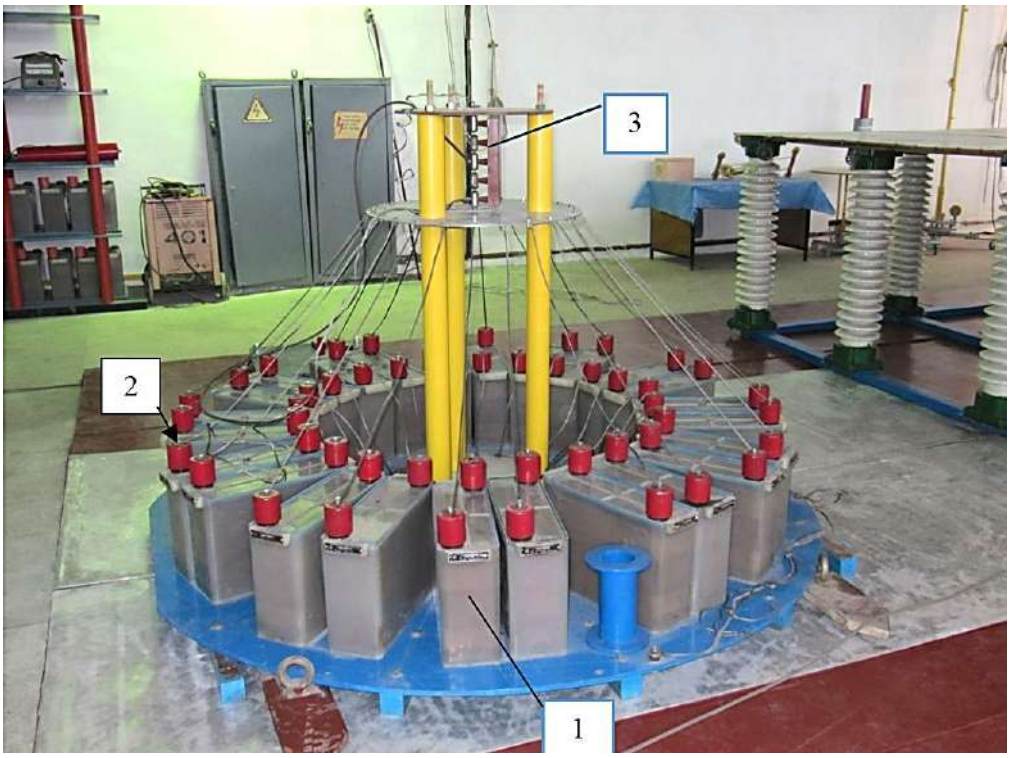
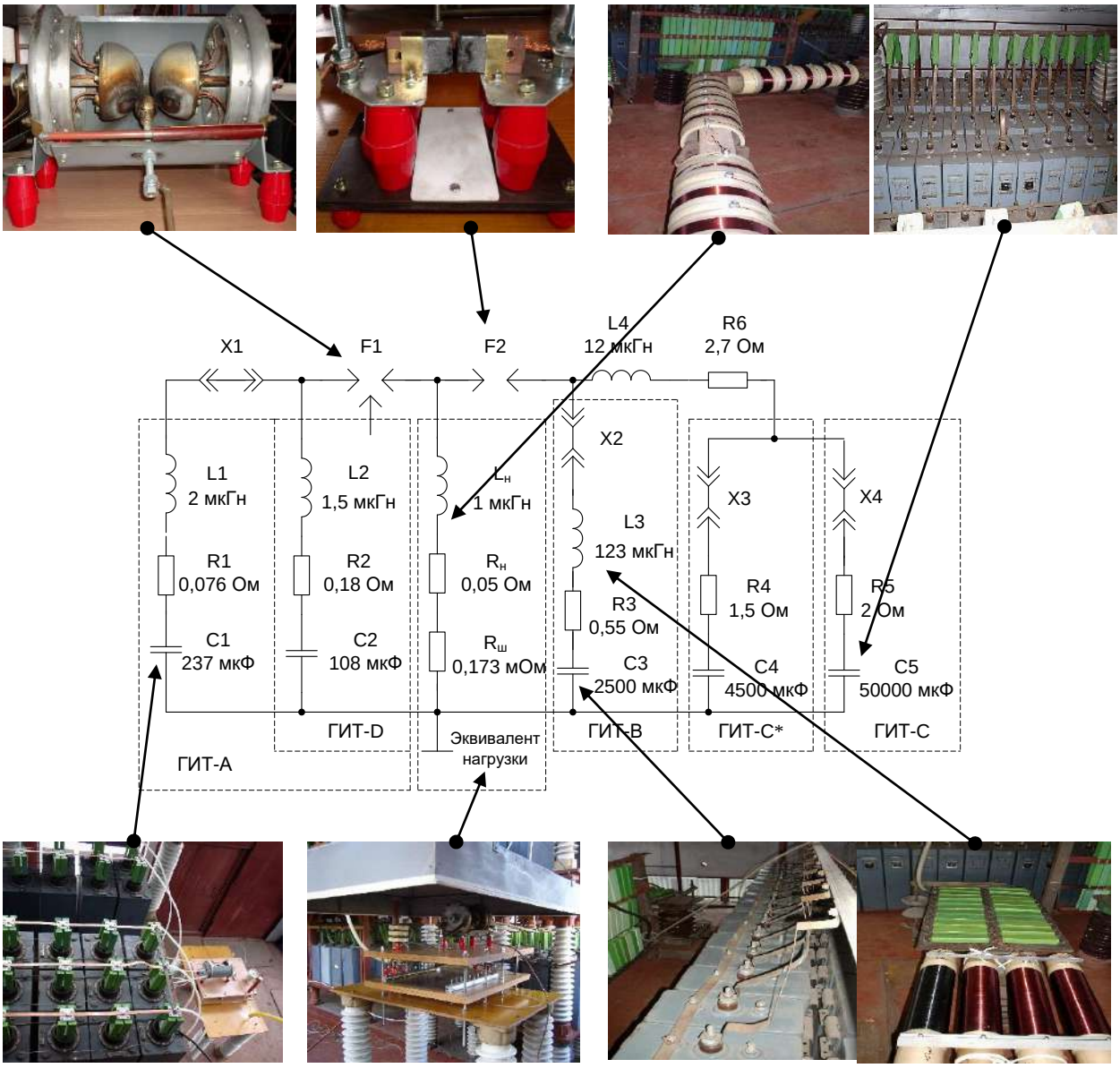


Рис. 3.5 – Общий вид генератора импульсных токов ГИТ-100/70 на 100 кА разработки НИПКИ «Молния» (Украина)
1 – конденсатор; 2 – демпфирующий резистор;
3 – многозазорный разрядник.

Получение полного тока молнии, включающего в себя формы сигнала, состоящего из различных по своим амплитудно-временным параметрам компонент **A, B, C** и **D** (рис. 1.2, табл. 1.2) для оценки прямого его воздействия на ЛА и регламентированные SAE ARP5412 [3.1] требует компиляции нескольких по своей структуре ГИТ в единую систему.

В качестве примера на рис. 3.6 приведена принципиальная электрическая схема уникального ГИТ-200, разработанного и созданного в НИПКИ «Молния» (Украина) для формирования полной волны тока молнии для испытаний объектов РКТ, самолетов и вертолетов на прямое воздействие полной волны тока молнии.

а)



б)

Рис. 3.6 – Общий вид (а) и принципиальная схема (б) ГИТ-200 для воспроизведения полного тока молнии с предельными параметрами.

3.3 Генераторы импульсных электромагнитных полей

Для воспроизведения электрических, магнитных (электромагнитных) полей грозовых разрядов используют специальные генераторы (имитаторы) электромагнитных полей, состоящих из источников высокого напряжения (тока) и системы полеобразования.

В зависимости от требований и специфики проведения испытаний эти генераторы могут либо воспроизводить отдельно электрическую или магнитную составляющую грозовых полей, либо генерировать напряженности электромагнитных полей излучения молнии (ГЭМИ).

Как правило, в качестве высоковольтных источников таких генераторов, в зависимости от требований к условиям испытаний, используют генераторы импульсных напряжений, тока или их комбинацию.

В качестве полеобразующих систем применяют [3.2]:

- для получения электрических полей системы в виде воздушного конденсатора, одним из электродов которого является эталонная плоскость земли, а вторым (высоковольтным) должен быть электрод, имеющий форму электрода Роговского;
- для получения магнитных полей используют индукционную систему в виде колец Гельмольца;
- для получения электромагнитных полей ГЭМИ используют системы типа ТЕМ-камер или открытых полосковых линий, обеспечивающих формирование в своем рабочем объеме плоской электромагнитной волны с соотношением амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей, равной $E/H = 120\pi$ Ом.

На рис. 3.7 и 3.8 приведены имитаторы специальной конструкции, которые подразделяются на два вида:

- имитаторы с раздельным формированием компонент электрического и магнитного полей;
- имитаторы с комплексной нагрузкой.

Имитаторы с раздельным формированием компонент электрического и магнитного полей грозовых разрядов строятся по принципу объединения двух систем полеобразования – катушек Гельмгольца для создания напряженности импульсного магнитного поля и воздушного конденсатора для создания напряженности

импульсного электрического поля с раздельным питанием от генераторов импульсов тока и напряжения соответственно (рис. 3.7).

Такой имитатор может работать как на совместное формирование электрического и магнитного поля с требуемыми параметрами, так и на раздельное формирование этих компонент с различными их амплитудными значениями.

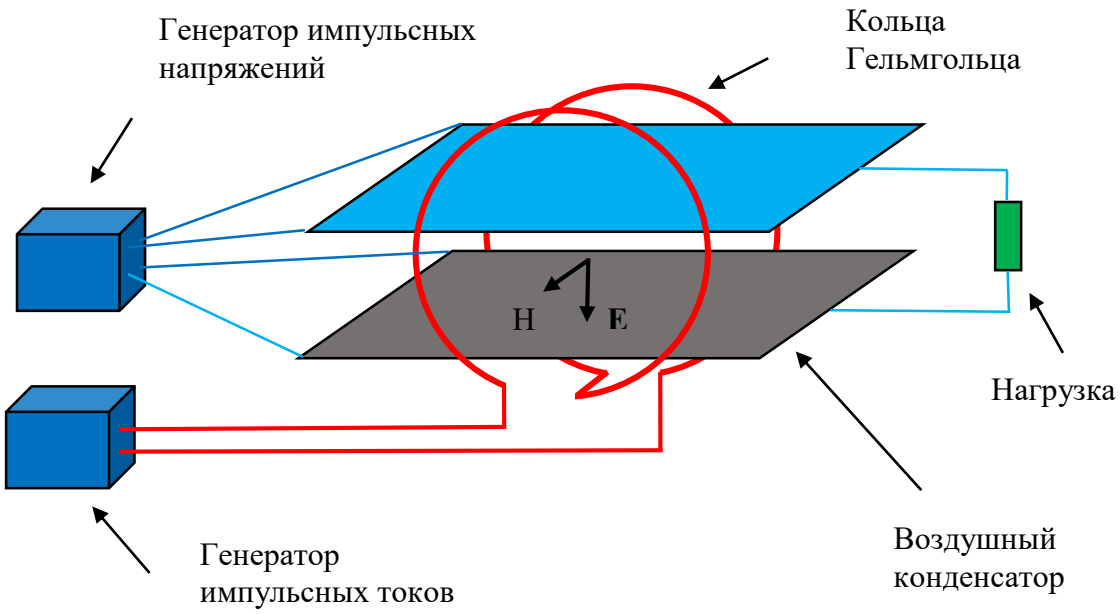
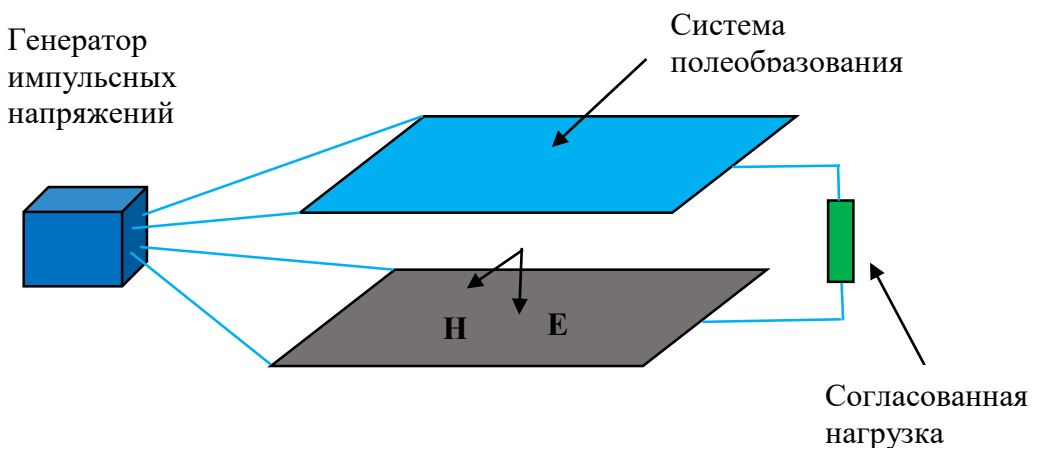
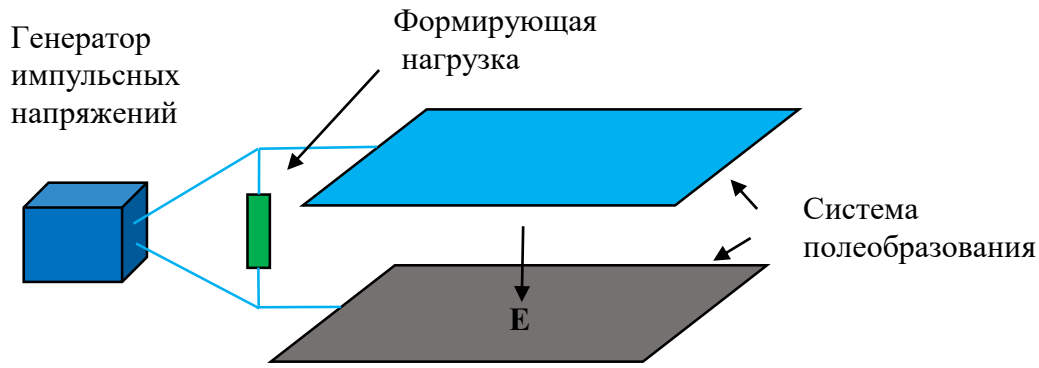


Рис. 3.7 – Структурная схема имитатора с раздельным формированием компонент электрического и магнитного полей грозовых разрядов.

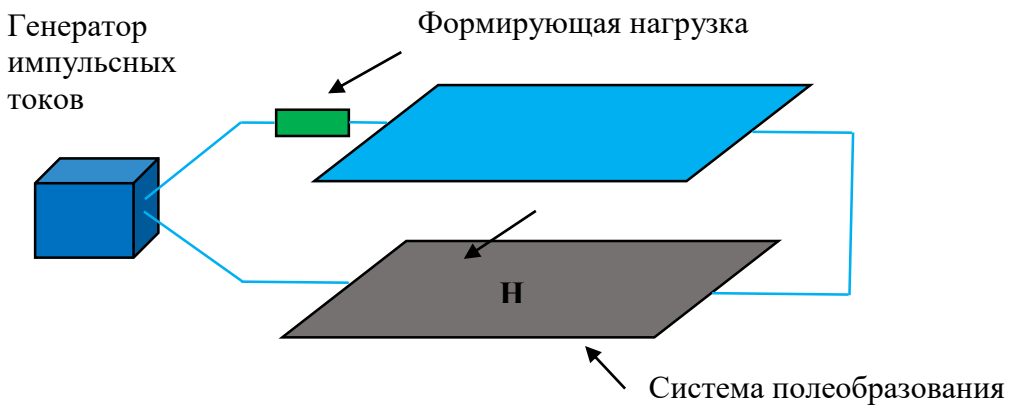
Имитаторы с комплексной нагрузкой функционируют по принципу различного размещения формирующих элементов в системе полеобразования (рис. 3.8). Для получения одновременно электрической и магнитной составляющих требуемых амплитудно-временных характеристик ГЭМИ согласованная нагрузка располагается в конце полеобразующей системы имитатора (рис. 3.8 а). При этом величина согласованной нагрузки выбирается таким образом, чтобы обеспечить требуемое соотношение амплитуд напряженности электрического и магнитного полей (E/H = 377 Ом).



а)



б)



в)

Рис. 3.8 – Имитатор с комплексной нагрузкой для формирования электромагнитного поля (а); электрической составляющей (б) и магнитной составляющей (в) ГЭМИ .

Для получения отдельно электрической составляющей ГЭМИ сопротивление нагрузки, которое выступает в качестве формирующего элемента переносится в начало системы полеобразования, на котором сосредотачивается все падение напряжения при разряде генератора импульсов напряжения (рис. 3.8 б). При этом в рабочем объеме системы полеобразования имитатора, которая в данном случае представляет собой разомкнутую полосковую линии (воздушный конденсатор) создается напряженность электрического поля с требуемыми амплитудно-временными параметрами.

Воспроизведение магнитной составляющей ГЭМИ формирующее сопротивление включается в рассечку разрядного контура имитатора, состоящего из генератора импульсных токов и закороченной в конце системы полеобразования (рис. 3.8 в). В этом случае протекающий по данному контуру ток формирует внутри системы полеобразования магнитное поле с заданными амплитудно-временными параметрами.

Имитаторы с описанными системами полеобразования реализованы в НИПКИ «Молния» (Украина). На рис. 3.9 приведен внешний вид различных генераторов импульсных электрических, магнитных и электромагнитных полей грозовых разрядов.

Важнейшим вопросом, возникающим при проведении испытаний, является правильный (корректный) выбор соотношения линейных размеров объекта испытания и рабочего объема имитатора, что обеспечивает выполнение требований, регламентированных стандартом к характеристикам имитаторов в части соблюдения допустимых пределов неоднородности воздействующих на объект испытаний воспроизводимых полей и флуктуации при этом их амплитудно-временных и частотных характеристик. Иными словами, линейные размеры систем полеобразования должны выбираться на условиях обеспечения получения рабочего объема с однородным полем, достаточного для размещения в нем испытуемого объекта.

На рис. 3.10 приведены основные линейные размеры, которые вводятся при определении зоны однородного поля полеобразующей системы имитатора и его испытательного (рабочего) объема для имитатора направленных волн.

Рис. 3.9 – Различные виды систем полеобразования имитаторов НИПКИ «Молния» (Украина)

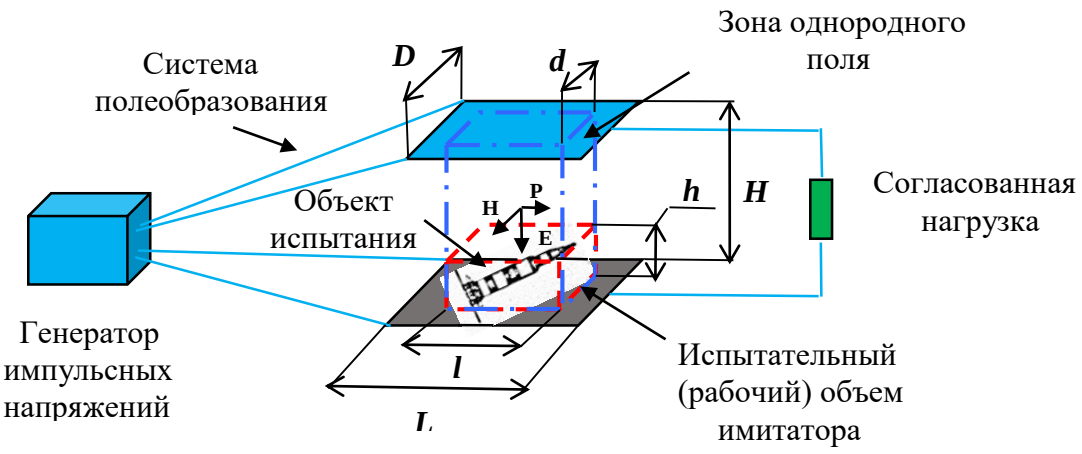


Рис. 3.10 – К определению зоны однородного поля и испытательного (рабочего) объема имитатора направленных волн.

Для обеспечения требований стандарта необходимо выдерживать следующие соотношения линейных размеров полеобразующей системы и объекта испытания:

$$D \approx 2H; L \geq D; d/D \approx 0{,}75; l/L \approx 0{,}75; h/H \approx (0{,}35 - 0{,}5).$$

3.4 Генераторы наведенных токов и напряжений в цепях бортового оборудования ЛА

С целью имитации наводок, возникающих в типовых внешних цепях объектов, подверженных прямым и косвенным воздействиям грозовых разрядов, используются специальные генераторы импульсов наведенных напряжений и токов (генераторы кондуктивных помех).

Генераторы кондуктивных помех представляют собой отдельный класс генераторов, к которым предъявляют следующие требования [3.2]:

– наиболее точно имитировать напряжения и (или) токи, возникающие во внешних цепях объектов при грозовых воздействиях;

– обладать возможно малым выходным (внутренним) сопротивлением, чтобы низкоомиые нагрузки не оказывали заметного шунтирующего влияния на имитируемые сигналы;

– иметь широкий диапазон изменения амплитуд генерируемых сигналов;

– не оказывать дополнительного помехового влияния по каким-либо иным, не тестируемым трактам.

Как правило, генераторы кондуктивных помех серийно не выпускаются. В связи с этим, в каждом конкретном случае, для имитации в цепях ТС напряжений и токов, наводимых в процессе грозовых воздействий, приходится разрабатывать и создавать оригинальные конструкции таких генераторов.

Анализ применяемых на практике схем генераторов кондуктивных помех показывает, что, несмотря на их многообразие, все они строятся по единому функциональному принципу (рис. 3.11).

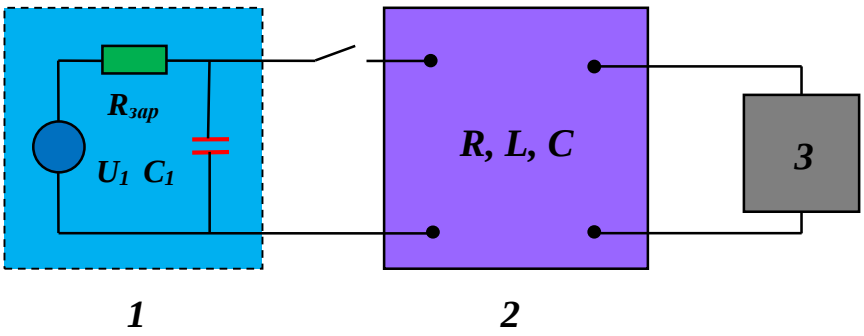


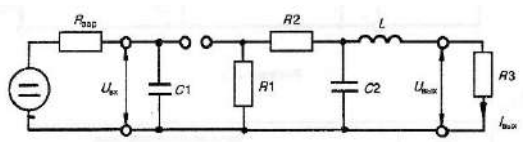
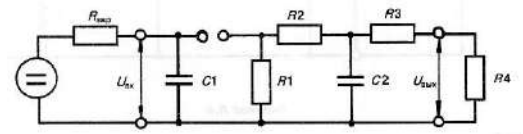
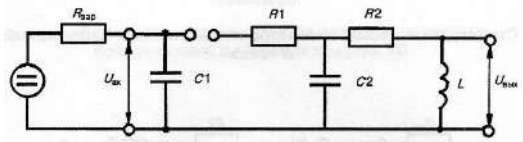
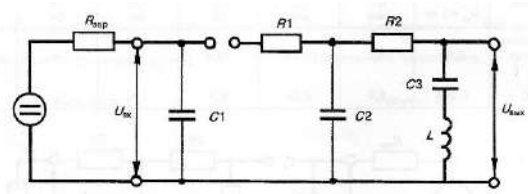
Рис. 3.11 – Обобщенная структурная схема генератора кондуктивных помех
1 – накопитель энергии; 2 – разрядно-формирующий контур;
3 – объект испытания.

Генератор кондуктивных помех содержат емкостный накопитель энергии C_1, заряд которого производится через зарядное сопротивление $R_{зар}$ от источника постоянного напряжении U_1 и разрядно-формирующий контур, задачей которого является формирование импульсов напряжения и тока наводок с требуемыми амплитудно-временными характеристиками в процессе разряда емкости C_1. Разрядно-формирующий контур состоит из набора

смешанно соединенных активных сопротивлений R и реактивных элементов *L* и *C*.

В табл. 3.1 приведены схемы генераторов, рекомендованных ГОСТ 30585-98 [3.3] для формирования импульсов наведенных напряжений и токов, возникающих в опасных трактах ЛА при грозовых воздействиях (см. табл. 1.7).

Таблица 3.1 - Схемы генераторов, рекомендованных ГОСТ 30585-98 [3.3] для формирования импульсов наведенных напряжений и токов, возникающих в опасных трактах ТС при грозовых воздействиях

Форма импульса	Электрическая схема	Значения параметров схемы					
Напряжение 1,2/50 мкс		***C1*** 4,0 мкФ	***C2*** 0,34 мкФ	***R1*** 16,0 Ом	***R2*** 1,5 Ом	***R3*** ∞	***L*** 6,0 мкГн
Ток 8/20 мкс		***C1*** 8,0 мкФ	***C2*** 0,34 мкФ	***R1*** 8,3 Ом	***R2*** 1,5 Ом	***R3*** 1,0 Ом	***L*** 12,0 мкГн
Напряжение 10/700 мкс		***C1*** 22,0 мкФ	***C2*** 0,4 мкФ	***R1*** 170 Ом	***R2*** 13,0 Ом	***R3*** 4,0 Ом	***R4*** 40,0 Ом
Биполярный		***C1*** 2,0 мкФ	***C2*** 0,1 мкФ	***R1*** 0,3 Ом	***R2*** 1,3 Ом	***L*** 1,75 мкГн	
«Звенящая волна»		***C1*** 10,0 мкФ	***C2*** 5,0 мкФ	***C3*** 10,0 мкФ	***R1*** 46,0 Ом	***R2*** 30 Ом	***L*** 170 мкГн
Затухающие колебания $f = 0{,}1$ МГц		***C1*** 10,0 мкФ	***C2*** 5,0 мкФ	***C3*** 10,0 мкФ	***R1*** 6,0 Ом	***R2*** 16 Ом	***L*** 170 мкГн
$f = 1{,}0$ МГц		***C1*** 1,0 мкФ	***C2*** 0,5 мкФ	***C3*** 1,0 мкФ	***R1*** 6,0 Ом	***R2*** 16 Ом	***L*** 17,0 мкГн

В таблице 3.2 представлены генераторы для испытания наведенными напряжениями и токами от грозовых воздействий в опасных трактах ЛА регламентированных DO-160G раздел 22 [3.4], разработанные в НИПКИ «Молния» (Украина).

Таблица 3.2 - Испытательные генераторы, разработанные в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина)

DO-160G р. 22	Тип испытаний	Тип генератора	Фото
1	2	3	4
п. 22.5.1	«Контактный ввод», единичные удары, форм 3, 4, 5А	ИГЛА - КВ	
п. 22.5.2.1	«Кабельная инжекция», единичные удары, форм 1, 2, 3	ИГЛА-КИ-1,2	
		ИГЛА-КИ-3	

Продолжение табл. 3.2

1	2	3	4
п. 22.5.2.1	«Кабельная инжекция», многократные удары, форм 1, 2, 3	ИГЛА-МКУ-1	
		ИГЛА-МКУ-2	
		ИГЛА-МКУ-3-1 МГц	
п. 22.5.2.1	«Кабельная инжекция», многократные удары, форм 3 частотой 1 МГц	ИГЛА-МВ-3-1 МГц	
п. 22.5.2.1	«Кабельная инжекция», многократные удары, форм 3 частотой 10 МГц	ИГЛА-МВ-3-10 МГц	

Окончание табл. 3.2

1	2	3	4
п. 22.5.2.2	«Ввод в заземление» единичные удары форм 4, 5А	ИГЛА-3В	
п. 22.5.2.2	«Ввод в заземление» многократные удары форм 4, 5А	ИГЛА-МКУ-4	
		ИГЛА-МКУ-5А	

Далее представлено принципиальные схемы проведения основных видов испытаний бортового авиационного оборудования методами:

- «контактного ввода» (штырьковые испытания);
- «кабельной инжекции»;
- «ввода в заземление».

3.4.1 Испытания цепей бортового оборудования ЛА методом «контактного ввода»

Испытания БАО по всем цепям, за исключением цепей питания. На рис. 3.12 приведена схема испытаний данным методом.

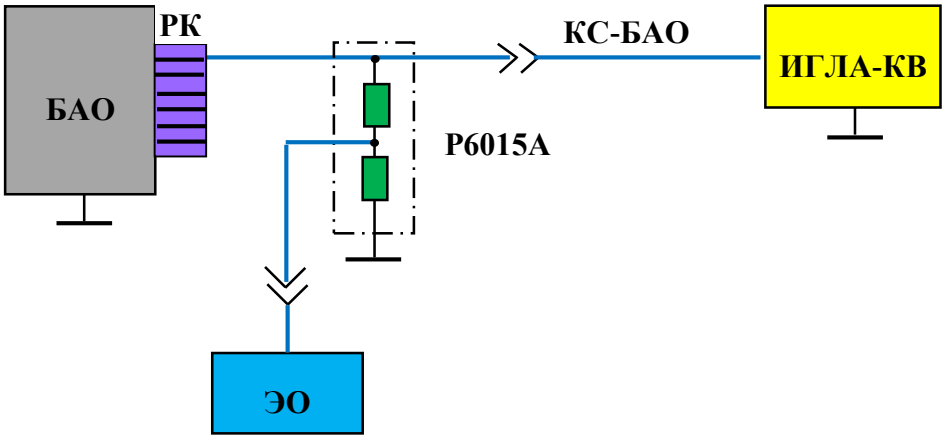


Рис. 3.12 – Схема испытаний БАО по всем цепям, за исключением цепей питания
БАО – испытываемое оборудование;
РК – разъем с нагружаемыми контактами;
ИГЛА-КВ – испытательный генератор;
Р6015А – щуп высоковольтный (делитель напряжения);
КС-БАО – кабель соединительный к БАО;
ЭО – осциллограф типа TEKTRONIX TDS 2024B.

Здесь в качестве УВП для ввода помехи непосредственно в штырьки разъемов БАО используется короткий (длиной 1 м) высоковольтный кабель КС-БАО (рис. 3.13), а для гальванической развязки генератора от испытываемых цепей на выходе генератора ИГЛА-КВ установлен разделительный конденсатор емкостью 4000 мкФ, рассчитанный на соответствующее рабочее напряжение.

Рис. 3.13 – Кабель соединительный к испытываемому оборудованию КС – БАО

Испытания БАО по цепям питания постоянного тока. Схема испытаний данным методом приведена на рис. 3.14 .

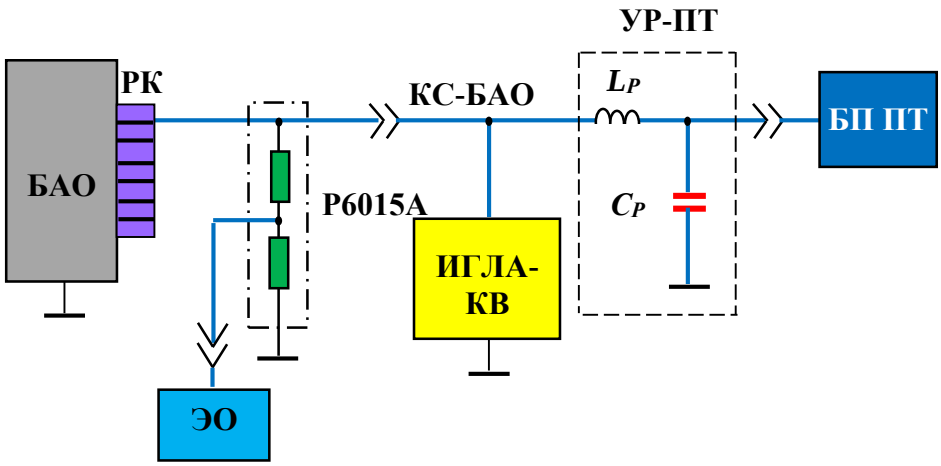


Рис. 3.14 – Схема испытаний БАО по цепям постоянного тока

БАО – испытываемое оборудование;
РК – разъем с нагружаемыми контактами;
КС-БАО – кабель соединительный к БАО;
УР-ПТ – устройство развязки постоянного тока;
БП ПТ – блок питания постоянного тока;
Р6015А – высоковольтный делитель напряжения;
L_P – индуктивность развязки;
C_P – емкость развязки 100 мкФ
ЭО – осциллограф типа TEKTRONIX TDS 2024B.

В качестве УР-ПТ используется устройство связи-развязки, состоящее из устройства связи (конденсатор емкостью 4000 мкФ – встроен в генератор ИГЛА-КВ) и устройство развязки, где C_P = 100 мкФ, L_P – подбирается под конкретный блок питания БП-ПТ.

Испытания БАО по цепям питания переменного тока. Схема испытаний данным методом приведена на рис. 3.15.

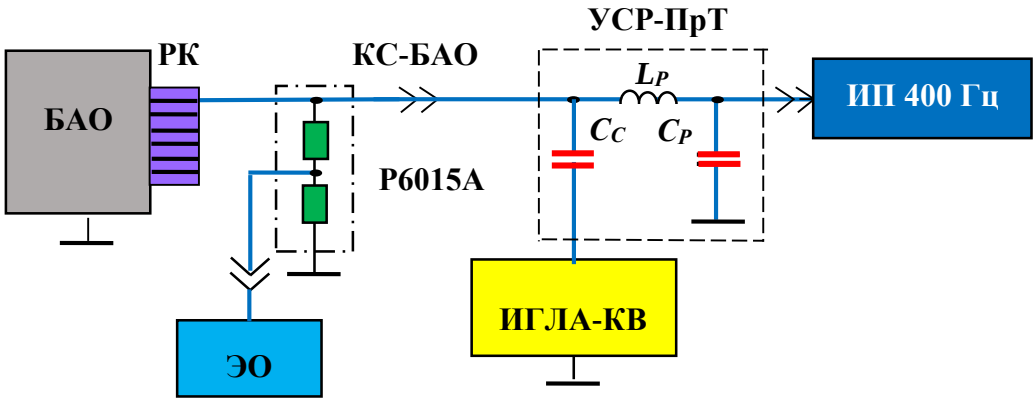


Рис. 3.15 – Схема испытаний БАО по цепям переменного тока

БАО – испытываемое оборудование
РК – разъем с нагружаемыми контактами;
КС-БАО – кабель соединительный к испытываемому оборудованию;
УСР-ПрТ – устройство связи-развязки переменного тока;
Р6015А – высоковольтный делитель напряжения;
L_P – индуктивность развязки;
C_P – емкость развязки;
C_C – емкость связи;
ЭО – осциллограф типа TEKTRONIX TDS2024B.

В этой схеме в качестве УВП используется устройство связи-развязки типа УСР-ПрТ, где конденсатор связи C_C = 1 мкФ, конденсатор развязки C_P = 1 мкФ, а L_P – индуктивность развязки – подбирается при наладке схемы.

3.4.2. Испытания цепей бортового оборудования ЛА методом «кабельной инжекции»

Испытания БАО с неэкранированными межблочными линиями связи (МЛС). **С**хема испытаний данным методом приведена на рис. 3.16.

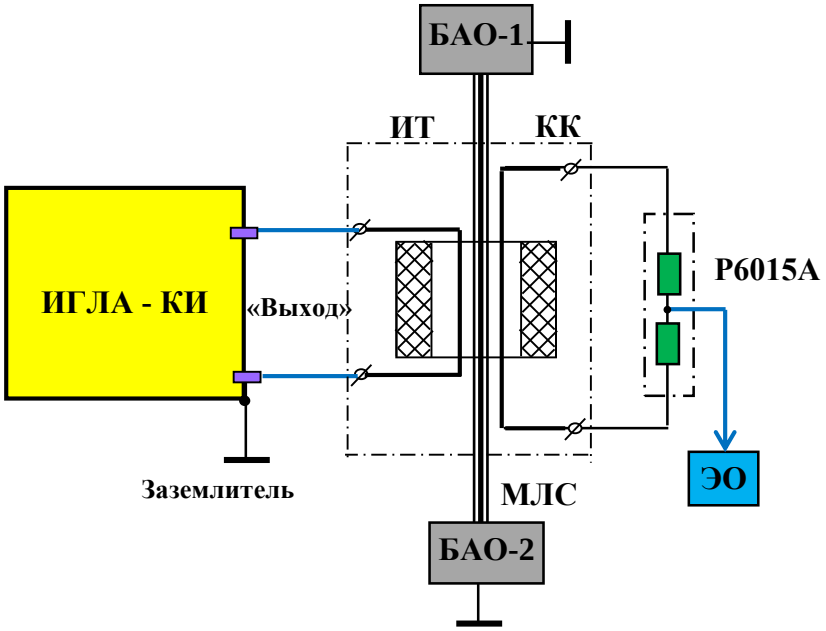


Рис. 3.16 – Схема испытаний БАО с неэкранированными МЛС
ИГЛА-КИ – испытательный генератор (ИГЛА-КИ-3 или ИГЛА-КИ-1,2);
ИТ – инжектирующий трансформатор (ИТ-3 или ИТ-1,2);
КК – калибровочный контур;
МЛС – межблочная линия связи;
БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование
Р6015А – высоковольтный делитель напряжения;
ЭО – осциллограф типа TEKTRONIX TDS 2024B.

В этой схеме помеха вводится в МЛС диаметром до 38 мм при помощи штатного инжектирующего трансформатора ИТ-3 (ИТ-1,2), а испытательным воздействием является выходное напряжение генераторов форм 3 или 2. Конструкция ИТ-3 (ИТ-1,2) позволяет ввести помеху в МЛС путем размещения МЛС в разъемный инжектирующий трансформатор (рис. 3.17).

Рис. 3.17 – Общий вид разъемного инжектирующего трансформатора ИТ – 3 (1) с калибровочным контуром (2).

Испытания БАО с экранированными МЛС. Схема испытаний данным методом приведена на рис. 3.18.

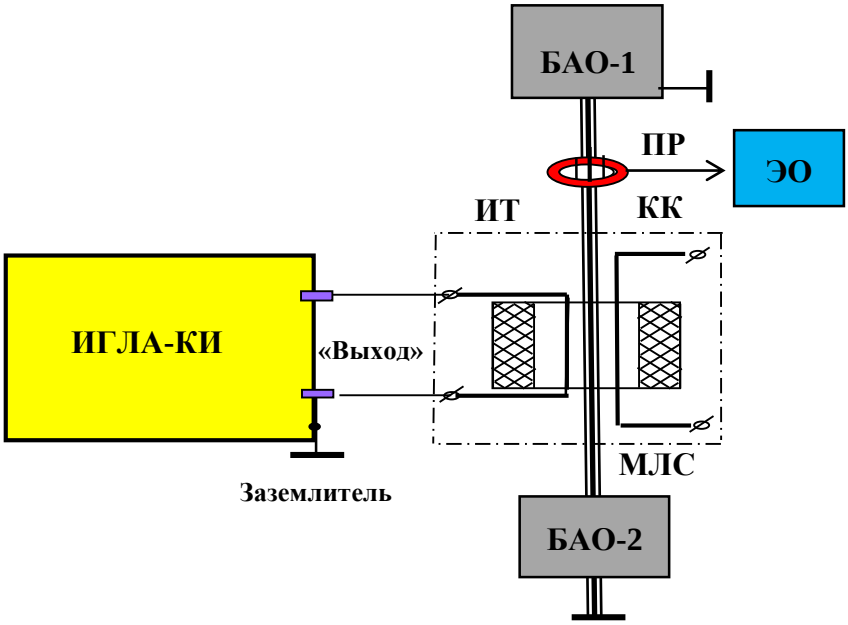


Рис. 3.18 – Схема испытаний БАО с экранированными МЛС
ИГЛА-КИ – один из испытательных генераторов;
ИТ – инжектирующий трансформатор;
КК – калибровочный контур;
МЛС – межблочная линия связи;
БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование;
ПР – пояс Роговского;
ЭО – осциллограф типа TEKTRONIX TDS 2024B.

В этой схеме помеха вводится в МЛС диаметром до38 мм при помощи штатного инжектирующего трансформатора ИТ-3 (ИТ-1,2), а испытательным воздействием является выходной ток генераторов форм 3 или 1. Конструкция ИТ-3 (ИТ-1,2) позволяет ввести помеху в МЛС бесконтактным методом, а измерение тока, протекающего в испытываемых МЛС, осуществляется штатным поясом Роговского.

3.4.3. Испытания цепей бортового оборудования ЛА методом «ввода в заземление»

Испытания БАО напряжением. Схема испытаний данным методом приведена на рис. 3.19.

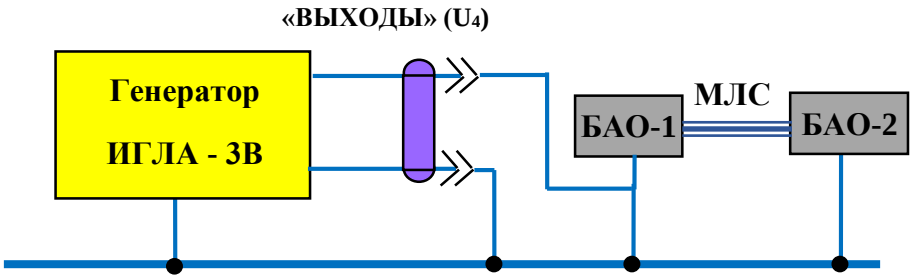


Рис. 3.19 – Схема испытаний БАО напряжением формы 3
МЛС – межблочная линия связи;
БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование.

В этом случае испытательное воздействие (напряжение формы 4) вводится между корпусом БАО-1 или БАО-2 и металлической плоскостью, причем нагружаемый корпус БАО предварительно отсоединяется от «земли» и изолируется от нее на полное испытательное напряжение (1600 В).

Испытания БАО токами. Схема испытаний данным методом приведена на рис. 3.20.

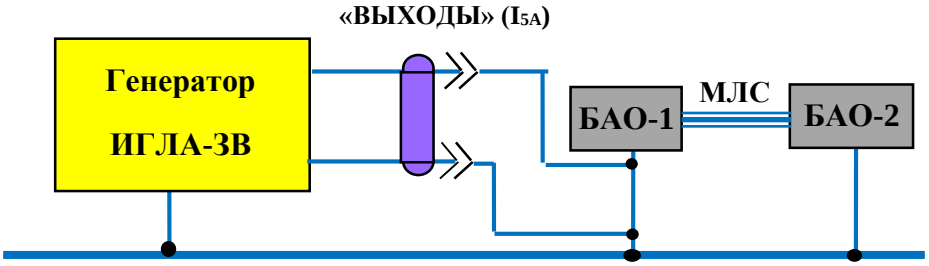


Рис. 3.20 – Схема испытаний БАО током формы 5А
МЛС – межблочная линия связи;
БАО-1, БАО-2 – испытываемое оборудование.

В этом случае испытательное воздействие (ток формы 5А) вводится в цепь заземления БАО-1 или БАО-2. В качестве цепи заземления БАО может быть использован как штатный заземлитель БАО, так и искусственный заземлитель, входящий в комплект ИГЛА-3В.

Представленные выше схемы проведения испытаний дают общее представление о методиках проведения испытаний БАО, регламентируемых КТ-160D раздел 22 (см. также рис.2.42, 2.44, 2.46, 2.49, 2.50). При этом, конечно, существует множество нюансов, связанных с испытаниями конкретного БАО, которые должны быть учтены при согласовании программы и методики проведения испытаний между изготовителем, потребителем и испытательной лабораторией.

3.5 Требования к испытательным площадкам на молниестойкость ЛА.

Под испытательной площадкой понимается совокупность всех элементов системы генерирования ВВФ ЭМП грозовых разрядов (см. т. 1, гл. 2, р. 2.3). Испытательные площадки на молниестойкость ЛА относятся к объектам, требующим метрологической аттестации. Эти требования регламентируются соответствующими стандартами [3.5 – 3.9].

Испытательные площадки в этой области тестирования разделяют на:

- открытые испытательные площадки;
- закрытые испытательные площадки, расположенные в высоковольтных залах;

3.5.1. Открытые испытательные площадки

Открытые испытательные площадки – наиболее распространенный вариант реализации испытаний ЛА или их крупных комплектующих на соответствие требованиям молниестойкости.

На рис. 3.21 приведен общий вид открытой испытательной площадки ИЭМИ-10 в НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина) для проведения соответствующих испытаний ЛА.

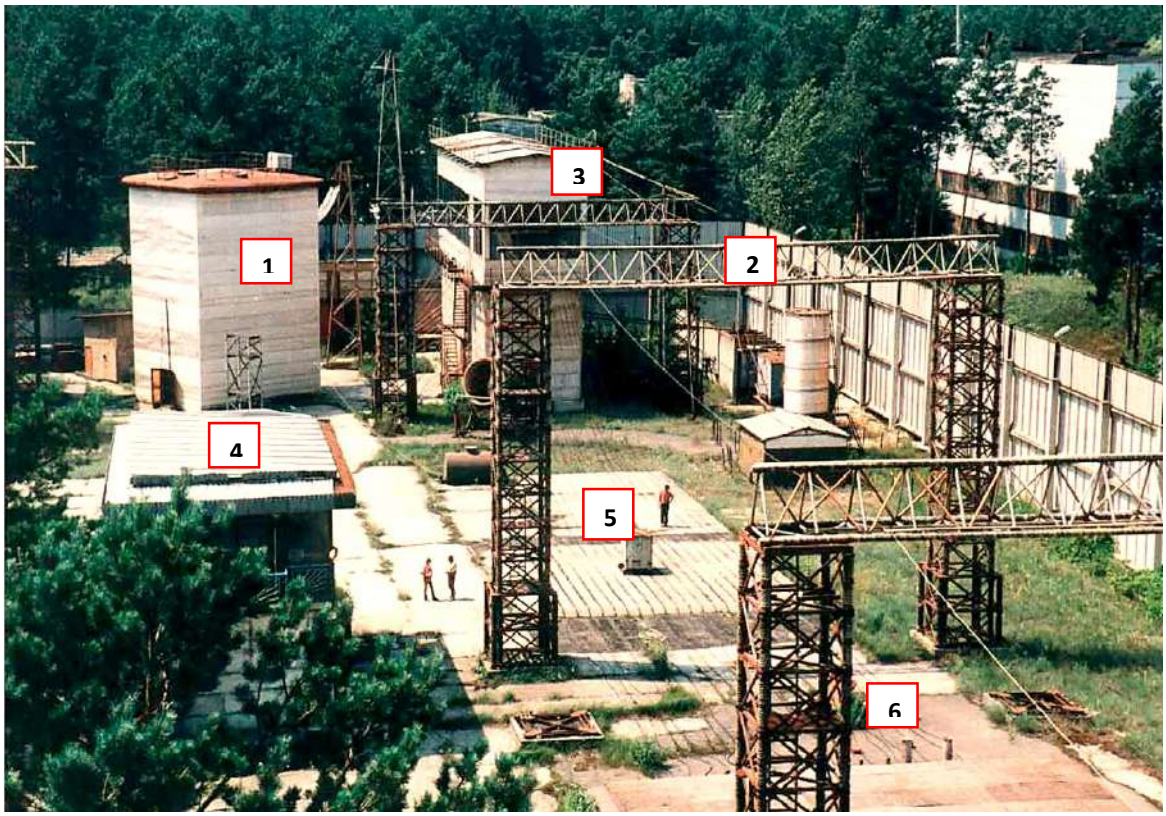


Рис. 3.21 – Общий вид открытой испытательной площадки НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина) для проведения испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости

1 – Генератор импульсных напряжений и токов (ГИНТ- 4/120)
2 – полеобразующая система типа открытой несимметричной полосковой линии с высотой подвеса 11 м;
3 – устройство формирования;
4 – пульт управления;
5 – измерительная кабина.
6 – нижний обратный токопровод полеобразующей системы

Открытая испытательная площадка - *открытый испытательный комплекс,* как правило, включает в себя высоковольтные источники

напряжения (тока), систему полеобразования и систему метрологического обеспечения испытаний.

Размеры испытательной площадки, определяются видом системы полеобразования (СП) и максимальными габаритными размерами испытываемого объекта. Для создания электрических полей как правило используется СП в виде несимметричной открытой полосковой линии (ПЛ). Нижняя пластина (электрод) ПЛ заземлена, на верхнюю подается потенциал от генератора. Для полеобразующих систем в виде открытой ПЛ, минимальное расстояние до ближайших сооружений, не имеющих отношения к процессу формирования ЭМП, зависит от размеров ПЛ, и, в соответствии с требованиями п. 5.22.3.3.b стандарта [3.5], не должно быть меньше удвоенного расстояния между нижними и верхними плоскостями ПЛ. Это требование обуславливается учетом ряда физических эффектов, которые могут оказать влияние на процесс генерирования ЭМП и структуру поля в ПЛ. Важным аспектом является возможный пробой воздушного промежутка с верхней потенциальной плоскости на близко расположенные заземленные конструкции. Это обуславливается фактически независимым формированием электрического и магнитного полей, сопровождающих молнию, в ближней зоне от канала молнии. Распределение напряженности электрического (магнитного) поля в воздушном пространстве описывается уравнением Лапласа. При наличии вблизи ПЛ проводящих поверхностей или металлических объектов часть энергии генерируемого электрического поля будет отведена на эти объекты. Степень влияния близости таких объектов на структуру электрического поля в ПЛ с достаточной точностью описывается решением уравнения Лапласа для электрического потенциала. Результаты моделирования влияния сторонних объектов на структуру электрического поля в ПЛ открытого типа численным методом в статическом приближении представлены в работе [3.10]. Следует отметить, что авторам не удалось в свободном доступе найти описание процесса испытаний устойчивости ТС к электрическому полю молнии в соответствии с требованиями рассматриваемого стандарта [3.6].

Для создания сильного магнитного поля, как правило, применяются различные варианты токовых витков. В специальном техническом отчете [3.11, Appendix C] указано, что испытательная установка может быть любого типа, и представлен внешний вид

нескольких испытательных установок для реализации требований стандарта [3.6] в части, касающейся действия магнитного поля молнии. Однако детальная информация о таких установках и параметры генерируемых полей отсутствуют. Желательно, чтобы расстояние до ближайших проводящих конструкций, не имеющих отношения к процессу создания импульса напряженности магнитного поля, было не меньше удвоенного диаметра (для кольцевого) или диагонали (для прямоугольного) витка. На практике, расстояние определяется фактической структурой испытательной установки и может быть таким, при котором напряженность магнитного поля в испытательном объеме соответствует формуле Ампера:

$$H=I/2\pi R \qquad (3.1)$$

Степень влияния грунта. Электрофизические параметры грунта не оказывают существенного влияния на формирование квазистатических электрических и магнитных полей. Магнитное поле в грунте возбуждает токи проводимости, в результате происходит диссипация энергии импульса и искажение структуры поля в пространстве. Степень влияния указанного эффекта зависит от электрофизических характеристик грунта и размеров ПС. Учитывая, что удельная электропроводность грунта, как правило не превышает 10 См/м [3.12], влиянием вихревых токов при формировании микросекундных импульсов можно пренебречь. Когда имитатор магнитного поля располагается на проводящей (металлической) поверхности можно ожидать определенного влияния. Учесть это влияние удается путем калибровки испытательного объема.

Требования к допустимому размеру неровности заземляющей плоскости. Стандарты [3.6 – 3.9], не содержат требований к размеру неровности заземляющей плоскости. Априори, подразумевается, что неровности могут быть следствием технологии изготовления.

Для ПЛ открытого типа заземляющей плоскостью является нижняя пластина. Под неровностью, следует понимать изменение размеров поперечного сечения ПЛ, в ее регулярной части. Регулярной частью называется участок ПЛ, на котором верхняя и нижняя пластины параллельны между собой.

При создании пластин ПЛ могут использоваться как проволочные конструкции, так и сплошные проводящие листы. Размер возможных неровностей заземляющей пластины, связанных с технологией изготовления, не превышает нескольких сантиметров. Степень влияния неровности заземляющей плоскости на процесс распространения электромагнитной волны в рабочем объеме полеобразующей системы обуславливается соотношением высоты неровности (Δ) с длиной (λ) распространяющейся волны. Для малых и плоских неровностей получено соотношение (3.2), при котором влиянием отдельной неровности можно пренебречь.

$$2 \cdot k \cdot \Delta \cdot \sin(\psi) << \pi/2, \qquad (3.2)$$

где: $k = 2\pi / \lambda$; ψ - угол скольжения волны по отношению к пластине.

Из условия (1.2) следует, что чем больше длина волны и меньше угол скольжения, тем меньше влияние неоднородности. В ПЛ волна распространяется вдоль пластины, т.е. угол скольжения близок к нулю, и соотношение (1.2) выполняется автоматически. Рассмотрим случай, когда угол скольжения равен 90^0. При этом, условие (3.2) преобразовывается в условие (3.3), которое предлагается рассматривать в качестве критерия малости размера неровности.

$$\Delta << \lambda / 8 \qquad (3.3)$$

В случае импульсного процесса имеет смысл говорить о минимальной длине волны, соответствующей максимальной (верхней граничной) частоте в спектре импульса. Верхней граничной частой в спектре электрического поля, сопровождающего близкий удар молнии, имеющего форму 1,2 / 50 мкс, максимальной частотой является 280 кГц, что соответствует длине волны примерно 10^3 м.

Следовательно, эффект влияния может проявится только при $\Delta \geq 1{,}28\ 10^2$ м, что на практике недостижимо.

Важным аспектом, в случае использования листового металла или фольги, является обеспечение надежной гальванической связи вдоль ПЛ. Наличие болтовых соединений, особенно вдоль линий поперечного сечения ПЛ, не желательно, поскольку гальванический контакт между элементами пластины ПЛ со временем ухудшается,

вследствие процессов окисления. Кроме того, отсутствие сплошного гальванического контакта вдоль ПЛ приводит к неравномерному распределению заряда по пластине, вследствие чего будет нарушаться однородность электрического поля.

Влияние погодных условий. При проведении испытаний на открытых испытательных площадках необходимо учитывать влияние погодных условий на процесс испытаний. При этом необходимо исходить из условий эксплуатации оборудования оснащения испытательной площадки и тестируемого объекта.

Эксплуатация высоковольтных установок, к числу которых относятся генераторы токов и напряжений молнии, допускается при строго регламентируемых условиях:

– температура окружающего пространства должна быть в пределах 25 ± 10 °С, поскольку емкость конденсаторных батарей зависит от температуры, кроме того, при высоких температурах повышается опасность возгорания изоляционных жидкостей;

– относительная влажность воздуха не должна превышать 80%, что обеспечивает отсутствие конденсата на изоляционных поверхностях имитатора, и как следствие, необходимый уровень электрической прочности изоляции;

– как следствие, на открытых площадках испытания в дождь не проводятся;

– отсутствие пыли и других аэрозольных взвесей в высоковольтной части генераторов.

Техническое обслуживание имитатора должно предусматривать периодическую очистку изоляционных поверхностей от влаги и пыли.

Условия, при которых допускается проводить испытания конкретного типа ЛА, определяются его спецификацией. Возможные противоречия в климатических условиях должны быть отражены в протоколе испытаний.

В случаях, после транспортировки в зимнее время или во время дождя, необходимо обеспечить выдержку испытываемого объекта при температурно-влажностных условиях, указанных выше. В зависимости от реальной ситуации, для этого может понадобиться выдерживать объект в течение 24 часов при температуре 25°С ± 10ºС и при относительной влажности воздуха в диапазоне от 50% до 80%. Испытание ЛА должно быть проведено при этих же условиях.

Требования к качеству электропитания. Стандарт [3.6] прямо не устанавливает требований к качеству электропитания при проведении испытаний устойчивости ЛА к действию ЭМП. Этот вопрос требует рассмотрения в нескольких аспектах обеспечения электропитания: имитатора, штатного измерительного комплекса, испытываемого изделия и его контрольно-диагностической аппаратуры. Источники питания могут быть как переменного (например, 50 Гц, 400 Гц) так постоянного различных уровней напряжения (28 В, 110 В, 220 В, 380 В). Зачастую, исходным источником является потребительская сеть 220 ± 15 В и 50 ± 1 Гц.

Так, схема электропитания генераторов содержит высоковольтный трансформатор, обеспечивающий повышение напряжения до требуемого уровня (обычно не более 200 кВ), выпрямительное устройство на соответствующее напряжение, которое обеспечивает подачу постоянного напряжения на конденсаторные батареи импульсного генератора. При этом, основным требованием к качеству электропитания является достаточный уровень подводимой мощности. Возможные отклонения от номинальной частоты принципиального значения не имеют.

Защита от незапланированного отключения установки от питающей сети не предусматривается. Поскольку, если в процессе зарядки конденсаторной батареи происходит отключение электроэнергии, то накопленный заряд на конденсаторной батарее сбрасывается на «землю», потому что обесточиваются электромагниты пускателя и его шток замыкает контакты, обеспечивающие заземление. Этот процесс предусматривается штатным режимом эксплуатации генератора. Аналогично сброс заряда происходит при срабатывании защитных блокировок на дверях ограждения высоковольтного генератора. Регулятор напряжения первичной обмотки повышающего трансформатора защищен от бросков тока автоматом защиты, установленном в силовом шкафу, от которого подается электроэнергия на установку. Сглаживающий реактор и бесперебойный источник питания не применяются.

Качество питания измерительного оборудования должно удовлетворять требованиям, указанным в инструкции по эксплуатации конкретного средства измерительной техники (СИТ).

Следует отметить, что обязательно должны быть приняты меры по снижению влияния генерируемого импульса на сеть питания.

К возможным мерам защиты относятся такие:

– подача напряжения от распределительно устройства, не совмещенного с устройством от которого подается напряжение на высоковольтный генератор;

– измерительное оборудование размещается в экранированной кабине;

– прокладка кабелей питания к измерительной (экранированной) кабине осуществляется в металлических трубах, заземленных с обеих сторон (у распределительного шита и входе в измерительную кабину);

– на входе в измерительную кабину устанавливается сетевой фильтр, рассчитанный на штатную потребляемую СИТ мощность;

– использование автономных источников питания, например, устройств бесперебойного питания;

– осветительное оборудование экранированной кабины должно быть подключено к защищенной сети электропитания или автономному источнику, находящему в измерительной кабине.

Выбор комплекса мер защиты зависит от конкретной конструкции испытательной установки.

Требования к качеству питания испытываемого изделия определяются спецификацией на это изделие. Для выполнения требований организация, которая представляет изделие на испытания, обсуждает вопрос с испытательной лабораторией. В особых случаях, испытываемое изделие комплектуется собственным источником питания. Например, при испытании датчиков давления, использующих токовую петлю 0,4 мА, требуется высокостабильный источник постоянного тока с погрешностью не более долей процента.

Общие требования к качеству электроэнергии, которая поставляется потребителям, содержатся в стандарте [3.14]. Следует исходить из того, что требования этого стандарта выполняются.

Требования к внешней электромагнитной обстановке. Возникновение неприемлемой внешней электромагнитной обстановки, следует разделить на два аспекта:

– возникновение ЭМП, с амплитудно-временными параметрами, сопоставимыми с параметрами ЭМП, сопровождающих молнию;

– электромагнитные эффекты, обуславливающие возникновение наведенных напряжений и токов в гальванических цепях средств измерения и системы электропитания.

Возникновение ЭМП, с амплитудно-временными параметрами, сопоставимыми с параметрами ЭМП молнии, явление редкое, учитывая то обстоятельство, что испытания, как правило, проводятся на выделенной территории, вдали от источников мощных электромагнитных полей, например, радаров. Однако, такая ситуация может сложиться в случае расположения в соседних помещениях другого высоковольтного или сильноточного испытательного оборудования. В этом случае основная помеха будет приходить по кабельным линиям и контуру заземления. Эффективным методом решения возникшей проблемы является согласование графика использования оборудования. Реальная помеховая обстановка, влияющая на результаты измерения параметров ЭМП, формируется предразрядными процессами в генераторе Маркса. Это обуславливается подачей высоковольтного («поджигающего») импульса, инициирующего развертывание ГИНа. Создаваемое этим импульсным процессом электромагнитное поле, предшествует испытательному импульсу, и приводит к возможному преждевременному запуску регистрирующей аппаратуры и проявляется на осциллограмме в виде затухающего колебания. Для устранения этого явления следует использовать первичные преобразователи с нижним порогом чувствительности, согласованным с минимальными значениями напряженности E и H полей, создаваемых в имитаторе. Устанавливать преобразователи в зоне, максимально удаленной от ГИН. На осциллографе устанавливать уровень запуска выше фактического значения помехи.

Для устранения прямого влияния сторонних помех и генерируемого ЭМП измерительная аппаратура должна располагаться в экранированной камере (бункере). В ряде случаев, когда отсутствует свободное соседнее помещение, или размеры помещения, в котором находится имитатор не позволяют разместить экранированную измерительную камеру, целесообразно использовать заглубленный под ПЛ металлический бункер.

Преимущества такого решения проявляются при расположении имитатора на открытой площадке. Размещение измерительной экранированной камеры под ПЛ обеспечивает минимизацию участков измерительный кабелей, находящихся под действием ЭМП. Кроме того, грунт обеспечивает дополнительный эффект экранирования ЭМП и обеспечивает регуляризацию температурного режима внутри камеры. Следует отметить, что экранированную измерительную камеру целесообразно выполнять с двумя отсеками: один для размещения собственно СИТ, другой для контрольно-диагностической аппаратуры, необходимой для контроля качества функционирования ТС ЛА в процессе испытаний.

Атмосферные условия высоковольтных испытаний. Как правило, высоковольтные испытания проводятся при нормальных атмосферных условиях [3.10]:

- температура окружающей среды - 20 ^{0}С;
- атмосферное давление - 101300 Па (1013 мбар или 760 мм рт. ст.);
- абсолютная влажность - 11 г/м ^{3}.

КТ-160G (RTCA DO160) «Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования» [3.4] регламентирует дополнительные требования к окружающей среде по условиям при стендовых испытаниях оборудования ЛА:

- Высота относительно уровня моря определяется через соответствующее значение атмосферного давления, которое действует на оборудование во время испытаний.
- Если в НТД не задано иное, все испытания следует проводить в следующих окружающих условиях:

a) Температура плюс 15 градусов Цельсия... плюс 35 градусов Цельсия.

b) Относительная влажность не выше 85%.

c) Атмосферное давление 84...107 кПа. Эквивалент высоты от плюс 1525 м до минус 460 м.

Допуски на условия испытаний. Если не задано иное, то в испытаниях на внешние воздействия величины параметров внешних воздействий должны поддерживаться в пределах следующих допусков:

- Температура ± 3 градуса Цельсия.
- Высота ± 5% от заданного давления.

Общие требования к испытаниям на воздействие молнии. Испытываемое оборудование должно быть установлено на заземляющей плоскости и скомпоновано в соответствии со следующими требованиями, если нет других указанных в НТД.

Заземляющая плоскость. Следует использовать плоскость из меди, латуни или алюминия толщиной, по крайней мере, 0,25 мм для меди и алюминия, 0,5 мм для латуни, площадью 2,5 м^2 или более при минимальной ширине 0,75 м. Когда применяется экранированный кожух, плоскость заземления следует соединить с экранированным кожухом с интервалом не более одного метра и на обоих концах плоскости. Рекомендуется, чтобы сопротивление заземления по постоянному току составляло не более 2,5 мОм.

3.5.2 Закрытые испытательные площадки (высоковольтные залы)

Высоковольтные залы относятся к закрытым испытательным площадкам. Они применяются для испытаний на молниестойкость малогабаритных ЛА, ОВВТ, элементов и конструкций ЛА (диэлектрических обтекателей, антенн, топливных баков и т.п.). Основным достоинством этого вида испытательных площадок в отличие от открытых площадок является всепогодность их использования, а недостатком – ограниченность габаритов объектов испытания.

На рис. 3.22 и 3.23 приведены общие виды различных высоковольтных залов, используемых для испытаний элементов ЛА на воздействие токов, напряжений и электромагнитных полей молний с регламентированными НД параметрами.

Объект испытаний устанавливают на испытательном поле так. чтобы расстояния до посторонних окружающих предметов (стен, ограждений, испытательного оборудования) были не менее 150 % наименьшего изоляционного расстояния во внешней изоляции объекта (в воздухе между заземленными и имеющими высокий потенциал частями объекта испытаний).

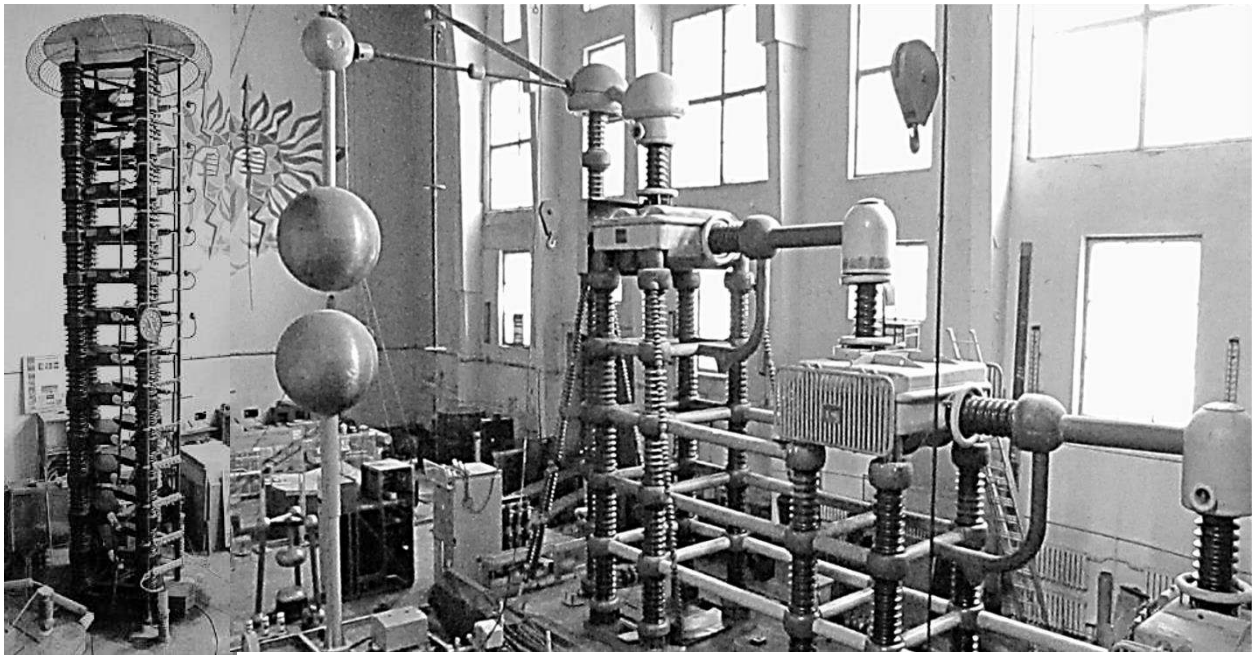


Рис. 3.22 – Высоковольтный зал Национального технического университета «Харьковский политехнический институт» (Украина)

Рис. 3.23 – Высоковольтный зал Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» (Украина)

Исходя из вышеизложенного минимальное расстояние до ближайших сооружений, не имеющих отношение к процессам формирования действующего фактора (минимальное расстояние от ГИН, ГИТ до конца испытательной площадки определяется минимальным размером - высотой формирующих генераторов)

При испытании кратковременным переменным напряжением или напряжением коммутационного импульса положительной полярности значением свыше 750 кВ (амплитудное или максимальное значение) расстояние от имеющей высокий потенциал части объекта (генератора) до посторонних предметов (находящихся под напряжением или заземленных) должно быть не менее указанного на рис. 3.24.

Также, как и для открытых испытательных площадок, на закрытых площадках, в качестве источников высокого импульсного напряжения и тока используются генераторы импульсных напряжений и токов (ГИН и ГИТ).

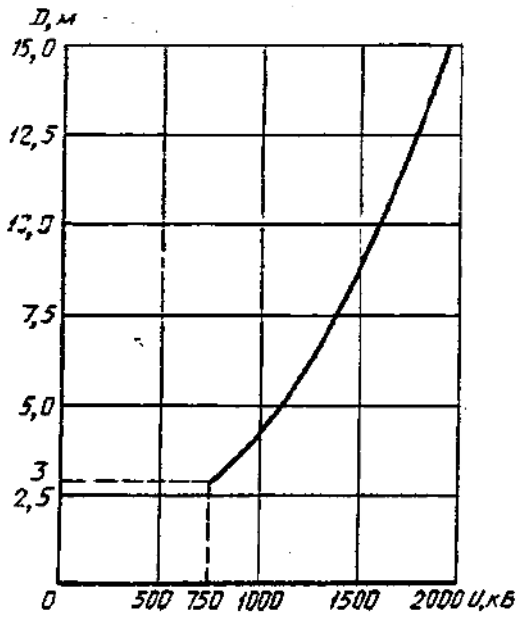


Рис. 3.24 – Наименьшее расстояние *D* до посторонних предметов при испытании кратковременным переменным напряжением или напряжением коммутационного импульса положительной полярности с амплитудой (максимальным значением) *U* [3.9]

Для создания электрических, магнитных (электромагнитных полей) эти генераторы комплектуются системами полеобразования. Как правило используется несимметричные открытые полосковые линии (ПЛ) для получения электромагнитных полей, а, также аналоги электродов Роговского круглой или прямоугольной формы и кольца Гельмгольца, соответственно для формирования электрических и магнитных полей.

На рис. 3.25 приведен внешний вид открытой полосковой линии имитатора электромагнитных полей грозового разряда НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина) (в настоящее время этот вариант демонтирован).

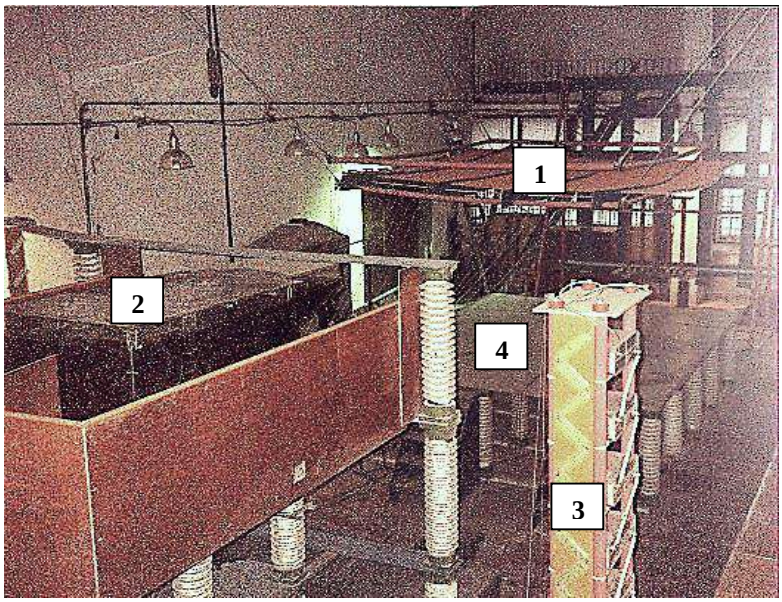


Рис. 3.25 – Внешний вид открытой полосковой линии имитатора электромагнитных полей грозового разряда НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина)
1 – верхний электрод полосковой линии;
2 – ГИТ с устройством формирования;
3 – ГИН.
4 – нижняя пластина полосковой линии.

Нижняя пластина (электрод) ПЛ заземлена, на верхнюю подается потенциал от генераторов. Как уже отмечалось выше, для полеобразующих систем в виде открытой ПЛ, минимальное расстояние до ближайших сооружений, не имеющих отношения к процессу формирования ЭМП, зависит от размеров ПЛ, и не должно быть меньше удвоенного расстояния между нижними и верхними плоскостями ПЛ. Это требование обуславливается учетом ряда физических эффектов, которые могут оказать влияние на процесс генерирования ЭМП и структуру поля в ПЛ, особенно для таких ограниченных (закрытых) пространств как высоковольтные залы. Важным аспектом является возможный пробой воздушного

промежутка с верхней потенциальной плоскости на близко расположенные заземленные конструкции. Это обуславливается фактически независимым формированием электрического и магнитного полей, сопровождающих молнию, в ближней зоне от канала молнии. Распределение напряженности электрического (магнитного) поля в воздушном пространстве описывается уравнением Лапласа. При наличии вблизи ПЛ проводящих поверхностей или металлических объектов часть энергии генерируемого электрического поля будет отведена на эти объекты. Степень влияния близости таких объектов на структуру электрического поля в ПЛ с достаточной точностью описывается решением уравнения Лапласа для электрического потенциала. Результаты моделирования влияния сторонних объектов на структуру электрического поля в ПЛ открытого типа численным методом в статическом приближении представлены в работе [3.10].

При имитации электрического поля молнии, важным фактором является расстояние до ближайшей проводящей конструкции, которое определяет максимально возможное значение потенциала верхней пластины. Требуемое расстояние можно оценить по формуле [3.16]:

$$l \geq U / E_d \qquad (3.4)$$

где: l – минимальное расстояние от верхней плоскости до окружающих проводящих конструкций; U – максимальное значение потенциала верхней платины, кВ; E_d – характерная напряженность электрического поля, при которой происходит пробой воздушного промежутка, кВ/м. Для неоднородного поля E_d принимается равной 500 кВ/м [3.14].

На рис. 3.26 приведен внешний вид системы полеобразования для имитации электрических полей молнии, в используемом сегодня вариате.

Рис. 3.26 - Внешний вид системы полеобразования для имитации электрических полей молнии НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина)

1- верхний потенциальный электрод ПЛ;
2- нижний заземленный электрод ПЛ;
3- опорные изоляторы;
4- вантовая система подвеса верхней плоскости.

Для оценки параметров электрического и магнитного полей близкого удара молнии, стандарт NATO AECTP 500 [3.15] устанавливает это расстояние равным 10 м, как минимальное расстояние (r), на котором объект испытания не подвергается прямому поражению и которое будет зависеть от высоты и формы объекта и топографии окружающего пространства. Поскольку рельеф для различных ситуаций не может быть определен заранее, стандартизованные условия достигается за счет того, что окружающая земля плоская, без значительных выступов. Тогда минимальное расстояние r может быть определено местоположением ударной точки методом «катящейся сфера», используемым при расчете молниезащиты зданий [3.16].

Практика показала, что сфера радиуса 50 м обычно представляет наихудший вариант, и поэтому его следует использовать для определения минимального расстояния перекрытия (см. табл. 2.4).

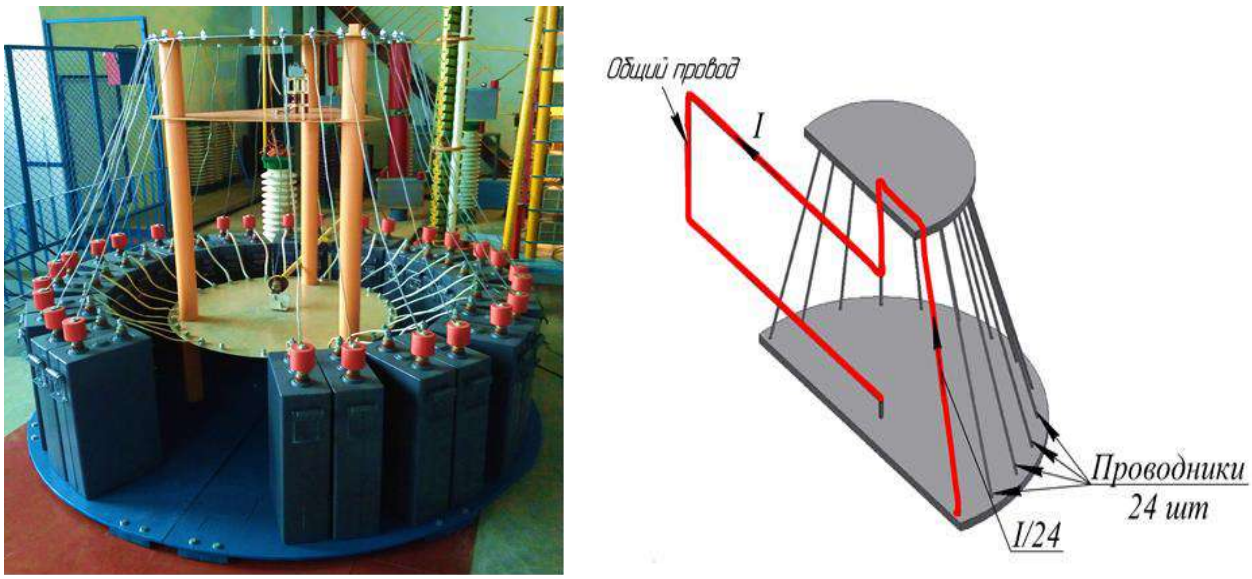
Следует четко понимать, что, хотя среда «плоского плана», вероятно, в худшем случае, нет никакой гарантии, что такая модель будет адекватна реальным ситуациям. Это связано с тем, что близость друг к другу других объектов, находящихся на испытательной площадке будут в определенной степени влиять на результат.

Считается, что метод не должен использоваться для высоты объекта испытания ниже 1 м потому что тогда неизбежная шероховатость земли отрицает предположение о том, что земля плоская по сравнению с высотой.

Допускается размер неровности заземляющей плоскости менее 1 м, а минимальное расстояние до ближайших сооружений, не имеющих отношение к процессам формирования действующего фактора – 50 м от устройств формирования.

Для создания сильного магнитного поля, как правило, применяются различные варианты токовых витков. Желательно, чтобы расстояние до ближайших проводящих конструкций, не имеющих отношения к процессу создания импульса напряженности магнитного поля, было не меньше удвоенного диаметра (для кольцевого) или диагонали (для прямоугольного) витка. На практике, расстояние определяется фактической структурой испытательной установки и может быть таким, при котором напряженность магнитного поля в испытательном объеме соответствует закону Ампера.

На рис. 3.27 приведен внешний вид имитатора магнитных полей близких разрядов молнии.



а) б)

Рис. 3.27 - Внешний вид имитатора магнитных полей близких разрядов молнии ВВС-1.2 НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина) для проведення испытаний NCS10 пункта 3.25 стандарта НАТО AECTP-500:2016:
а - генератор импульсных токов ГИТ-100/70;
б - схематическое изображение полеобразующей системы установки для создания магнитного поля молнии

Безэховые камеры, широко применяемые как закрытые испытательные площадки для проведения радиочастотный испытаний авиационного оборудования, не является необходимым элементом для проведения испытаний на устойчивость к действию электрических и магнитных полей, сопровождающих молнию. В спектре рассматриваемых импульсных полей не содержится частот свыше 1 МГц (см. табл. 1.6) чему соответствует минимальная длина волны не менее 300 м. На меньших расстояниях электромагнитная волна не формируется. Поэтому, стандарт [3.6] рассматривает электрическое и магнитное поля молнии для расстояния 10 м по отдельности. Математические модели процесса формирования полей, в связи с исключением производной от вектора электрической индукции в уравнении Максвелла, сводятся к уравнениям Лапласа в воздушном пространстве (диэлектрических средах), уравнениям диффузии в проводящих средах с соответствующими граничными условиями на поверхности

проводящих элементов. Наличие проводящих стен, пола и потолка приводит к перераспределению напряженностей электрического и магнитного полей в пространстве, но не искажает форму временной зависимости. Это обстоятельство учитывается при калибровке испытательных объемов установок. В работе [3.2] рассмотрен процесс распространения электрического и магнитного полей от канала молнии. На расстоянии 100 м напряженность электрического поля может достигать 24 кВ/м, магнитного 30 А/м, при значении силы тока в канале 20 кА. При этом следует учесть, что источник (канал молнии) имеет протяженность несколько километров. Используемые полеобразующие системы имеют размеры несколько метров. Следовательно, масштаб геометрического подобия можно принять равным 1000. Соответственно, при проведении испытаний на предполагаемых установках, в окружающем пространстве на расстоянии более 100 м от установки, можно утверждать, что напряженность электрического поля не превысит 24 В/м, а напряженность магнитного поля – 0,03 А/м. Необходимо учитывать, то поля имеют импульсный характер и лежат в микросекундном диапазоне. Указанные уровни не представляют опасности для экологии, и существенно ниже тех, на устойчивость к которым должны соответствовать все технические средства.

Степень неравномерности напряженностей электрического и магнитного полей стандартом [3.6] не регламентируется. Поля создаются каналом молнии в виде линейного вертикального к поверхности грунта проводника, по которому протекает импульсный ток. На основании этих обстоятельств можно оценить допустимую степень неоднородности полей на размерах испытываемого ТС.

Требования к уровню неоднородности напряженности электрического поля целесообразно принять по аналогии с требованиями, изложенными в разделе 3.3.

Необходимо отметить, что продольная компонента электрического поля не должна превышать 10% от напряженности поперечной компоненты. Максимальная неоднородность поперечной компоненты в рабочем объеме относительно значения в центре ПЛ не должна превышать ±3 дБ.

Логично из этого условия определить понятие «рабочий объем» как пространство в ПЛ, в котором выполняется указанное требование, и где может располагаться ТС с целью испытаний его

уровня устойчивости. На основании этих результатов сделаны следующие выводы:

– при прохождении фронта импульса в горизонтальной части ПЛ неоднородность распределения вертикальной компоненты электрического поля (компонента E_z) не превышает ±30% от среднего значения, что составляет ±1 дБ;

– для центральной части 2 х 2 м (что составляет более половины по ширине и высоте горизонтальной части ПЛ) неоднородность поля не превышает ±15%, что составляет ±0.6 дБ. При этом в центральном сечении горизонтальной области неоднородность еще ниже и не превышает ±0.3 дБ.

– другие компоненты поля составляют не более 5% от основных в центральной части горизонтальной секции ПС длиной около 3м и на расстоянии от токопроводящих элементов не менее 0.3 м.

Следовательно, ПЛ с рассмотренными габаритными размерами полностью удовлетворяет требованиям по степени однородности электрического поля.

Пространственное распределение напряженности магнитного поля описывается формулой Ампера (3.1) для линейного бесконечно длинного проводника с током. Следовательно, напряженность поля уменьшается обратно пропорционально расстоянию от канала молнии. Так, если начальной точкой выбрать точку на расстоянии 10 м от канала молнии, а конечную – на расстоянии 11 м от канала, отличие напряженности магнитного поля в этих точках составит 10%. На таком предельно близком расстоянии испытываются элементы (взрыватели) боеприпасов. Предлагается, принять в качестве условия к степени неоднородности 10% на размерах испытываемого ТС. Очевидно, что для ТС представляющих платформы с габаритными размерами десятки метров, такое условие будет трудно выполнить, без создания полеобразующей системы в виде протяженного соленоида.

Остальные требования по условиям проведения испытаний на закрытых испытательных площадках (в высоковольтных залах) аналогичные условиям испытаний на открытых площадках.

Литература к главе 3

3.1. RTCA SAE ARP 5412 Revision A. Aircraft Lightning Environment and Related Test Waveforms. -2005. – 56 p.

3.2. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". - 2010. – 292с.

3.3. ГОСТ 30585-98 Совместимость технических средств электромагнитная. Стойкость к воздействию грозовых разрядов. Технические требования и методы испытаний// В.И. Кравченко, Ю.В. Голодняк, Г.В. Кравченко и др.// Держстандарт України, Київ - 1998. - 28 с.

3.4. RTCA DO-160G /ED-14G. Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment. -2011. -438 p.

3.5. MIL-STD-461G:2011 Department of defense. Interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment. DoD.-2011.-280 p.

3.6. MIL-STD-464C:2010 Department of defense. Interface standard. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. DoD.-2010. - 165 p.

3.7. ГОСТ 50397-2011 (МЭК 60050-161-1990) Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения. М.: Стандартинформ.-2013. – 61 с.

3.8. IEC 61000-4-25:2001 Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-25: Testing and measurement techniques - HEMP immunity test methods for equipment and systems. IEC Central Office, Geneva. – 98p.

3.9. ГОСТ 1516.2-97 Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.

3.10. Шаламов С.П. Особенности формирования импульсного электромагнитного поля в полосковой линии / С.П. Шаламов // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Техника и электрофизика высоких напряжений. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. − № 15 (1237). − С. 98-102.

3.11. Test Operations Procedure (TOP) -2.511:2009 Electromagnetic Environmental Effects System Testing. - 179 p. http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a506300.pdf.

3.12. Ресурс: http://www.zandz.ru/udelnoe_soprotivlenie_grunta.html

3.13. EN 50160:2010 + corrigendum Dec. 2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks.

3.14. Lightning Electromagnetics / Edited by Vernon Cooray // IET Power and Energy Series 62.-2012.-976p.

3.15. AECTP-500 NATO STANDARD Electromagnetic Environmental Effects Tests and Verification. Edition E Version 1. -2016, 1125 p.

3.16. IEC 62305-3:2010 Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard. -2010. -160 p.

Приложение к главе 3

П.3 Ведущие испытательные центры Российской Федерации, Соединенных Штатов Америки и Украины в области обеспечения молниестойкости летательных аппаратов.

Номенклатура испытательных центров мира в области обеспечения молниестойкости летательных аппаратов незначительная и насчитывает единицы. Это связано с рядом факторов: историческими тенденциями работ в области техники и электрофизики высоких напряжений, оснащением этих центров дорогостоящим и уникальным высоковольтным испытательным оборудованием, многолетним накопленным опытом работы в этой области, а, также, метрологического обеспечения высоковольтных испытаний.

К основным странами, признанными в мире, и обладающим опытом высоких технологий по испытаниям ЛА на соответствие требований молниестойкости традиционно являются: Российская Федерация, Соединенные Штаты Америки и Украина.

П.3.1 Российская Федерация

Российская Федерация в области комплексных испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости в основном представлена Федеральным государственным унитарным предприятием «Летно-исследовательским институтом им. М.М. Громова»[3].

Основные направления работы *ЛИИ им. М.М. Громова* связаны с обеспечением молние- и электростатической защиты летательных аппаратов, отраженных в требованиях отечественных и зарубежных нормативно-методических документов для гражданских летательных аппаратов. Эти требования в процессе развития авиации претерпевали изменения и в настоящее время отражены в Нормах летной годности АП-23, АП-25, АП-29, FAR-25 и JAR-25, а также рекомендательных материалах RTCA/DO-160C(D), SAE ARP5412, ARP5416, ARP5414, FAA AC20-53A и KT-160D, для

[3] http://www.lii.ru/load/image/

военных летательных аппаратов в ОТТ, ГОСТ РВ20.39.304, ГОСТ РВ20.39.306 и ОСТ 1 01160-88.

В Институте разработана технология выполнения работ по молние- и электростатической защите самолетов и вертолетов. Разработанная технология работ включает в себя следующие основные этапы:

- испытания на избирательность ударов молнии и на растекание тока молнии;
- расчет наводимых напряжений в бортовых электрических цепях и рекомендации по определению “категорий жесткости” заказываемого бортового оборудования;
- стендовые испытания молниестойкости металлических элементов конструкции и устройств, подвижных и шарнирных элементов, а также вращающихся узлов;
- отработка систем молниезащиты агрегатов из неметаллических материалов, остекления, наружного светотехнического и специального оборудования, АФУ;
- отработка молниезащиты элементов топливной системы;
- стендовая экспериментальная проверка стойкости электрообогреваемых стекол и их системы обогрева к разрядам статического электричества;
- сертификационные испытания электростатической защиты ЛА;
- стендовые испытания бортового оборудования на молниестойкость;
- подготовка и сопровождение сертификационных документов по молние- и электростатической защите самолетов и вертолетов.

Для реализации вышеперечисленных работ институт оснащен стационарными и передвижными испытательными комплексами для воспроизведения нормируемых компонент тока молнии.

П.3.2 Соединенные Штаты Америки

Соединенные Штаты Америки в области комплексных испытаний ЛА, включая объекты ракетно-космической техники, на соответствие требованиям молниестойкости в основном представлена представлены Компанией *Lightning Technologies, Inc.*[4], которая управляет лабораторией моделирования и испытаний на воздействие молний, с целью обеспечения исследований, разработки, проектирования и испытаний для устранения угроз молнии. Она участвует в разработке и сертификации молниезащиты самолетов и других сложных систем. Компания также разрабатывает и тестирует методы защиты для различных устройств и материалов, таких как строительные материалы, а также электронное и телекоммуникационное оборудование в своей лаборатории, а также проводит множество проверок проверки косвенных эффектов на объектах клиентов. Он обслуживает производителей планера и аэрокосмического оборудования.

Институт является базовой лабораторией в мире по моделированию молнии и является международным лидером в разработке сложных систем молниезащиты для аэрокосмической промышленности, а также для промышленных комплексов высокого риска.

NTS Питтсфилд разрабатывает и тестирует молниезащиту крупных самолетов и космических аппаратов, и пусковых установок, включая космические аппараты НАСА и пусковые комплексы KSC.

Лаборатория включает специализированное и уникальное оборудование для моделирования всех электрических характеристик естественной молнии, а также переходных процессов, которые она вызывает в электрических и электронных системах.

Для воспроизведения прямых эффектов воздействия молнии используются два основных типа генераторов: высоковольтные импульсные генераторы напряжения типа «Маркс» (рис. П 3.1), которые создают напряжения до 2,4 МВ для имитации попадания лидера молнии в объект испытания, и генераторы импульсов тока до 250 кА включающие в себя три блока, адаптированные для

[4] 10 Downing Industrial Parkway Питтсфилд, MA 01201-3890 Соединенные Штаты Америки, Основанная в 1977 году www.lightningtech.com

Генераторы импульсных компонентов тока и напряжения

Генераторы импульсных компонентов тока A и D, обеспечивающие нормированное силовое воздействие тока молнии на элементы конструкции ЛА

Генераторы импульсных компонентов тока B и C, обеспечивающие нормированное термическое воздействие тока молнии на элементы конструкции ЛА

Генератор импульсных напряжений ГИН-1, обеспечивающий испытания фрагментов конструкции самолета и моделей ЛА на избирательность поражения молнией

Передвижная испытательная станция ПИК «Урал»

Испытательная станция “ПИК-Урал”, для полномасштабных испытаний самолетов по определению напряжений и токов, наводимых в электрических цепях бортового оборудования ЛА

Стенд МИМ – 3 для испытаний бортового оборудования ЛА

Стенд МИМ-3 для проведения испытаний бортового оборудования ЛА на стойкость к воздействию токов и напряжений наводимым молнией в межблочных линиях и электрожгутах

Фрагмент испытаний модели самолета на избирательность разрядов молнии

Фрагмент испытаний модели самолета на избирательность разрядов молнии

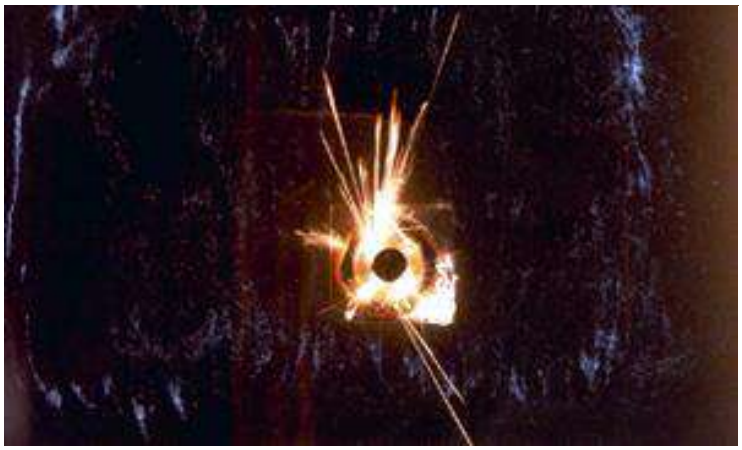
воспроизведения отдельных компонент типичного удара молнии – импульсной, промежуточной и непрерывной. Для размещения очень больших образцов для испытаний, тесты на прямые эффекты проводятся в таких помещениях, как крытая лаборатория Light-Technologies, которая измеряет 80 х 100 футов.

Испытания модели самолета
на эффект коронирования

Испытания компонентов конструкции ЛА

Образцы лопасти несущего
винта вертолета Ка-226 после
проведения испытаний на
молниестойкость

Фрагмент испытаний диэлектрического обтекателя ЛА на избирательность разрядов молнии

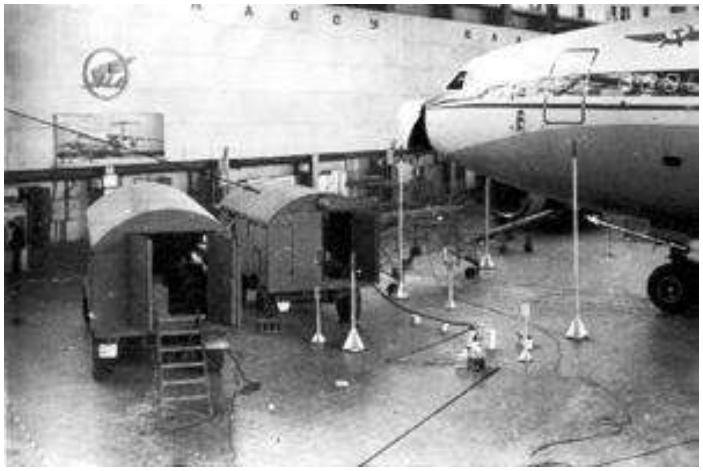


Фрагмент испытания заливной горловины на стойкость к воздействию тока молнии с отрицательным результатом

Образец панели кессон бака после проведения испытаний на стойкость к прямому воздействию тока молнии, выдержавший полномасштабное испытание током молнии без сквозного прожога

Фрагмент испытания остекления кабины экипажа на стойкость к воздействию разрядов статического электричества

Испытания самолета с помощью стенда ПИК «Урал»



Испытания самолета
Ил-96-300 по определению наводимых напряжений в электрических цепях бортового оборудования с помощью испытательного стенда ПИК «Урал»

Рис. П.3.1 – Генератор импульсных напряжений на 2,4 МВ

Персонал LTI и NTS уже много лет находятся на переднем крае разработки метода тестирования косвенных эффектов. Эти методы определены в стандартах IEEE, ANSI, SAE, EUROCAE, US MIL-STD и многих отраслевых и корпоративных стандартах и спецификациях. Лаборатория тестирования косвенных эффектов включает в себя множество специализированных устройств для полного анализа полей и переходных процессов, от уровня отдельных цепей до полностью работающих взаимосвязанных систем. Типичные тесты косвенных эффектов включают в себя штырьковые испытания, кабельную, трансформаторную и емкостную инжекцию, ввод в заземление и нагружение полем.

Также лаборатория оснащена оборудованием для моделирования меж- и внутриоблачных разрядов молнии и проведения широкого спектра испытаний на статическое электричество. Эти процедуры имитируют диапазон статических эффектов, происходящих на поверхности самолета с потенциалом 100 кВ и более.

Примеры проведения испытаний приведены на рис. П.3.2 – П.3.4.

Рис. П.3.2 – Проведение испытаний головного диэлектрического обтекателя самолета на присоединение лидера молнии

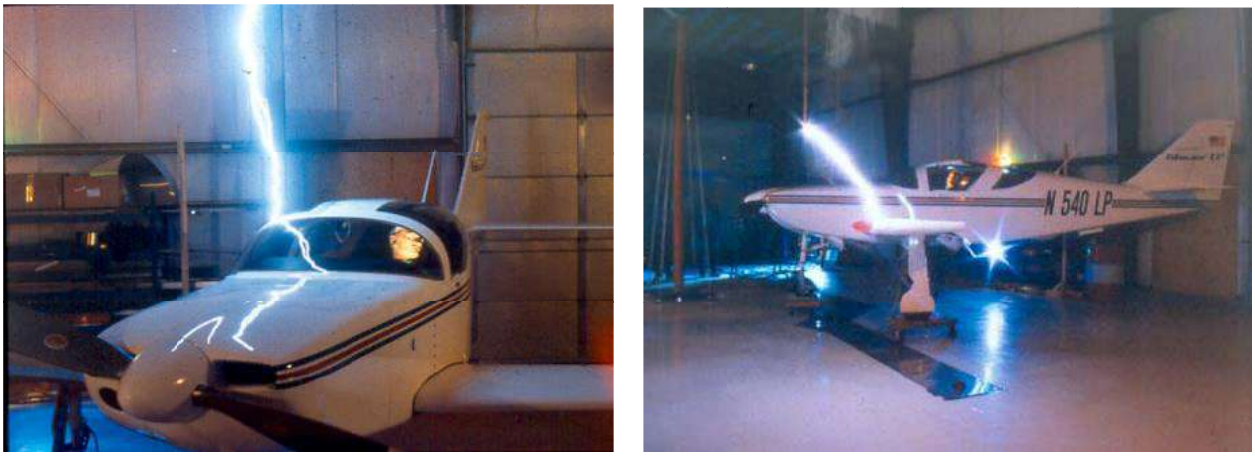


Рис. П.3.3 – Проведения испытаний на определение путей внешних перекрытий и внутренних пробоев на реальных объектах ЛА

.

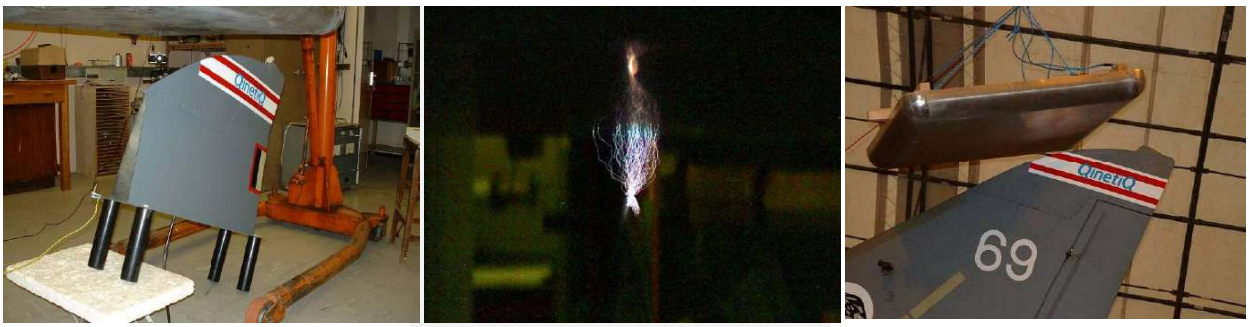


Рис.П.3.4 – Проведение испытаний по определению наведенных переходных процессов в устанавливаемом снаружи оборудовании при прямых воздействиях молнии

П.3.3 Украина

Украина в области комплексных испытаний ЛА, включая объекты ракетно-космической техники, на соответствие требованиям молниестойкости представлена Научно-исследовательским и проектно-конструкторским институтом «Молния» Национального технического университета «Харьковский политехнический институт»[5] - объект Национального достояния Украины.

Институт оснащен уникальной экспериментальной базой для проведения полномасштабных испытаний на молниестойкость объектов аэрокосмической техники как в сборе, так и ее составных частей на соответствие требованиям международной и отечественной нормативной документации: MIL-STD-464A и MIL-STD-1757A RTCA/DO-160, SAE ARP5412, ARP5416, ARP5414, FAA AC20-53A, ГОСТ 30586 – 98, ОСТ 1 01160-88.

НИПКИ «Молния» разрабатывает методы защиты и проводит сертификационные испытания самолетов, объектов ракетно-космической техники и пусковых установок, включая космические аппараты на соответствие требованиям молниестойкости.

Испытательная лаборатория института, имеющая международную аккредитацию, оснащена уникальным не имеющим аналогов в мире, специальным испытательным оборудованием для воспроизведения всех электрических параметров естественной молнии, а также переходных процессов, которые она вызывает в электрических и электронных системах испытуемого оборудования.

Общий вид экспериментальной базы НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» - объекта национального достояния Украины по проведению полномасштабных испытаний объектов ракетно-космической техники, самолетов и вертолетов приведен на рис. П. 3.5.

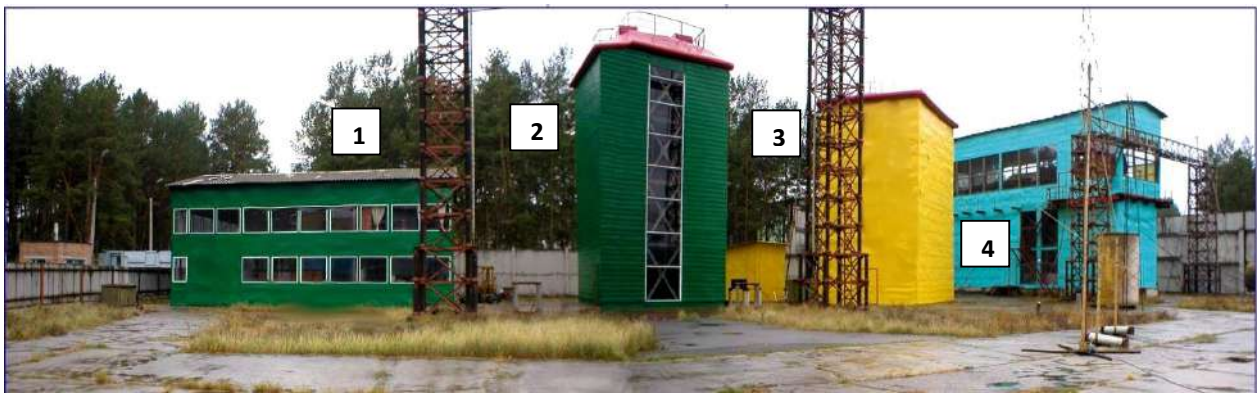
[5] Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» на рубеже тысячелетий / Под редакцией Кравченко В.И. - Х: Изд-во “НТМТ”, 2014. – 388 с. -ISBN 978-617-578-178-4.

Рис. П.3.5 - Общий вид экспериментальной базы НИПКИ «Молния»

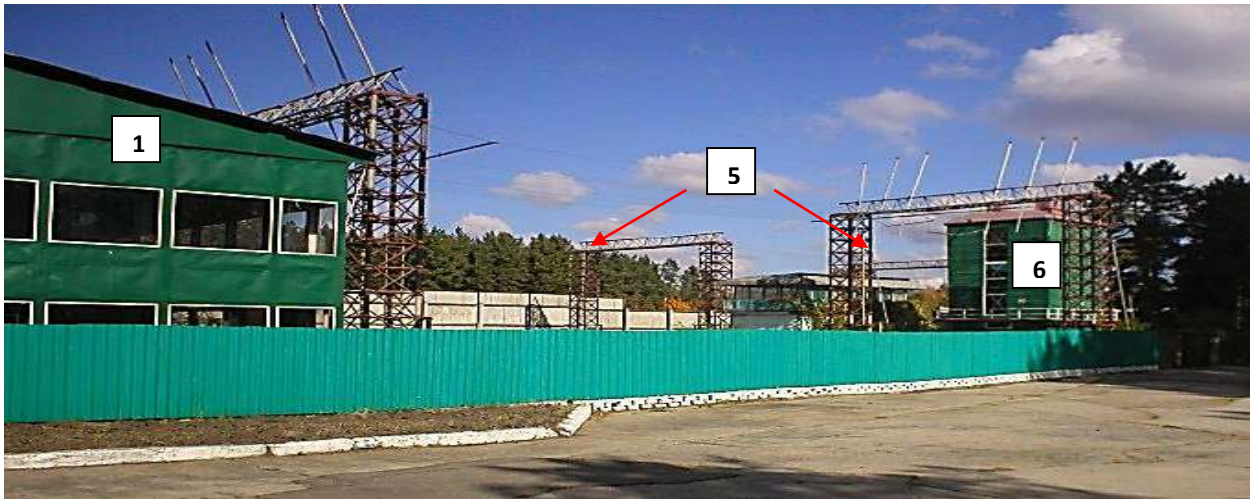
Для воспроизведения прямых эффектов воздействия молнии используются 5 генераторов импульсных напряжений от 1,2 до 14 МВ, которые создают напряжения для имитации попадания лидера молнии в объект испытания, а также генераторы импульсов тока до 250 кА, включающие в себя три блока, адаптированные для воспроизведения отдельных компонент типичного удара молнии – импульсной, промежуточной и непрерывной. Для испытаний больших образцов на прямые эффекты воздействия молнии имеется специальные открытая и закрытая испытательные площадки, оснащенные помехозащищёнными средствами метрологического обеспечения испытаний.

Также лаборатория оснащена оборудованием для моделирования меж- и внутриоблачных разрядов молнии и проведения широкого спектра испытаний на статическое электричество, которое имитирует электростатические эффектов, происходящие на поверхности самолетов и объектов РКТ с потенциалом 300 кВ.

На рис. П.3.6 приведена инфраструктура комплекса НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» (Украина) для проведения полномасштабных испытаний объектов РКТ и ЛА на прямое и косвенное воздействие молнии.



а)



б)

Рис. П.3.6 - Инфраструктура комплекса для испытаний объектов ЛА на прямое (а) и косвенное (б) воздействие молнии:

1 - комплекс генераторов импульсных токов для реализации стандарта MIL-STD-1757A и требований FAA AC № 20-55A, SAE ARP 5412;
2 – генератор импульсных напряжений на 3 МВ;
3 – генератор импульсных напряжений и токов на 4 МВ и 120 кА;
4 – формирующее устройство полеобразующей системы;
5 – системы полеобразования типа полосковых линий;
6 – комплексная нагрузка и имитатор электростатических разрядов на 300 кВ

В процессе интегрирования Украины в Европейское Сообщество (ЕС), а также во Всемирную организацию торговли (TBT/WTO) особую важность приобретает идентичность требований стандартов Украины, которые предъявляются к продукции, Европейским нормам.

Имитаторы мощных электромагнитных помех, составляющие основу испытательного комплекса, описаны в проекте международного технического отчета *Project IEC 61000-4-32 TR*

Ed.1.0. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-32: Testing and measurement Techniques- HEMP simulator compendium.

Основные технические характеристики этих имитаторов представлены в табл. П.3.1. Примененные технические решения позволяют осуществлять оперативную настройку установок для генерирования помех грозовых разрядов, коротких замыканий линий электропередачи и ряда других мощных электромагнитных эффектов, энергетика которых не превышает энергетику установок. Сравнение данных табл. П.3.1 и табл. П.3.2, позволяет утверждать, что возможности имеющихся в НИПКИ "Молния» высоковольтных установок полностью перекрывают параметры новых мощных испытательных воздействий. Следовательно, экспериментальная база Украины готова к проведению таких испытаний.

Возможности испытательных полигонов Украины по реализации новых требований к параметрам мощных электромагнитных помех естественного и искусственного происхождения

Таблица П.3.1 – Параметры испытательных воздействий

Виды испытаний	Параметры испытательных воздействий			
	ГОСТ 30585		IEC 62305-1	
	Амплитуда	Временные параметры	Амплитуда	Временные параметры
Импульсное напряжение	До 2,5 МВ	1,2/50 мкс	-	-
Ток молнии	30\100\200 кА	2,0/50 мкс	100\150\200 кА 25\37,5\50 кА 400\300\200 А	10/350 мкс 0,25/100 мкс 0,5 с
Электрическое поле	50\150\300 кВ/м	100мкс/10 мс	500 кВ/м	1 мкс
Магнитное поле	50\150\300 А/м	2,0/50 мкс	Ток/2πr	10/350 мкс
ГЭМИ: Е- компонента	15\50\100 кВ/м	0,1/1,0 мкс	-	-
Н- компонента	40\120\250 А/м	0,1/1,0 мкс	-	-

Таблица П.3.2 – Возможности испытательных установок НИПКИ «Молния»

Тип	Амплитуда, МВ	Рабочий объем, м	Е-поле, кВ/м	Н-поле, А/м	Длительности, нс	
					Фронт	Спад
ИЭМИ-10	2,5	12x12x20	140	370	20,0	350-400
ГИН - 1,6	1,6	5x5,6x15	150	400	5,0	200-2500
ИЭМИ-М5	0,7	3x4x7	330	875	5,0	200-250
ГИН-12-30	4,5	30x50x50	120	318	5,0	200-280

Также испытательная лаборатория НИПКИ «Молния» оснащена комплексом генераторов наведенных напряжений и токов для сертификационных испытаний бортового оборудования ЛА на соответствие требованиям RTCA/DO-160.

Примеры проведения испытаний бортового оборудования ЛА приведены на рис. П.3.7 – П.3.10.

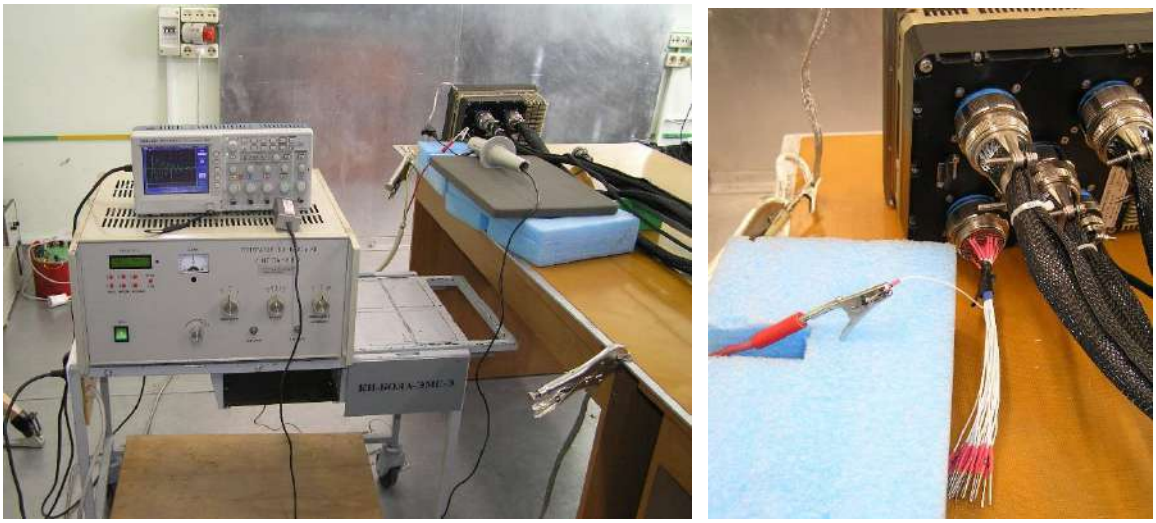


Рис. П.3.7 - Метод «контактного ввода» р. 22 DO-160

Рис. П.3.8 - Метод «кабельного ввода» р. 22 DO-160

Рис. П.3.9 - – Метод «кабельной инжекции» р. 22 DO-160

Рис. П.3.10 - Испытание методом «ввода в заземление» р. 22 DO-160

ГЛАВА 4 МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ЛА НА СООТВЕТСТВИЕ ТРЕБОВАНИЯМ МОЛНИЕСТОЙКОСТИ

4.1. Основы метрологического обеспечения испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости

Метрологическое обеспечение испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости носит комплексный характер и включает в себя:

– анализ требования НД к амплитудно-временным параметрам полей, токов и напряжений молнии, которым подвергаются объекты испытаний;

– требования к испытательному оборудованию – имитаторам, способных генерировать регламентируемые НД электрические, магнитные (электромагнитные) поля, токи и напряжения молнии;

– требования к средствам измерительной техники, обеспечивающей достоверность измерения параметров внешних воздействующих факторов молнии с заданной погрешностью;

– алгоритм проведения испытаний уровня устойчивости (стойкости) ЛА к воздействию поражающих факторов молниевых разрядов;

– описание возможных вариантов реализации требований стандарта, с учетом степени влияния геометрических и электрофизических параметров имитатора на процессы формирования поражающих факторов молнии;

– практические рекомендации по обеспечению достаточного уровня защиты средств измерительной техники (СИТ), используемых на имитаторах, а также контрольно-измерительной аппаратуры, обеспечивающей контроль качества функционирования, объекта испытания;

– пошаговый алгоритм определения уровня устойчивости (стойкости) ЛА к воздействию поражающих фактором молнии, в рамках которого сформулированы требования к методике мониторинга качества функционирования объекта испытания;

– методику поиска наиболее уязвимого электронного узла или компонента, который является «слабым звеном», определяющим уровень устойчивости объекта испытания.

Практическая реализация испытаний объектов на поражающее воздействие и дестабилизирующее влияние электромагнитных факторов грозовых разрядов в аспектах метрологического обеспечения, в обязательном порядке, содержит в себе:

- измерение с требуемой погрешностью амплитудно-временных (частотных) параметров внешних воздействующих электромагнитных факторов молнии;
- измерение реакции объекта в целом и/или его систем, блоков и узлов;
- обязательную поверку и аттестацию применяемых при испытаниях измерительных систем и контрольно-регистрирующей аппаратуры.

Опыт метрологического обеспечения испытаний свидетельствует, что для регистрации основных функциональных параметров испытуемых объектов применяются стандартизованные средства измерения и контроля режимов их работы. В остальных случаях, как правило, приходится использовать не стандартизованные, серийно не выпускаемые средства измерения.

При проведении испытаний должны применяться измерительные средства, отвечающие следующим требованиям [4.1]:

- иметь, по сравнению с уровнем измеряемых помех, более высокую степень помехозащищенности;
- быть способными измерять однократные или редко повторяющиеся сигналы;
- регистрировать одновременно амплитудные и временные параметры электрических сигналов;
- не оказывать влияния на режимы работы тестируемых цепей объекта испытания в случае непосредственного подключения к его цепям;
- иметь широкий амплитудный и временной (частотный) диапазон измерений.

В процессе проведения испытаний объектов на соответствие требованиям молниестойкости контролю подлежат амплитудно-временные характеристики и формы:

- воздействующих на объект испытательных импульсов высокого напряжения;

- воздействующих на объект токов молнии полного и/или частичного воспроизведения;

- воздействующих на объект импульсных электрических полей:

- воздействующих на объект импульсных магнитных полей:

- импульсных электрических полей внутри объекта испытания, ограниченного его корпусом-экраном;

- импульсных магнитных полей внутри объекта испытания, ограниченного его корпусом-экраном;

- токов и напряжений, наводимых на внешних и внутренних цепях объекта испытания, и реакции систем, блоков и узлов в их контрольных точках.

Методы метрологического обеспечения испытаний ТС на соответствие требованиям молниестойкости, получившие наиболее широкое распространение и апробированные на практике приведены в [4.1 - 4.3].

4.2. Метрологические требования к средствам измерительной техники при проведении испытаний ЛА по параметрам молниестойкости

При проведении испытаний ЛА на соответствие требованиям молниестойкости необходимо регистрировать импульсные процессы.

Измерительный комплекс испытаний на молниестойкость ЛА на *прямой удар молнии* состоит из:

– измерителей импульсов напряжения (ИИН) форм B и D;

– измерителей импульсов тока (ИИТ) всех компонент испытательных токов ajhv A, B. C и D;

– регистрирующих устройств (осциллографы).

Все средства измерительной техники должны иметь необходимую полосу пропускания и линейную амплитудную характеристику, для того, чтобы без искажений измерять форму и амплитудно-временные параметры испытательных импульсов.

Эти условия выполняются, если все применяемые средства измерения будут пассивными (т.е. в них не будет электронных узлов

с ограниченным амплитудным диапазоном, а в измерителях тока не будет магнитных сердечников).

Метрологические характеристики средств измерения должны учитывать следующие параметры измеряемых импульсов:

- форма измеряемых импульсов;
- диапазон амплитуд измеряемых импульсов $A_{min} - A_{max}$;
- длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$;
- длительность измеряемых импульсов T_c;
- допустимая погрешность (неопределенность) измерения импульсов δ, %.

В соответствии с международными нормативными документами способность средств измерения передавать без искажения форму и временные характеристики измеряемых импульсов обеспечивается переходной характеристикой (ПХ).

ПХ – это реакция средств измерения на единичный скачок измеряемой величины. Форма ПХ зависит от формы измеряемых импульсов может иметь форму в виде биэкспоненциального импульса (рис. 4.1).

Временные характеристики ПХ характеризуются временем нарастания $T_н^{ПХ}$, которое определяется интервалом времен между 0,9А и 0,1А ($T_н^{ПХ} = T_{0,9} - T_{0,1}$) и длительностью спада ПХ $T_c^{ПХ}$, которая определяется интервалом времен между 0,5мах на спаде и фронте ПХ.

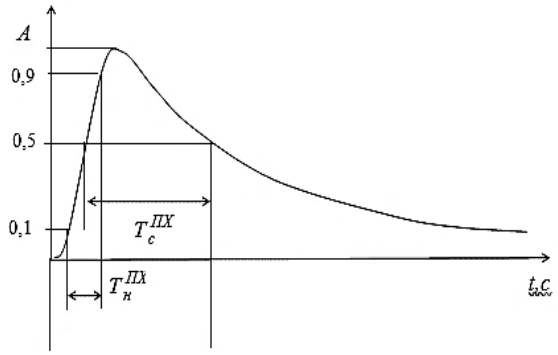


Рис. 4.1 – Форма ПХ средств измерения импульсных процессов

В материалах процедуры испытаний [4.4, с.5], указываются общие требования к средствам измерительной техники (СИТ) при проведении испытаний по стандарту [4.5]:

- Все СИТ для испытаний регулярно калибруются аккредитованными лабораториями по процедурам утвержденным национальным институтом стандартизации.

- Средства измерений испытываемого изделия допускаются к применению, но они не должны влиять на результаты испытаний. Чтобы минимизировать возможность влияния средств измерений на результаты испытаний следует:

а) использовать средства измерений и линии передачи информации (ЛПИ) на основе волоконной оптики;

б) использовать экранированную витую пару, если применена кабельная ЛПИ;

в) подключать датчики, помещаемые внутрь ТС только с использованием волоконно-оптической линии связи (ВОЛС).

К нормированным точностным характеристикам (НТХ) СИТ импульсных процессов в соответствии со стандартом ДСТУ ГОСТ 8.256-2008 [4.6] относятся:

– форма переходной характеристики (ПХ) – это реакция СИТ на единичный скачок измеряемой величины;
– время нарастания ПХ на уровнях (0,1 – 0,9) ($T_н^{ПХ}$);
– время спада ПХ на уровне 0,5 ($T_c^{ПХ}$);
– коэффициент преобразования $K_п$;
– погрешности измерения или неопределенность.

Форма ПХ у СИТ, предназначенных для измерения импульса представленного на рисунке 1.3, также может быть биэкспоненциальной, но при этом обязательно должны быть выполнены условия $T_н^{ПХ} \leq \frac{1}{3}T_ф$ и $T_c^{ПХ} \geq 10T_c$. [4.7, с.40]. Следовательно, для параметров измерения импульсов полей молнии параметры СИТ должны удовлетворять следующим условиям:

- *СИТ для измерения Е –поля:* $T_н^{ПХ} \leq 60$ нс; $T_c^{ПХ} \geq 500$ мкс;
- *СИТ для измерения Н –поля:* $T_н^{ПХ} \leq 1$ мкс; $T_c^{ПХ} \geq 200$ мкс.

Коэффициент преобразования $K_п$ определяется по формуле:

$$K_п = \frac{U_{max}^{рег}}{E_{max}(H_{max})} \qquad (4.1)$$

где: $U_{max}^{рег}$ – напряжение на выходе СИТ.

$K_п$ подбирается в зависимости от чувствительности регистратора (обычно осциллографа), и поэтому выбор типа датчика с

определенной величиной K_n осуществляется только после выбора регистратора из условия, что отображение $U_{max}^{рег}$ на экране осциллографа будет занимать не менее половины экрана.

Анализ амплитудно-временных регистрируемых параметров измеряемых импульсов напряжения, тока, напряженности электрических, магнитных (электромагнитных) полей показывает, что осциллограф должен иметь:

– полосу пропускания – не менее 100 МГц;
– чувствительность – от 1 мВ/дел. до 5 В/дел.
– функцию «МАТЕМАТИКА»;
– количество каналов – не менее 2, если применяется один осциллограф;
– входное сопротивление – 1 МОм и 50 Ом.

Этим условиям удовлетворяют практически все современные осциллографы, а в Испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» применяются осциллографы фирмы Tektronix (рис. 4.2).

Рис. 4.2 – Осциллографы фирмы Tektronix, применяемые в испытательной лаборатории НИПКИ «Молния» (Украина)

Климатические требования для измерителей должны соответствовать условиям окружающей среды, при которых проводятся испытания.

В общем случае, климатические требования соответствуют нормальным условиям:

- температура окружающего воздуха от -20 до + 40 ºС ;

- относительная влажность воздуха при температуре + 20 ºС не более 90 %;

- атмосферное давление, 730 –790 мм рт. ст.

Вопросы заземления и экранирования измерительного оборудования являются основными с точки зрения метрологии. Однако, они являются частными при подготовке и проведении испытаний, т.к. являются составной частью раздела «Техника безопасности» (ТБ). Данный раздел является обязательным, т.к. испытательные установки – это высоковольтные установки (выходное напряжение до 4000 кВ и выходной ток до 200 кА).

4.3. Методы измерения регистрируемых параметров молниестойкости ЛА при испытаниях

4.3.1 Методы измерения высоких импульсных напряжений

Данный вид средств измерения наиболее изучен и широко применяются в мировой практике [4.3, 4.7, 4.8]. Как правило, это высоковольтные делители напряжения (ДН) четырех основных видов:

– омические делители напряжения (ОДН), состоящие исключительно из активных резисторов с временной областью применения – от 10^{-6} с до постоянного напряжения;

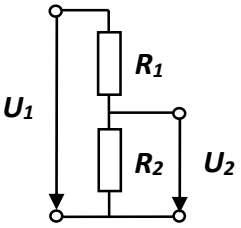
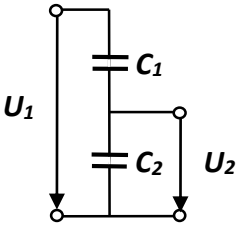
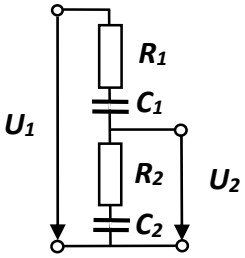
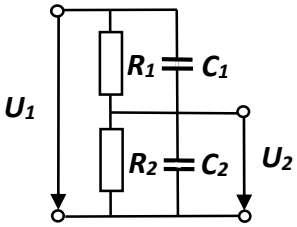
– емкостные делители напряжения (ЕДН), которые содержат в своей основе конденсаторы с временной областью применения – от 10^{-8} до 10^{-5} с;

– демпфированные делители напряжения с улучшенными, по сравнению с ОДН и ЕДН характеристиками;

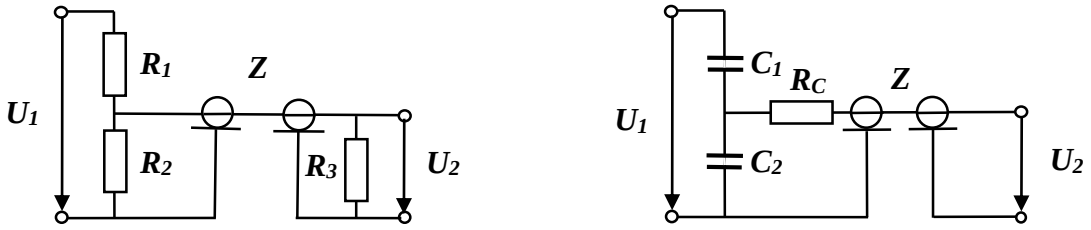
– смешанные делители напряжения, представляющие собой комбинацию из параллельно включенных между собой ОДН и ЕДН, и, тем самым, объединяя достоинства обоих видов ДН.

В табл. 4.1 приведен перечень типов делителей напряжения и их основные характеристики.

Таблица 4.1 – Типы делителей напряжения и их основные характеристики [4.1]

Тип делителя напряжения	Коэффициент передачи, $K=U_2/U_1$	Назначение
Омический 	$K_R = 1 + \frac{R_1}{R_2}$	Для измерений низкочастотных сигналов большой амплитуды. Как правило, R_1 выбирают в пределах 0,4 ...2,5 кОм, при этом достигается предельно минимальное для омических делителей высокого напряжения время реакции (порядка 10^{-8}с).
Емкостной 	$K_C = 1 + \frac{C_1}{C_2}$	Для измерений сигналов наносекундной длительности. Величина емкости C_1 обычно выбирается порядка 10^{-10} Ф. При измерении импульсов большой длительности емкостной делитель имеет значительные погрешности.
Демпфированны 	$K_C^R = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{C_1}{C_2}$	Для измерений сигналов большой амплитуды и малой длительности. Имеет улучшенные характеристики измерения в области высоких частот. Демпфирующий резистор R_1 должен иметь величину в несколько сот Ом. Наилучшие передаточные свойства достигаются при выполнении условия $R_1C_1=R_2C_2$
Смешанный 	$K_{RC} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{C_2}{C_1}$	Для измерения сигналов в широком частотном и временном диапазонах. Имеет улучшенные характеристики в области низких частот по сравнению с емкостным делителем. Величина емкости C_1 выбирается такой же, как и для емкостного делителя напряжения. Наилучшие передаточные свойства достигаются при выполнении условия $R_1C_1=R_2C_2$

В качестве регистраторов амплитудно-временных параметров и формы измеряемого импульсного напряжения, как правило, используют электронные осциллографы.



а) б)

Рис. 4.3 – Варианты согласования измерительного кабеля с помощью параллельного включения сопротивления со стороны входа осциллографа (а) и последовательного включения сопротивления со стороны делителя напряжения (б) ($R_3 = R_C = Z$)

Для согласования измерительного кабеля с помощью сопротивления, включенного параллельно входу осциллографа, необходимо выполнять условие $R_3 = Z$ (где Z – волновое сопротивление кабеля). При этом коэффициент передачи будет:

$$K = U_2 / U_1 = R_3^2 / \left[R_1 R_2 + R_3 (R_1 + R_2)\right]. \qquad (4.2)$$

Если согласование измерительного кабеля осуществляется на его входе с помощью последовательного включения сопротивления, то сигнал, равный по амплитуде половине падения напряжения на низковольтном плече делителя, распространяясь по кабелю, отражается от его разомкнутого конца (высокоомного входа осциллографа) без изменения знака. Отраженный сигнал возвращается к началу измерительного кабеля, где вследствие

согласования сопротивлений отражения не происходит. В результате на выходе получается сигнал, равный по амплитуде падению напряжения на низковольтном плече делителя напряжения.

Для быстроизменяющихся процессов и высоких частот в случае применения емкостного делителя напряжения коэффициент передачи составляет:

$$K = U_2 / U_1 = C_1 / (C_1 + C_2 + C_к + C_{вх}), \qquad (4.3)$$

где $C_к$ – емкость измерительного кабеля; $C_{вх}$ – входная емкость осциллографа.

Общие требования, предъявляемые к делителям напряжения, при условии согласования выхода тестируемой цепи с входом измерительного прибора состоят в следующем [4.1, 4.2]:

- делитель напряжения должен иметь как можно большее входное сопротивление;
- частотная характеристика делителя напряжения должна быть такой, чтобы в широкой полосе частот не вносить заметных искажений в исследуемый процесс;
- выходное сопротивление делителя напряжения должно быть малым по сравнению с входным сопротивлением осциллографа, величина которого при выполнении условий согласования не должна превышать значения волнового сопротивления кабеля.

При измерении импульсных сигналов с использованием электронно-лучевого осциллографа, большое значение имеет полоса пропускания канала горизонтального отклонения луча осциллографа. Она должна, по возможности, обеспечить передачу всех основных гармоник в спектре тестируемого импульсного сигнала. Так, для прямоугольного импульса длительностью $\tau_и$ ширина его спектра составляет $\Delta f > 2/\tau_и$. При этом верхняя граничная частота $f_в$ полосы пропускания усилителем канала горизонтального отклонения луча осциллографа должна быть не ниже верхнего значения диапазона Δf .

Нижняя граничная частота, которая определяет неравномерность вершины прямоугольного импульса ΔU_{max} относительно его амплитуды U_{max} в пределах 5%, определяется из выражения:

$$f_н \le 8{,}3 \cdot 10^{-3} / \tau_и . \qquad (4.4)$$

Для достижения минимальных искажений длительности фронта измеряемых импульсов верхняя граничная частота полосы пропускания осциллографа должна выбираться из условия:

$$f_в \ge 0{,}52 / \tau_ф . \qquad (4.5)$$

Приведенные ограничения обеспечивают минимизацию погрешности, как при измерении прямоугольных импульсов, так и при измерении импульсов экспоненциальной формы.

Метрологические характеристики измерителей импульсных напряжений, предназначенных для измерения испытательных напряжений форм B и D.

- Метрологические характеристики ИИН для измерения напряжений формы B.

1. Форма измеряемых импульсов (форма 1,2/50 мкс (±20%), общепринятая в мировой практике для грозовых испытаний стандартным импульсом).
2. Максимальная амплитуда измеряемых импульсов 140 кВ ± 20 %.
3. Длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$, мкс 1,2 ± 30 %.
4. Длительность полуспада измеряемых импульсов $T_с$, мкс 50 ± 30 %.
5. Коэффициент деления $K_п \ge 5000$.
6. Время нарастания ПХ, нс ≤ 400.
7. Время спада ПХ, мкс ≥ 500.
8. Погрешность измеряемых импульсов δ, % < 5.

- Метрологические характеристики ИИН для измерения напряжений формы D (ИИН-D).

1. Форма измеряемых импульсов (форма 50/250 мкс (±20%), общепринятая в мировой практике для грозовых испытаний коммутационным импульсом).
2. Максимальная амплитуда измеряемых импульсов 600 кВ (±20%).

3. Длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$, мкс 50 ± 30 %.
4. Длительность полуспада измеряемых импульсов T_c, мс 250 ± 20 %.
5. Коэффициент деления $K_n \geq 20000$.
6. Время нарастания ПХ, мкс ≤ 10.
7. Время спада ПХ, мс ≥ 20.
8. Погрешность измеряемых импульсов δ, % < 5.

Делители напряжения относятся к средствам измерения импульсов напряжения испытательных воздействий при прямом ударе молнии. В НИПКИ «Молния» (Украина) разработана серия ДН для измерения выходных высоких импульсных напряжений, основные метрологические характеристики которых приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2 – Основные метрологические характеристики ДН разработанных в НИПКИ «Молния» (Украина)

Метрологическая характеристика	Тип ДН		
	ДН-50	ОДН-300	УИВН-ОДН-1,2
Амплитуда импульсов измеряемого напряжения, кВ	50	300	1200
Время нарастания переходной характеристики, нс	< 150	< 125	< 100
Время спада переходной характеристики, мкс	∞	∞	∞
Коэффициент деления	200	12000	40000
Погрешность измерения амплитуды импульсов напряжения, %	1,5	2,7	3,3
Погрешность измерения временных параметров измеряемых напряжений, %	1	1	1

На рис. 4.4 приведены принципиальная электрическая схема и общий вид одного из таких ДН на 50 кВ.

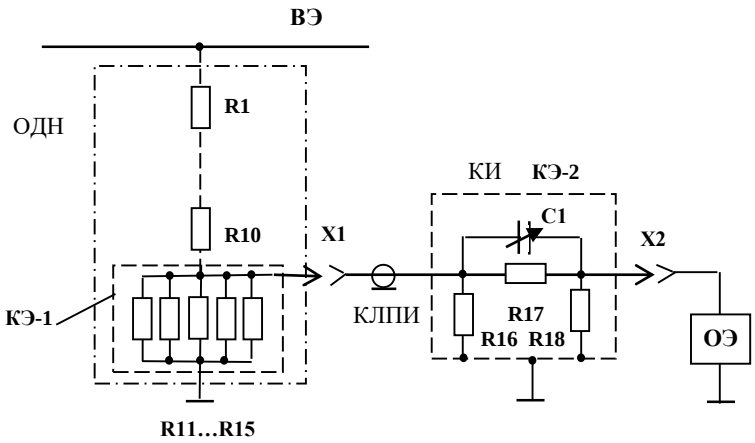


Рис. 4.4 – Принципиальная электрическая схема и внешний вид ДН на 50 кВ

Приведенный на рис. 4.4 делитель представляет собой омический делитель напряжения, состоящий из 10 последовательно соединенных резисторов типа ТВО-20, образующих высоковольтное плечо, и 5-ти параллельно соединенных резисторов типа ТВО-0,5, образующих низковольтное плечо. Для снижения времени нарастания переходной характеристики данного типа ДН по сравнению с ОДН традиционного вида в конструкции дополнительно введены:

- высоковольтный экран (ВЭ), предназначенный для компенсации паразитных емкостей ОДН путем выравнивания распределения импульсного напряжения вдоль высоковольтного плеча делителя;
- корректор импульсов (КИ), который дополнительно выравнивает частотную характеристику ОДН в области высоких частот;
- низковольтное плечо ОДН состоит из нескольких параллельных ветвей, что позволяет скорректировать паразитную индуктивность ОДН, добившись выполнения соотношения:

$$\frac{L_{вп}}{R_{вп}} = \frac{L_{нп}}{R_{нп}}, \qquad (4.6)$$

Где $L_{вп}, R_{вп}, L_{нп}, R_{нп}$ - индуктивности и сопротивления, высоковольтного плеча и низковольтного плеча ОДН, соответственно.

Коэффициент преобразования, называемый коэффициентом деления ($К_д$), определяется по формуле:

$$K_д = \frac{R_{вп}}{R_{нп}} \cdot K_{осл}^{КИ}, \qquad (4.7)$$

где $K_{осл}^{КИ}$ - степень ослабления выходного сигнала корректирующими цепями.

Для измерения испытательных импульсов напряжений форм B и D (см.рис.1.1) применяются омические делители высокого напряжения. В практике испытательной лаборатории это делители типов (рис. 4.5 а) ОДН-300 или УИВН-ОДН-1,2 (рис. 4.5 б).

Рис. 4.5 – Общий вид устройств ОДН-300 (а) и УИВН-ОДН-1,2 (б)

4.3.2 Методы измерения больших импульсных токов

Для измерения больших импульсных токов наибольшее распространение получили средства измерения двух видов [4.8, - 4.10]:

- контактные - на базе измерительных активных резисторов, называемых *шунтами*;
- бесконтактные – на базе преобразователей типа воздушных трансформаторов (наиболее распространенный вид которых является пояс *Роговского*).

Шунты чаще всего применяются для измерения крутых импульсов тока (в диапазоне времен от 10^{-9} до 10^{-5} с) в том случае, когда имеется возможность их включения в рассечку цепи с измеряемым током.

Измерение импульсных токов шунтами базируется на установлении соотношения между измеряемым током и падением напряжения на сопротивлении шунта $R_ш$, включаемого в цепь с измеряемым током.

Падение напряжения $u_ш(t)$ будет пропорционально измеряемому току $i(t)$ если сопротивление шунта $R_ш$ для данного частотного диапазона является в основном активным

$$u_ш(t) = R_ш i(t) \tag{4.8}$$

Шунты для измерения импульсных токов изготовляются в основном из материалов с большим удельным сопротивлением (константан, манганин, нихром) или путем параллельного соединения большого числа низкоомных резисторов. Шунт имеет раздельные выводы для присоединения к цепи с измеряемым током и для съема падения напряжения.

В основном применяются шунты цилиндрической конструкции, которые изготовляются из цилиндрических труб. Съем напряжения производится с внутренней поверхности трубы, что обеспечивает сведение к минимуму взаимной индуктивности токовой и измерительной цепей (рис. 4.6 а). С целью уменьшения собственной индуктивности цилиндрический шунт помещают в трубу из хорошо проводящего материала, тем самым образуя малоиндуктивную коаксиальную систему (рис. 4.6 б).

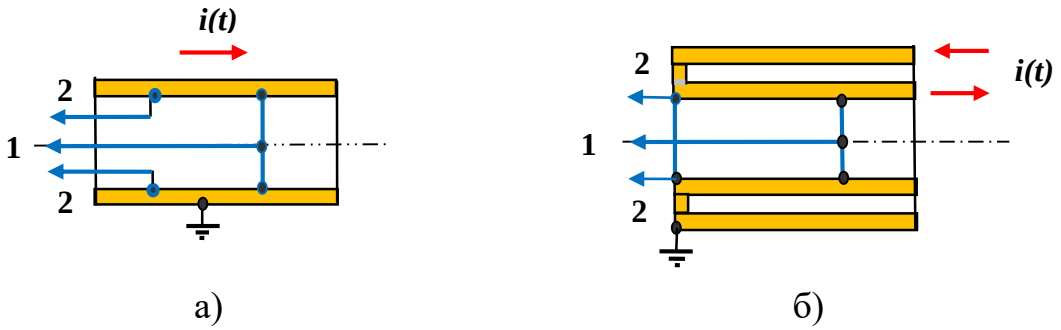


Рис. 4.6 – Конструкции цилиндрических шунтов
а – трубчатый;
б – коаксиальный;
1 и 2 - точки подсоединения жилы и оболочки коаксиального кабеля соответственно..

Измерительная часть схемы дополняется кабелем и согласующими резисторами, включаемыми в начале и конце кабельной линии (рис. 4.7).

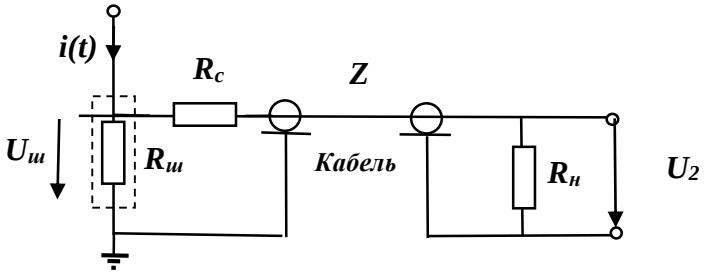


Рис. 4.7 – Схема измерения импульсных токов с помощью шунтов
Z – волновое сопротивление кабеля;
R_c – согласующий резистор
$Z = R_н$; $R_c = R_н - R_ш$

Согласующий резистор R_c включается в начале кабеля последовательно между жилой и шунтом, в конце кабеля включается сопротивление нагрузки $R_н$ между жилой и оболочкой кабеля, которое также выполняет согласующие функции. Поскольку сопротивление шунта намного меньше волнового сопротивления кабеля, омическое сопротивление включаемых согласующих резисторов равно волновому сопротивлению измерительного кабеля

и напряжение U_2 будет в 2 раза меньше по амплитуде, чем напряжение на шунте.

В НИПКИ «Молния» (Украина) для проведения испытаний ТС на молниестойкость разработаны и эксплуатируются серия импульсных измерительных коаксиальных шунтов ШК-50, ШК-300 и ИШК-300 общий вид которых приведен на рис. 4.8.

а)

б)

в)

Рис. 4.8 – Общий вид коаксиальных шунтов ШК-50 (а), ШК-300 (б) и ИШК-300 (в) разработки НИПКИ «Молния» (Украина)

Метрологические и технические характеристики этих шунтов приведены в табл. 4.3.

Таблица 4.3 –Метрологические и технические характеристики коаксиальных шунтов ШК-50, ШК-300 и ШКИ-300

Наименование параметра или характеристики	ШК-50	ШК-300	ШКИ-300
Амплитуда импульсов измеряемого тока, кА	от 0,1 до 50	от 1 до 300	от 1 до 300
Величина активного сопротивления, Ом	0,024 ± 10 %	$(0{,}176 \pm 0{,}001) \cdot 10^{-3}$	$2{,}52 \times 10^{-4}$
Время нарастания переходной характеристики, $T_н^{ПХ}$, нс	2	50	60
Погрешность измерения амплитуды импульсов токов, %	0,5	0,5	2
Погрешность измерения временных параметров токов, %	0,5	0,5	0,5
Габаритные размеры, мм: - ИКР (высота х ширина) - ИК (длина)	 300 х 90 60000	 92 х 104 10000	 100 х 400
Вес (без измерительного кабеля), кг	3	2,2	0,6
Время непрерывной работы, час.	8	8	8

Примечание: Рассеиваемая энергия не более 650 Дж

Пояс Роговского предназначен для безконтактного измерения токов с амплитудой до нескольких мегаампер, но с большими временами нарастания в пределах от 10^{-6} до 10^{-1} с. Данный вид преобразователя представляет собой катушку, индуктивно связанную с проводником, по которому протекает измеряемый ток (рис. 4.9).

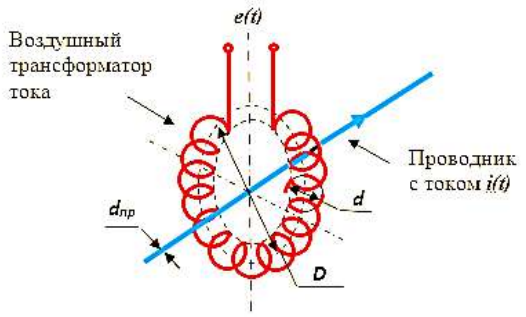


Рис. 4.9 – Измерения тока в цепи с помощью воздушного трансформатора типа пояса Роговского

Катушка воздушного трансформатора охватывает проводник с измеряемым током и обычно выполняется однослойной в виде тора, имеющего круглое или квадратное сечение. Ее индуктивность при плотной намотке составляет:

$$L_к = \frac{\mu_0 \pi^2 (D-d)^2 (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2d^2{}_{пр}} \quad . \qquad (4.9)$$

При протекании по проводнику тока *i(t)* в катушке воздушного трансформатора индуцируется ЭДС, практически не зависящая от положения в ее плоскости проводника с измеряемым током:

$$e(t) = -M di(t)/dt \, . \qquad (4.10)$$

Коэффициент пропорциональности *M* – взаимная индуктивность между катушкой воздушного трансформатора и проводником с измеряемым током, величина которой определяется с помощью аналитического выражения:

$$M = \frac{\mu_0 \pi^2 (D-d)^2 (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2d^2{}_{пр}} \quad . \qquad (4.11)$$

Чтобы на выходе измерительной системы получить напряжение $u_2(t)$ пропорциональное измеряемому току *i(t)*, необходимо применять интегрирующие устройства *RL* или *RC* типа (рис. 4.10).

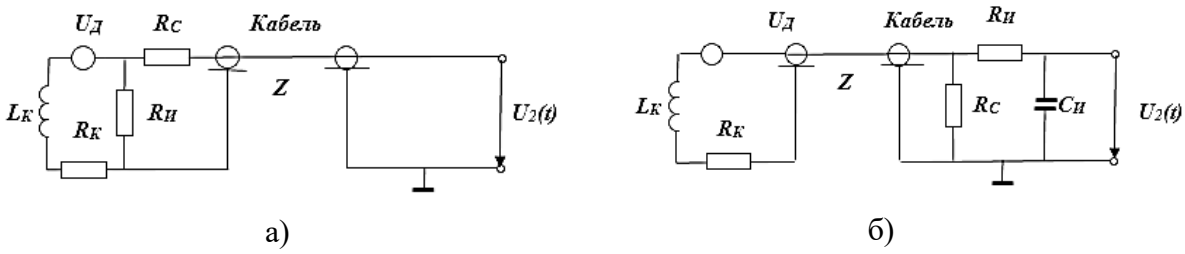


Рис. 4.10 - Схемы замещения индукционного преобразователя в режиме самоинтегрирования (а) и при интегрировании с помощью $R_и C_и$ – цепочки (б)
$R_к$ – активное сопротивление катушки преобразователя;
L_K – индуктивность катушки преобразователя;
$R_с$ – согласующее сопротивление ($R_с = Z$);
Z – волновое сопротивление кабеля.

Для интегрирования с помощью *RL*-цепи (рис. 4.10 а) на выходе измерительной схемы включают резистор $R_и$, сопротивление которого должно быть много меньше волнового сопротивления кабеля *Z*. В качестве интегрирующей индуктивности *L* выступает собственная индуктивность измерительной катушки воздушного трансформатора (самоинтегрирующий пояс Роговского). При этом необходимо выполнение условия $\omega L >> (R_И + R_K)$, где R_K – собственное активное сопротивление катушки воздушного трансформатора.

Тогда:

$$u_2(t) = M\frac{R_и}{L_к}i(t) \ . \qquad (4.12)$$

Чтобы погрешность измеряемых импульсных токов длительностью $\tau_и$ при применении самоинтегрирующего пояса Роговского не превышала 5% необходимо соблюдение условия:

$$\frac{L_к}{R_и + R_к} \geq 10\tau_и \ . \qquad (4.13)$$

Для достижения 5% погрешности измеряемого импульса тока по фронту $\tau_ф$ за счет влияния паразитной емкости катушки воздушного трансформатора необходимо выполнение следующего условия:

$$\tau_{ф} \geq 30\sqrt{\frac{\mu_0 \varepsilon_0 d^3 (D-d)}{D d_{пр}}} \quad . \qquad (4.14)$$

Практическая реализация самоинтегрирующего пояса Роговского сложна. Это связано с тем, что при выполнении основного условия $\omega L >> (R_И + R_К)$ в обмотке измерительной катушки начинает сказываться влияние скин-эффекта, что приводит к уменьшению собственной индуктивности катушки и увеличивается погрешность измерения. В основном, самоинтегрирующие системы применяются для измерений импульсных токов наносекундного временного диапазона.

При необходимости измерения импульсных токов микро- и миллисекундного диапазона, применяют интегрирование с помощью *RC*- цепочек (рис. 4.10 б). Если выполняется условие $1/\omega C_И << R_И$ и $\omega L_к << Z$ то:

$$u_2(t) = \frac{M}{R_И C_И} i(t) \quad . \qquad (4.15)$$

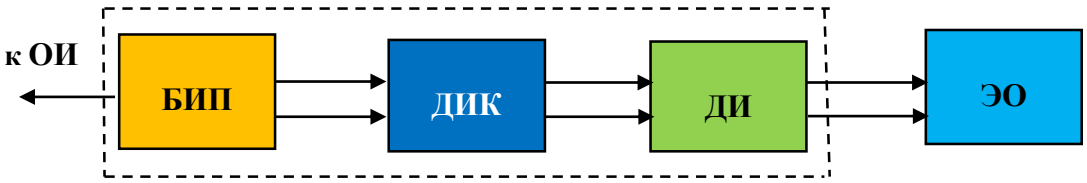
Применение данного метода интегрирования приводит к появлению искажений формы измеряемого импульса тока, связанных со сглаживанием фронта импульса $\tau_ф$ и укорачиванием длительности импульса $\tau_и$.

Для уменьшения искажений формы измеряемого импульса тока в пределах 5% необходимо выполнять следующие условия:

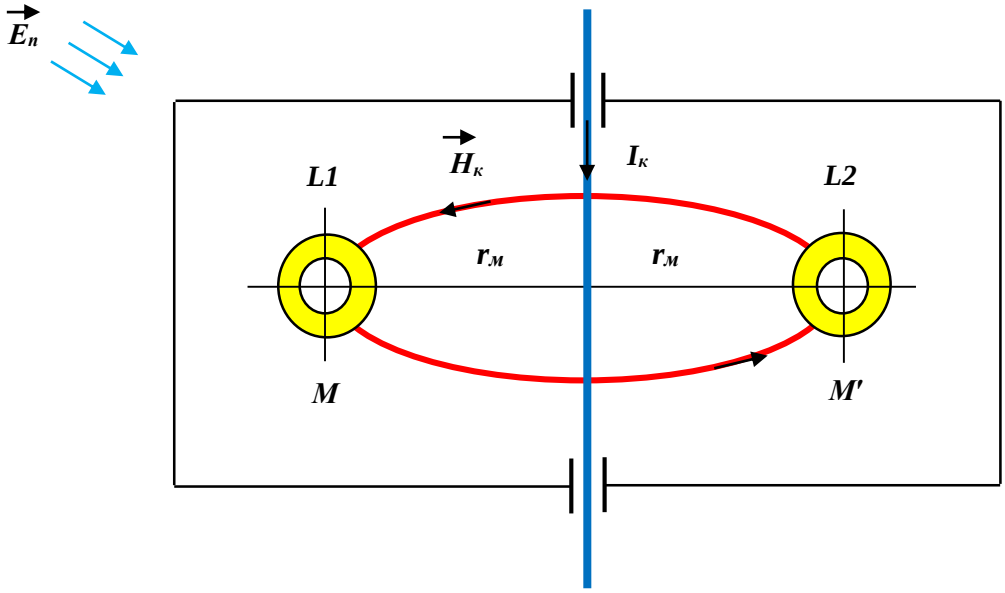
$$\tau_ф \geq 10 L_к / R_и \ , \quad \tau_и \leq 0{,}1 R_и C_и \ . \qquad (4.16)$$

В НИПКИ «Молния» разработан и создан качественно новый вид измерителя тока на основе воздушного трансформатора с использованием двух индукционных преобразователей. Он позволяет осуществлять измерения однократных и периодических импульсов токов в широком амплитудном и временном диапазоне с определением их формы и измерения амплитудно-временных параметров.

Структурная схема измерителя приведена на рис. 4.11.



а)



б)

Рис. 4.11 – Структурная схема (а) и принцип работы измерителя токов ИИТ-10

ОИ – объект испытания; БИП – измерительный преобразователь индукционного типа; ДИК – дифференциальный измерительный кабель; ДИ - пассивный дифференциальный RC-интегратор; ЭО–электронный осциллограф
L1, L2 – катушки БИП; $H_к$ – измеряемое магнитное поле проводника с током;
$E_п$ – помехонесущее электрическое поле; $I_к$ – измеряемый ток;
$r_м$ – расстояние от центра проводника с током до точки измерения М

ИИТ-10 состоит из биполярного измерительного преобразователя индукционного типа (далее - БИП), подключаемого в разрыв тестируемой цепи объекта испытания (далее - ОИ), дифференциального измерительного кабеля, пассивного дифференциального RC-интегратора и осциллографа.

Измеренный сигнал с БИП по дифференциальному измерительному кабелю (далее – ДИК) подается на пассивный дифференциальный RC-интегратор (далее - ДИ), а потом на вход осциллографа.

Принцип действия ИИТ данной конструкции заключается в том, что в двух одинаково сфазированных катушках *L1* и *L2*, установленных в одной плоскости на одинаковом расстоянии $r_м$ по обе стороны от проводника с измеряемым током (ПИТ), вследствие кольцевого характера силовых линий магнитного поля, пронизывающих обе катушки с разных направлений, наводятся две равные по величине, но противоположные по фазе э.д.с. Суммарные сигналы U_1^* и U_2^* на выходе обоих каналов, соответственно, содержат одинаковые по амплитуде полезные сигналы U_1 и $U_2 = -U_1$ и различные сигналы помехи U_{1n} и U_{2n}, при этом:

$$U_1^* = U_1 + U_{1n}, \tag{4.17}$$

$$U_2^* = -U_1 + U_{2n}. \tag{4.18}$$

После подачи сигналов U_1^* и U_2^* на вход дифференциального усилителя осциллографа происходит их вычитание и суммарный сигнал U_o, являющийся мерой измеряемого тока, имеет амплитуду

$$U_o = U_1^* - U_2^* = 2U_1 + \Delta U_n, \tag{4.19}$$

где $\Delta U_n = U_{1n} - U_{2n}$ - разностный сигнал помехи.

При правильной компоновке элементов суммарный сигнал на выходе ИИТ практически свободен от помех, т.е. $\Delta U_n = 0$.

Работает ИИТ следующим образом: ПИТ БИП включают или в разрыв разрядной цепи, или вместо ПИТ может использоваться кабельный жгут с измеряемым током. Измеряемый ток $I_к$ пропускается по ПИТ. Магнитное поле H_x, вызванное измеряемым током, совпадает с ним по форме, а его амплитуда связана соотношением:

$$H_к = \frac{I_к}{2\pi\, r_м}, \qquad (4.20)$$

где $r_м$ - расстояние от центра ПИТ до точки измерения магнитного поля, м.

Указанное магнитное поле пронизывает обе измерительные катушки *L1* и *L2* ИИТ с разных сторон, наводя в них равные по амплитуде, но противоположные по фазе э.д.с. e_{n1} и e_{n2}. Значение каждой из этих э.д.с. определяется по формуле

$$e_{n1} = -\mu_o Sw \frac{dH_к}{dt} = -e_{n2}, \qquad (4.21)$$

где $\mu_o = 4\pi\ 10^{-7}$ Гн/м; S – площадь катушки, м^2; w- количество витков в катушке.

Так как обе э.д.с. пропорциональны производной магнитного поля, то сигналы с катушек необходимо проинтегрировать. В этом случае напряжение на выходе интегратора будет по форме совпадать с формой измеряемого тока и будет пропорциональным его амплитуде.

Коэффициент преобразования K_n измерителя определяется по формуле:

$$K_n = \frac{U_0}{I_k} = \frac{\mu_0 Sw}{\pi\, r_м T_u}, \qquad (4.22)$$

где T_u – постоянная интегрирования.

Для *RC*–интеграторов $T_u(c)$ определяется как $T_u^{RC} = R_u C_u$, где R_u в Омах, а C_u – в Фарадах.

Для *RL*–интеграторов $T_u(c)$ определяется как $T_u^{RL} = \frac{L_{1,2}}{R_u}$, где R_u в Омах, а $L_{1,2}$ – в Генри.

Описанный выше принцип был положен в НИПКИ «Молния для разработки и создания серии безконтактных измерителей импульсных токов типа ИИТ.

Конструкции ИИТ-1 и ИИТ-5А. Безконтактные преобразователи ИИТ-1 и ИИТ-5А предназначены для измерения микросекундных импульсов тока, в связи с чем оснащаются RC–интеграторами пассивного типа.

Внешний вид ИИТ с RC–интегратором различной модификации показан на рис. 4.12.

Рис. 4.12 – Общий вид различных модификаций измерителя импульсных токов безконтактного типа ИИТ-1 (ИИТ-10)

Блок измерительных преобразователей представляет собой медный экран диаметром 110 мм (рис. 4.13), внутри которого расположены измерительные катушки.

Металлический экран раскрывается на две половины, внутри одной из которых расположены два индукционных преобразователя прямоугольной формы, заключенные в свои медные экраны. Количество витков каждого ИП определяется из формулы (4.22), когда известны $T_и$ и $K_п$ для измерителя тока конкретной формы.

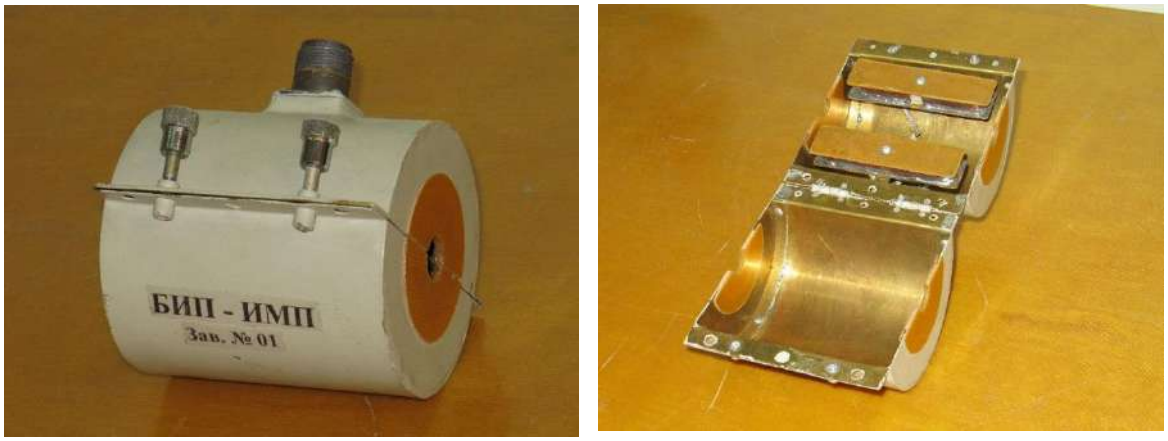
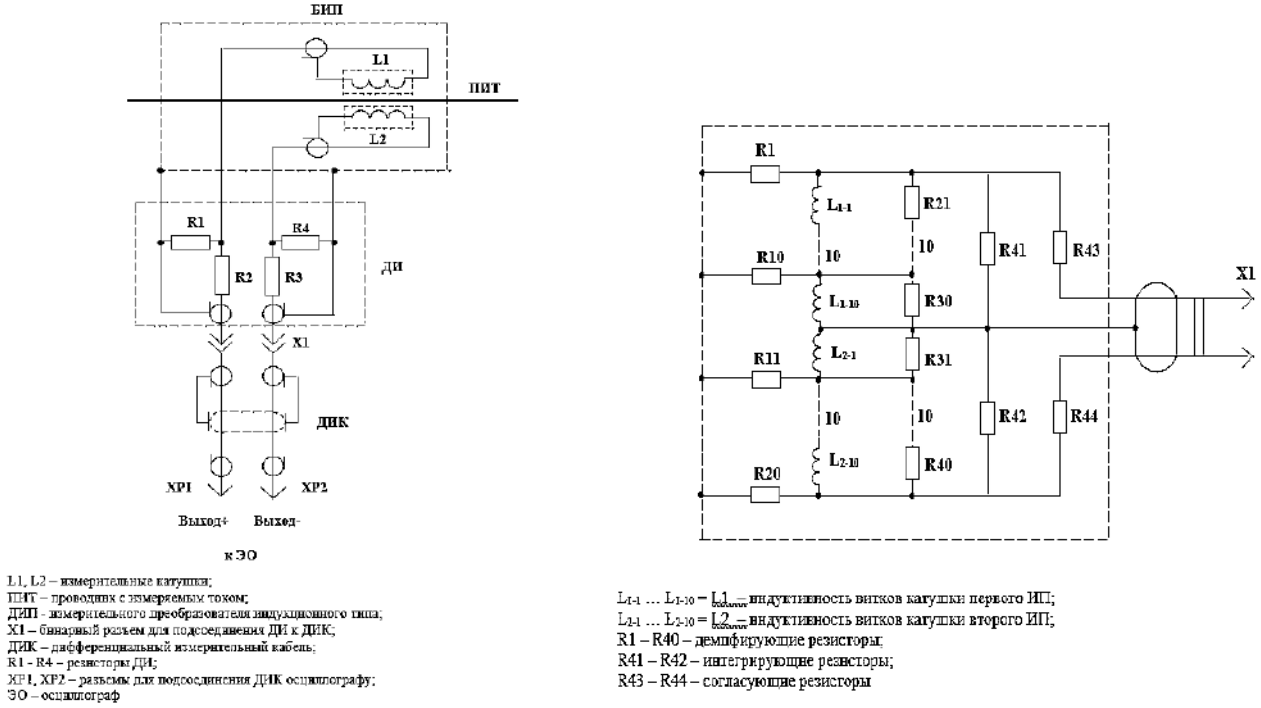


Рис. 4.13 – Внешний вид блока измерительных преобразователей БИП-1 (БИП-5А) в сборе и раскрытом виде

При этом, коэффициент преобразования должен быть не ниже, чем K_n^1 = 0,1 мВ/А для ИИТ-1 и K_n^{5A} = 0,2 мВ/А для ИИТ-5А.

Конструкции ИИТ-3(1 МГц) и ИИТ-6. Безконтактные преобразователи типа ИИТ-3(1 МГц) и ИИТ-6 предназначены для измерения импульсов тока с фронтами в наносекундном диапазоне и длительностью единицы микросекунд, и поэтому они имеют RL–интегратор (рис. 4.14).



а) б)

Рис. 4.14 – Схема электрическая принципиальная ИИТ-3 (1 МГц) (а) и ИИТ-3 (10 МГц) (б) с RL-интегратором.

Блок измерительных преобразователей содержит две измерительные катушки в своих электростатических экранах с радиальной прорезью и RL–интегратор в своем медном экране. По своей конструкции ИИТ-3 аналогичны конструкции, приведенной на рисунке 4.13.

Коэффициент преобразования должен быть не ниже, чем $K_n^{3(1МГц)}$ = 5 мВ/А для ИИТ-3(1 МГц) и K_n^6 = 1 мВ/А для ИИТ-3 (10 МГц).

Конструкция ИИТ-3 (10 МГц) предназначена для измерения наносекундных импульсов тока, и поэтому они имеют RL–интегратор, а ИП изготавливается в виде «длинной линии» (рис. 4.14б).

ИП представляет собой «длинную линию» состоящую из отдельных звеньев, в которые входят отдельные витки ИП L1 (L_{1-1} … L_{1-10}) и L2 (L_{2-1} … L_{2-10}), паразитные емкости этих витков на «землю» и демпфирующие резисторы R1 – R40. В этом случае длительность фронта измеряемого импульса не зависит от длины провода ИП.

Блок измерительных преобразователей содержит две измерительные катушки в своих электростатических экранах с радиальной прорезью и в котором размещены демпфирующие резисторы.

RL–интегратор (L1R41 – L2R42) и согласующие резисторы (R43 – R44) размещаются в отдельном медном экране. По своей конструкции БИП-3 (10 МГц) идентичен конструкции, приведенной на рис. 4.13.

Для измерения больших импульсных токов в НИПКИ «Молния» был разработан и создан бесконтактный измеритель тока типа ИИТ-200.

Метрологические характеристики ИИТ-200. Безконтактные измерители импульсных токов предназначены для измерения испытательных токов форм A. B. C и и должны использоваться для измерения отдельных компонент A, B, C (C*) и D.

Метрологические характеристики ИИТ для измерения токов компоненты А (ИИТ-А).

1. Форма измеряемых импульсов - компонента **A** по SAE ARP 5412 .

2. Диапазон максимальных амплитуд измеряемых импульсов, кА (40 – 200) (±10%).

3. Длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$, мкс ≤ 50.

4. Длительность импульса T_c, мкс ≤500.

5. Время нарастания ПХ, мкс ≤ 10.

6. Время спада ПХ, мс ≥ 5.

7. Погрешность измеряемых импульсов δ, % < 5.

Метрологические характеристики ИИТ для измерения токов компоненты В (ИИТ-В).

1. Форма измеряемых импульсов – компонента **B** по SAE ARP 5412.

2. Максимальная амплитуда измеряемых импульсов, кА 2 (±20 %).

3. Длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$, мкс не нормируется.

4. Длительность импульса T_c, мс 5 ± 10 %.

5. Время нарастания ПХ, мкс ≤ 10.

6. Время спада ПХ, мс ≥ 50.

7. Погрешность измеряемых импульсов δ, % < 5.

Метрологические характеристики ИИТ для измерения токов компоненты С (ИИТ-С).

1. Форма измеряемых импульсов - компонента **С** по SAE ARP 5412.

2. Диапазон амплитуд измеряемых импульсов, А (200 – 800).

3. Длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$, мкс не нормируется.

4. Длительность импульса T_c, с (0,25 – 1).

5. Время нарастания ПХ, мкс ≤ 10.

6. Время спада ПХ, с ≥ 5.

7. Погрешность измеряемых импульсов δ, % < 5.

Метрологические характеристики ИИТ для измерения токов компоненты С (ИИТ-С*).*

1. Форма измеряемых импульсов - компоненты С* по SAE ARP 5412.

2. Максимальная амплитуда измеряемых импульсов, А ≥ 400.

3. Длительность фронта измеряемых импульсов $T_ф$, мкс не нормируется.

4. Длительность импульса T_c, мс 45 ± 20 % .

5. Время нарастания ПХ, мкс ≤ 10.

6. Время спада ПХ, мс ≥ 2,5.

7. Погрешность измеряемых импульсов δ, % < 5.

Внешний вид измерителя импульсных токов ИИТ-200 и его принципиальная электрическая схема приведены на рис. 4.15 и рис. 4.16, соответственно.

Основные метрологические и технические характеристики измерителя импульсных токов ИИТ-200 приведены в табл. 4.4.

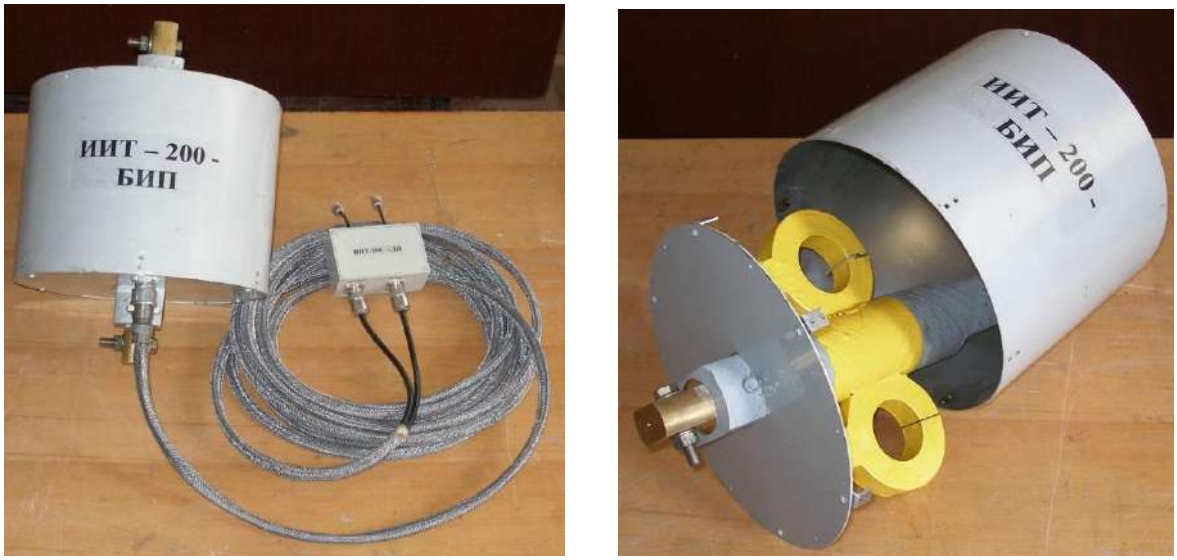


Рис. 4.15 – Общий вид измерителя импульсных токов ИИТ-200

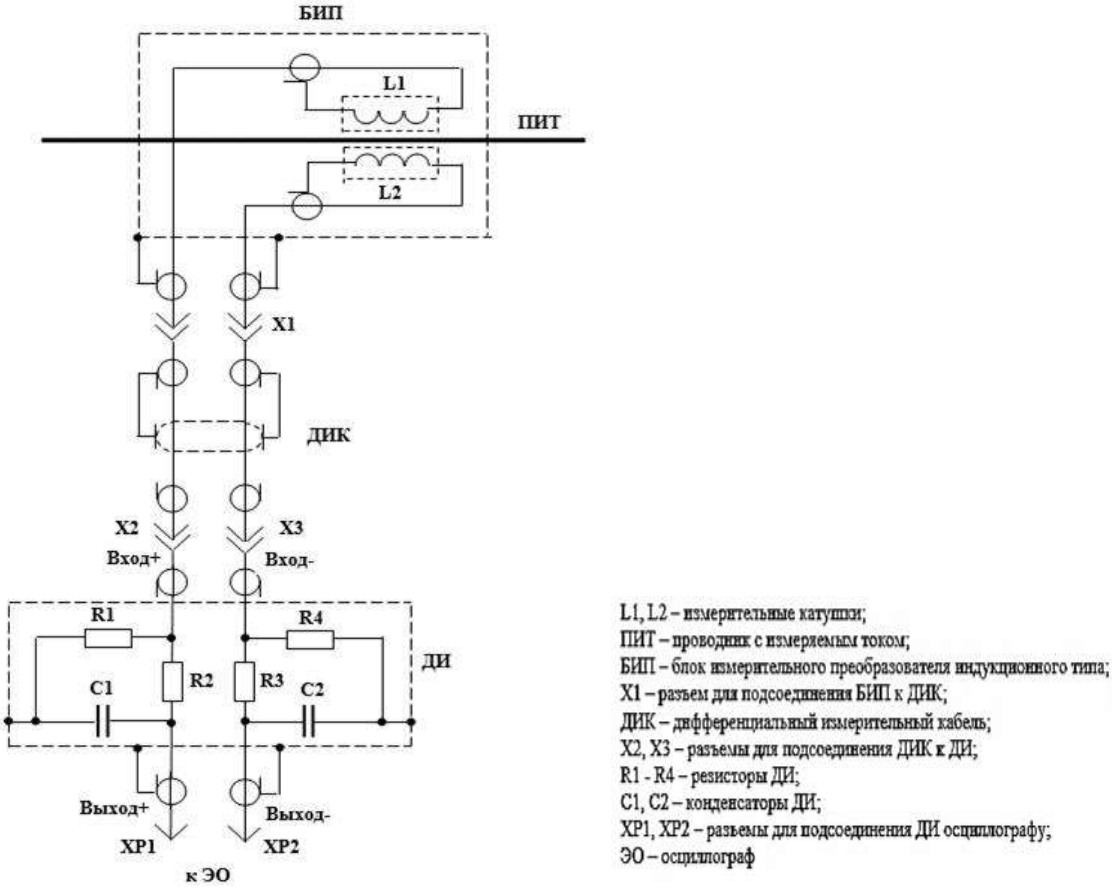


Рис. 4.16 – Общий вид и принципиальная электрическая схема измерителя импульсных токов ИИТ-200

Таблица 4.4 – Основные метрологические и технические характеристики ИИТ-200

Наименование параметра или характеристики	Размерность	Значение
Амплитуда импульсов измеряемого тока	кА	от 1 до 220
Коэффициент преобразования K_n	мВ/кА	22,8
Время нарастания переходной характеристики, $T_н^{ПХ}$	нс	224
Постоянная времени спада переходной характеристики, $T_c^{ПХ}$	мс	13,44
Погрешность измерения амплитуды импульсов измеряемых токов	%	3
Погрешность измерения временных параметров измеряемых токов	%	1

4.3.3 Методы измерения импульсных электрических и магнитных полей

По аналогии с требованиями стандарта [4.11] комплект средств измерительной техники, адаптированный к испытаниям ТС на устойчивость к воздействию полей, создаваемых молнией, должен включать следующие элементы:

– преобразователь Е напряженности (индукции) электрического поля;

– преобразователь Н напряженности (индукции) магнитного поля;

– цифровой запоминающий осциллограф.

Для обеспечения процедуры измерений с допустимым уровнем погрешности преобразователи должны иметь следующие характеристики:

– диапазон измерения напряженности Е-поля от 1 кВ/м до 200 кВ/м;

– время нарастания переходной характеристики не более 60 нс;

– постоянная интегрирования не менее 500 мкс.

– диапазон измерения напряженности Н- поля от 100 А/м до 10000 А/м;

– время нарастания переходной характеристики не более 1 мкс;

– постоянная интегрирования не менее 200 мкс.

Цифровой осциллограф должен иметь не менее 2-х входов с режимом входного сопротивления 1 МОм. Полоса пропускания не менее 100 МГц.

4.3.3.1 Измерение напряженности электрических полей.

Прямые измерения амплитудных параметров и временных характеристик импульсных электрических полей в настоящее время чаще всего производят с помощью различных преобразователей емкостного типа [4.3].

Измерители Е-полей на основе емкостного преобразователя содержат чувствительный элемент в виде электрической емкости, преобразующей импульс напряженности электрического поля в пропорциональный ему импульс напряжения.

Различают два типа емкостных преобразователей:

- конденсаторы того или иного вида (плоские, сферические и т.п.), представляющие собой конструкции с сосредоточенными параметрами, включающими в свой состав два или более металлических электродов с диэлектрическим заполнением между ними;

- антенны дипольного типа горизонтальные или вертикальные.

По принципу действия емкостные преобразователи, содержащие сосредоточенные емкости или антенны дипольного типа не отличаются друг от друга.

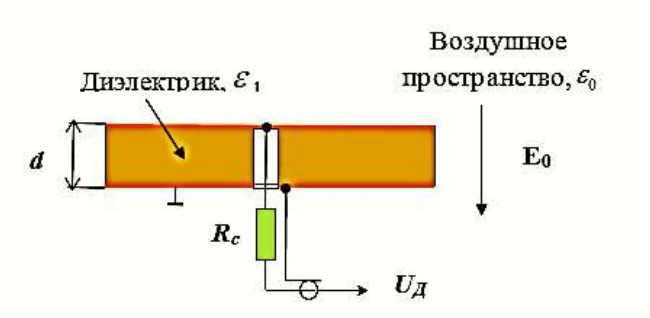


Рис. 4.15 – Емкостной преобразователь измерителя напряженности электрического поля.

На рис. 4.15 приведена структурная схема емкостного преобразователя измерителя напряженности электрического поля конденсаторного типа.

Принцип работы измерителя напряженности электрического поля заключается в том, что в электрическое поле с напряженностью E_0 помещается емкостной преобразователь, на

электродах которого возникает разность потенциалов, что и является мерой измеряемого поля.

Сигнал с емкостного преобразователя с помощью линии передачи информации (кабеля) передается на регистрирующее устройство. Как правило, это электронно-лучевой осциллограф.

Разность потенциалов, возникающая между электродами емкостного преобразователя, при внесении его в электрическое поле с напряженностью E_0, определяется следующим соотношением:

$$U_Д = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} E_0 d \,. \qquad (4.23)$$

В зависимости от соотношения собственных параметров емкостного преобразователя и нагрузки напряжение на выходе измерительной системы может быть пропорционально либо измеряемой напряженности электрического поля $E_0(t)$ либо ее производной по времени $E_0(t)/dt$.

Если нагрузочное сопротивление емкостного преобразователя R_c намного превышает его собственное емкостное сопротивление, то на выходе измерительной системы сигнал по форме будет повторять временное изменение напряженности измеряемого электрического поля. В этом случае будет справедлива схема замещения, приведенная на рис. 4.16 а. Измерительная система нагружается на высокоомное входное сопротивление осциллографа, который может работать в режиме открытого входа.

Условия $C_д >> C_к$ и $R_с << R_{вх}$ (где $C_к$ – емкость кабеля) практически всегда выполняются у измерителей емкостного типа. Для регистраторов нано- и микросекундных длительностей напряженности импульсных электрических полей, установлено, что время нарастания передаточной характеристики датчика определяется постоянной времени $R_с C_к$. Тогда условие неискаженной передачи фронта, измеряемых импульсов напряженности электрического поля, будет определяться неравенством: $\tau_ф >> R_c C_к$.

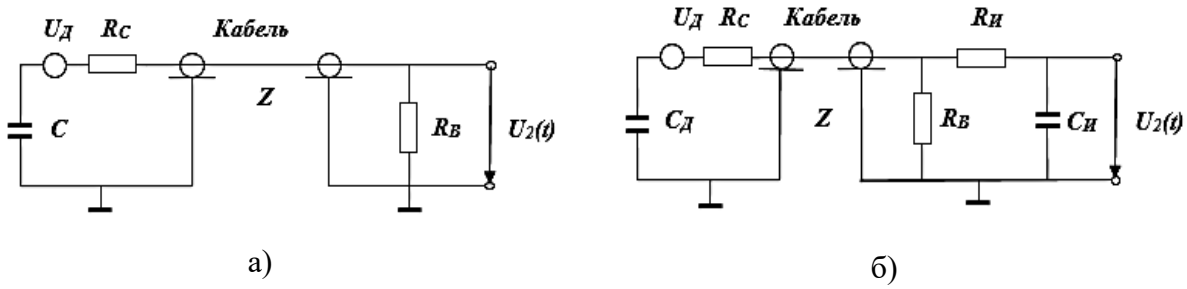


Рис. 4.16 – Схемы замещения емкостного преобразователя в режиме, не требующем интегрирования (а) и с интегрированием при помощи $R_и C_и$ – цепочки (б)
$R_{вх}$ – входное сопротивление осциллографа;
$C_д$ – емкость датчика;
$R_с$ – согласующее сопротивление ($R_с = Z$);
Z – волновое сопротивление кабеля.

Для случая, когда сопротивление нагрузки емкостного измерителя много меньше его емкостного сопротивления напряжение на выходе измерителя будет составлять:

$$u_2(t) = C_Д R_C \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} d \frac{dE_0}{dt} . \qquad (4.24)$$

Чтобы на выходе измерительной системы получить напряжение $u_2(t)$, пропорциональное напряженности измеряемого электрического поля, необходимо использовать интегрирующие устройства, в качестве которых обычно выступают RC – цепочки (рис. 4.16 б). Тогда при выполнении условий $1/\omega C_И >> R_И$ и $1/\omega C_Д >> Z$ получаем:

$$u_2(t) = \frac{C_Д R_C}{C_И R_И} \cdot \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_1} d \cdot E(t) . \qquad (4.23)$$

Для снижения (в пределах 5%) искажений формы измеряемых импульсов напряженности электрического поля необходимо выполнение следующего условия: $\tau_И \le 0{,}1 R_И C_И$.

Исходя их опыта эксплуатации, общие требования к метрологическим характеристикам измерителей напряженности электрических полей (ИНЭП), которые реализованы и используются при испытаниях в НИПКИ «Молния», приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5 – Требования к метрологическим характеристикам ИНЭП

Наименование характеристики	Буквенное обозначение	Единица измерения	Величина
Диапазон напряженности измеряемых электрических полей	$E_{min} - E_{max}$	кВ/м	от 1 до 500
Время нарастания переходной характеристики	$T_н^{ПХ}$	нс	< 30
Постоянная времени спада переходной характеристики	$T_c^{ПХ}$	мкс	>500
Погрешность измерения АВП электрического поля, не более	δ	%	5
Соотношение «сигнал-помеха», не менее	-	-	20

Климатические требования для измерителя должны соответствовать аналогичным требованиям для имитатора, для которого разрабатывается измеритель. В общем случае, с возможностью эксплуатации в зимний период:

- температура окружающего воздуха, ºС от минус 20 до плюс 40 ºС;

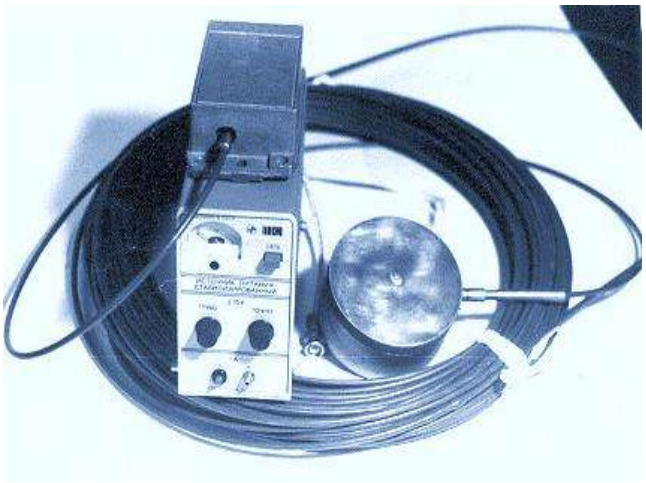
– относительная влажность воздуха при температуре + 20 ºС, % - не более 90;

– атмосферное давление, мм рт.ст. 730 –790.

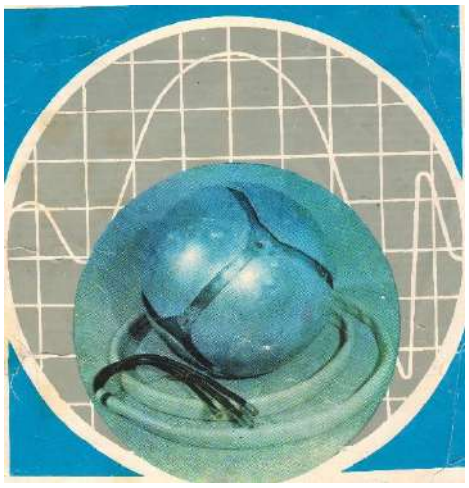
Прямые измерения параметров и структуры нестационарных электрических полей в настоящее время чаще всего осуществляются при помощи различных измерительных преобразователей емкостного типа.

Конструктивно емкостные преобразователи обычно представляют собой либо плоский конденсатор дискообразной формы, выполненный из двустороннего фольгированного стеклотекстолита ($\varepsilon_1 = 8$), с толщиной диэлектрика 2–3 мм

(рис. 4.17 а), либо сферический конденсатор - с воздушным диэлектриком ($\varepsilon_1 = 1$) (рис. 4.17 б).



а)



б)

Рис. 4.17 – Внешний вид емкостных измерителей напряженности электрического поля НИПКИ «Молния» (Украина)
а) – плоский конденсатор (однокоординатный датчик);
б) – сферический конденсатор (трехкоординатный датчик)

Плоский конденсатор предназначен для измерений, составляющих вектора напряженности электрического поля в одной плоскости. Емкостной преобразователь, выполненный в виде сферического конденсатора, позволяет проводить одновременно измерения напряженности электрического поля в трех взаимно перпендикулярных плоскостях. Конструктивно емкостной измеритель сферической формы объединяет три вида одноплоскостного измерителя.

В НИПКИ «Молния» (Украина) разработаны и изготовляются измерители напряженности импульсного электрического поля более 20 различных модификаций, которыми на сегодняшний день оснащено большинство испытательных центров Украины и стран СНГ.

В табл. 4.6 приведены основные технические характеристики двух модификаций емкостных измерителей напряженности импульсных электрических полей, изготовляемых НИПКИ «Молния» (Украина).

Таблица 4.6 – Основные технические характеристики измерителей емкостного типа поставляемые НИПКИ «Молния» (Украина)

Характеристики	Единица измерения	Величина	
		ИНЭП-В	ИНЭП-Э
Амплитуда	кВ/м	от 1 до 10^3	от 10^{-3} до 10^2
Длительность фронта измеряемых импульсов	с	от $5\cdot10^{-9}$ до 10^{-5}	от $5\cdot10^{-9}$ до 10^{-3}
Длительность спада измеряемых импульсов	с	от 10^{-7} до 10^{-2}	от 10^{-8} до 10^{-1}

4.3.3.2 Измерение напряженности магнитных полей.

Прямые измерения параметров и структуры нестационарных магнитных полей в настоящее время чаще всего осуществляются при помощи измерительных преобразователей индукционного типа.

Очевидно, что индукционные ИНМП – единственные из всех их видов , в наибольшей мере удовлетворяют всем предъявляемым для измерения импульсных магнитных полей требованиям и вследствие этого могут быть рекомендованы в качестве основного средства для измерения напряженности магнитного поля, сопровождающего молнию.

Индукционные преобразователи измерителей напряженности магнитного поля представляют собой одно- или многовитковую катушку (рис. 4.18), в которой под действием изменяющегося во времени внешнего магнитного поля $H_0(t)$, направленного перпендикулярно плоскости катушки, индуцируется ЭДС, пропорциональная производной во времени от напряженности этого поля:

$$e(t) = -\mu_0 \mu_1 S \varpi \frac{dH_0(t)}{dt}, \qquad (4.24)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}, Гн/м;$ μ_1 - относительная магнитная проницаемость среды внутри катушки; S – площадь катушки индукционного преобразователя; ϖ - число витков индукционного преобразователя.

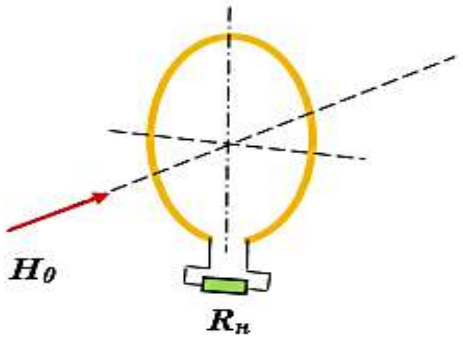


Рис. 4.18 – Индукционный преобразователь измерителя напряженности магнитного поля

В зависимости от соотношения собственных параметров индукционного преобразователя, его нагрузки и временных характеристик измеряемого поля возможны два режима работы измерителя, которым соответствуют схемы замещения, приведенные на рис. 4.19.

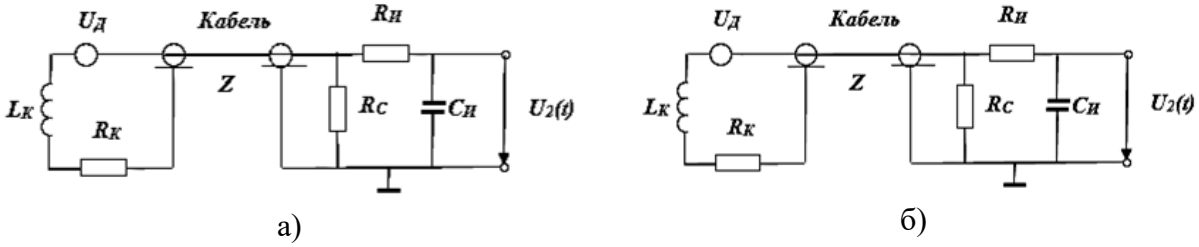


Рис. 4.19 - Схемы замещения индукционного преобразователя в режиме самоинтегрирования (а) и с интегрированием с помощью $R_и C_и$ – цепочки (б)

$R_к$ – активное сопротивление катушки преобразователя;

$L_К$ – индуктивность катушки преобразователя;

$R_с$ – согласующее сопротивление ($R_с = Z$);

Z – волновое сопротивление кабеля.

При выполнении условия $\omega L >> (R_И + R_К)$, где $R_К$ – активное сопротивление индукционного преобразователя, система работает в режиме самоинтегрирования (рис. 4.19 а). Напряжение на выходе этой системы будет пропорционально измеряемой напряженности магнитного поля:

$$u_2(t) = \frac{\mu_0 \mu_1 \varpi S R_И}{L_К} H_0(t). \qquad (4.25)$$

Для снижения погрешности измерения импульсных магнитных полей (длительностью $\tau_И$ не более 5%) необходимо выполнение условия $L_К \geq 10\tau_И (R_К + R_И)$. Самоинтегрирующие системы в

основном применяются для измерений импульсных полей наносекундного временного диапазона.

В том случае, когда необходимо измерять импульсные магнитные поля микро- и миллисекундного диапазона, применяют интегрирование с помощью *RC*- цепочек (рис. 4.19 б). Тогда напряжение на выходе измерительной системе будет:

$$u_2(t) = \frac{\mu_0 \mu_1 \varpi S}{R_И C_И} H_0(t). \qquad (4.26)$$

Для достижения погрешности измерения импульсных магнитных полей в пределах 5% по длительности фронта и всего импульса, должны выполняться условия: $\tau_ф \geq 10 L_К / R_И$ и $\tau_И \leq 0{,}1 R_И C_И$.

Причем, для уменьшения влияния паразитных емкостных связей между катушкой индукционного преобразователя и близко расположенными заземленными объектами, а также исключения влияния помеховых электрических полей на процесс измерений, катушку индукционного преобразователя помещают в электромагнитный экран, который заземляется. В результате получают сбалансированный индукционный преобразователь, который представляет собой круглую катушку, помещенную в электромагнитный экран с прорезью (рис. 4.20).

При необходимости в корпус-экран индукционного преобразователя также помещают интегрирующий и согласующий резисторы.

Исходя их опыта эксплуатации, общие требования к метрологическим характеристикам измерителей напряженности магнитного поля (ИНМП), которые реализованы и используются при испытаниях в НИПКИ «Молния», приведены в табл. 4.7.

Таблица 4.7 – Требования к метрологическим характеристикам измерителей ИНМП

Наименование характеристики	Буквенное обозначение	Един. измерения	Величина
Диапазон напряженности измеряемых магнитных полей	$H_{min} - H_{max}$	А/м	от 1 до 10000
Время нарастания переходной характеристики	$T_н^{ПХ}$	нс	500
Постоянная времени спада переходной характеристики	$T_c^{ПХ}$	мкс	100
Погрешность измерения АВП электрического поля, не более	δ	%	5
Соотношение «сигнал-помеха», не менее	-	-	20

В НИПКИ «Молния» (Украина) разработаны и изготовляются измерители напряженности импульсного магнитного поля более 50 различных модификаций, которыми на сегодняшний день оснащены большинство испытательных центров Украины и стран СНГ.

В табл. 4.8 приведены основные технические характеристики двух модификаций измерителей напряженности импульсных магнитных полей, изготовляемых НИПКИ «Молния» (Украина).

Таблица 4.8 – Основные технические характеристики измерителей индукционного типа, поставляемые НИПКИ «Молния» (Украина)

Характеристики	Единица измерения	Величина	
		ИНМП-В	ИНМП-Э
Амплитуда	А/м	от 50 до 10000	от 0,1 до 300
Длительность фронта измеряемых импульсов	с	от $5 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-6}	от $5 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-3}
Длительность спада измеряемых импульсов	с	от 10^{-7} до 10^{-2}	от 10^{-8} до 10^{-1}

На рис. 4.20 приведен внешний вид модернизированного измерителя ИНМП-2С разработки НИПКИ «Молния» (Украина).

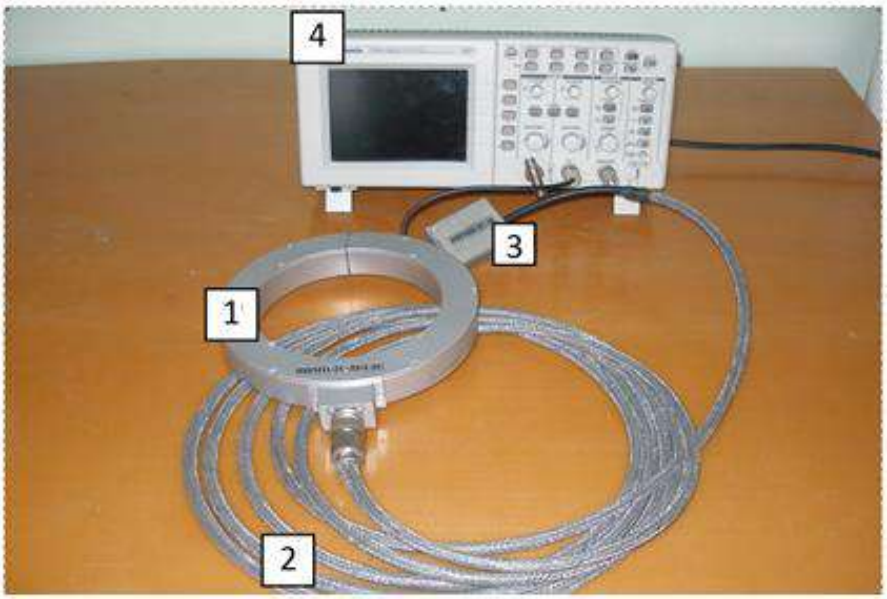


Рис. 4. 20 – Внешний вид ИНМП-2С с кабельной линией передачи информации

1 - индукционный измерительный преобразователь;
2 - измерительный кабель;
3 - RC –интегратор;
4 - осциллограф

Таблица 4.9 – Основные метрологические и технические характеристики измерителя ИНМП-2С

Наименование характеристики	Един.измерения	Численные значения
Амплитудный диапазон	А/м	10-10000
Коэффициент преобразования	В/(А/м)	0.35×10^{-3}
Активное сопротивление	Ом	-
Время нарастания переходной характеристики	нс	500
Постоянная времени спада переходной характеристики	мс	100
Амплитудная погрешность	%	5
Габариты измерительного преобразователя (диаметр х высота)	мм	200 х 20
Вес измерительного преобразователя	кг	0.2

4.3.4. Особенности измерения электрических и магнитных полей в корпусах-экранах ТС

Измерение напряженностей электрических и магнитных полей в реальных корпусах-экранах (фюзеляжах) ЛА сопряжены с определенными трудностями. Прежде всего, это относится к измерениям напряженности электрических полей.

Это связано с тем, что проникновение электрических и магнитных полей в сплошные (электрически однородные) корпуса-экраны различно. Электрические поля практически полностью затухают в стенке экрана, и их проникновение возможно только через электрические неоднородности.

Таким образом, электрическое поле в экранируемом объеме будет неоднородно и зависит только от количества неоднородностей, их вида и линейных размеров. Поэтому для измерений напряженности электрических полей в корпусах-экранах объектов применяются преобразователи конденсаторного типа, описанные в подразделе 4.3.3.1.

Взаимодействие магнитного поля с корпусами-экранами характеризуется тем, что его значение в экранируемом объеме будет определяться суперпозицией полей, диффундируемого через стенку экрана и проникающего через неоднородности. При этом временные характеристики этих поле будут существенно отличаться друг от друга. Напряженность магнитного поля, проникающего через электрические неоднородности, будет иметь временные характеристики, соответствующие воздействующему полю ЭМИ. Напряженность же импульсного магнитного поля, проникающего через стенки корпуса-экрана, будет существенно ослаблена по амплитуде, а его временные параметры будут увеличены. Таким образом, для измерений магнитных полей в корпусах-экранах необходимо регистрировать временные параметры полей в очень широком временном диапазоне от единиц наносекунд до десятков и сотен миллисекунд.

В НИПКИ «Молния» разработаны и внедрены измерители напряженности импульсных магнитных полей в корпусах-экранах, позволяющие регистрировать магнитные поля в широком амплитудно-временном диапазоне. Принципиальная схема такого измерителя приведена на рис. 4.21.

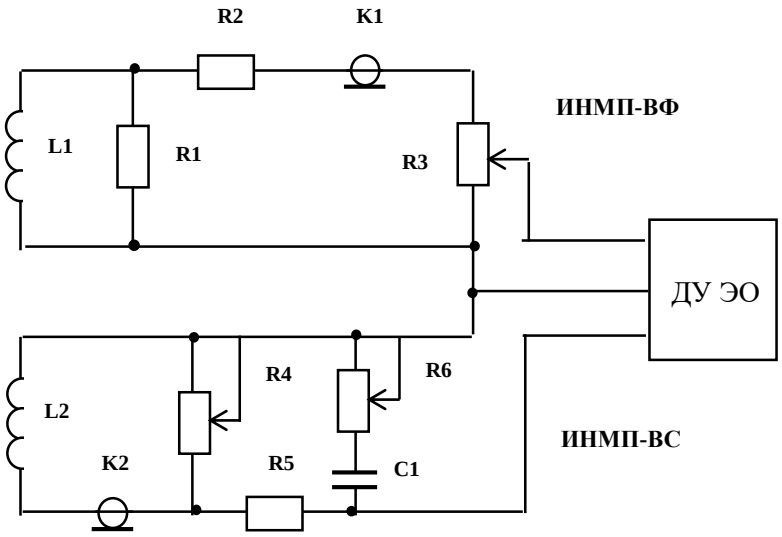


Рис. 4.21 – Принципиальная схема измерителя напряженности магнитного поля в корпусах-экранах

Измеритель содержит два независимых канала. Канал измерения фронта импульса - ИНМП-ВФ и канал измерения длительности импульса – ИНМП-ВС. Канал ИНМП-ВФ достоверно измеряет форму импульса в диапазоне времен от нескольких десятков наносекунд до 10 мкс, а канал ИНМП-ВС – в диапазоне времен от 10 мкс до нескольких десятков миллисекунд. Канал ИНМП-ВФ построен по схеме измерителя магнитного поля индукционного типа с RL-интегратором (элементы R1, L1), а канал ИНМП-ВС – по аналогичной схеме с RC-интегратором (элементы L2, C1, R5).

При реализации данной схемы измерения необходимо выполнение условия совпадения амплитуды сигналов с выходов обоих каналов, а также формы сигналов на спаде импульса канала ИНМП-ВФ и фронта импульса канала ИРМП-ВС. Реализация этих условий достигается путем плавного изменения измеряемых величин с помощью переменных резисторов R4 и R3. В частности уменьшение величины сопротивления резистора R4 приводит к «завалу» переходной характеристики ИНМП-ВС. Сложение сигналов двух измеряемых величин производится в дифференциальном усилителе осциллографа (ДУ ЭО). Общий вид измерителя напряженности магнитного поля данного вида приведен на рис. 4.22.

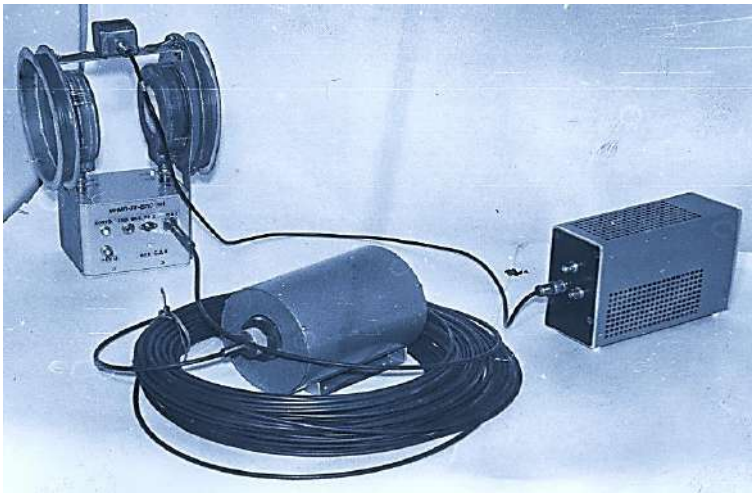


Рис. 4.22 – Общий вид измерителя напряженности магнитного поля в корпусах-экранах объектов

4.3.5. Методы измерения токов и напряжений, возникающих в опасных трактах ТС ЛА при косвенном ударе молнии

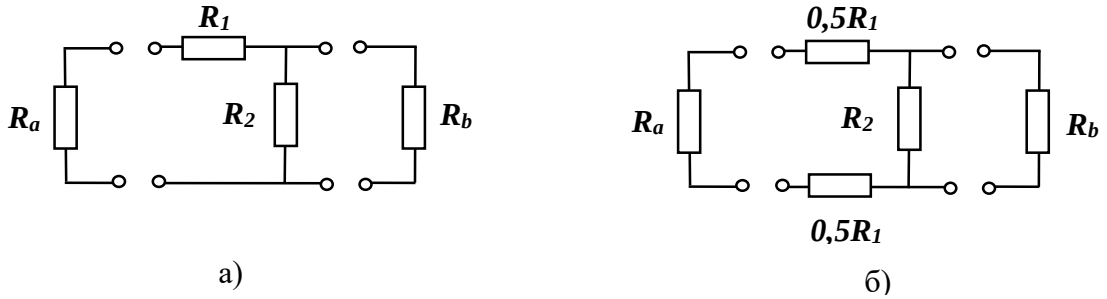
При определении реакции систем, блоков и узлов ТС ЛА, подверженных поражающим воздействиям и дестабилизирующим влияниям грозовых электромагнитных факторов возникает необходимость измерения токов и напряжений, возникающих во внешних и внутренних цепях этих средств. При этом, основным требованием, предъявляемым к измерительным средствам, является их минимальное влияние на цепи, в которых производятся измерения.

Для измерений *токов* в цепях хорошо зарекомендовал себя воздушный трансформатор тока (пояс Роговского). Измерение наведенных в цепях *напряжений* осуществляется, как правило, на их нагрузочных сопротивлениях в начале и/или в конце линий связи [4.1, 4.2].

Основным требованием, при проведении таких измерений, является обеспечение минимальных влияний измерительных цепей на режим работы тестируемой системы. Выполнение данного требования достигается правильным согласованием нагрузки тестируемой системы с входным сопротивлением регистрирующего прибора, в качестве которого довольно часто выступает электронно-

лучевой осциллограф. При этом обязательно необходимо учитывать волновое сопротивление кабеля, посредствам которого происходит подключение измерительного прибора к нагрузке тестируемой системы.

Для практической реализации такого согласования используют цепи, приведенные на рис. 4.23.



а) б)

Рис. 4.23 – Варианты схем согласования нагрузок тестируемых систем и измерительных приборов [4.2].

Если волновое сопротивление подключаемого к нагрузке тестируемой системы измерительного кабеля Z обозначить через R_a, а входное сопротивление измерительного прибора через R_b, то неискажающее согласование будет иметь место при выполнении следующих условий:

$$R_1 = R_a\sqrt{1-(R_a/R_b)}\ ;\ \ R_2 = R_b/\sqrt{1-(R_a/R_b)}\ . \qquad (4.27)$$

Затухание, вносимое такими согласующими цепочками, определяется следующим соотношением:

$$\beta_{[ДБ]} = 20\lg\left[\sqrt{R_a/R_b}+\sqrt{(R_a/R_b)-1}\right]. \qquad (4.28)$$

В том случае, когда амплитуда измеряемого напряжения в нагрузке линии связи превышают требуемый по условиям эксплуатации электронно-лучевого осциллографа уровни, в схему измерения, на ее входе, вводят делители напряжения (табл. 4.1).

4.3.5.1.Средства измерения наведенных импульсов напряжения.

Требованиям измерений полностью удовлетворяет емкостно-омический делитель напряжения фирмы Tektronix (пробник P6015A) (рис. 4.24).

Рис. 4.24 – Общий вид пробника Tektronix P6015A

Метрологические характеристики данного пробника пробника *Tektronix P6015A:*

1. Диапазон амплитуд измеряемых импульсов $A_{min} - A_{max}$, кВ до 40.
2. Коэффициент деления K_n - 1000.
3. Полоса пропускания, МГц (время нарастания ПХ, нс) 75 (< 5).
4. Время спада ПХ, мкс - ∞.
5. Входное сопротивление, МОм - 100.
6. Погрешность измерения вместе с осциллографом < 3.

4.3.5.2 Средства измерения наведенных импульсов тока

Измерения импульсных токов в элементах испытательных схем проводятся или с помощью бесконтактных измерителей тока ИИТ, или токоизмерительных резисторов ТИР (см. раздел 4.3.2).

В технике измерения импульсов тока применяются ТИР коаксиального типа, что позволяет проводить измерения для всех

видов испытательных токов как по амплитудам, так и по временным параметрам. Геометрические размеры ТИР определяются необходимым для вышеприведенных испытаний сопротивлением, т.е. размерами внутренней трубы. С учетом чувствительности применяемых осциллографов, для измерения минимальных токов сопротивление ТИР должно быть не менее 4 мОм.

Конструкция ИИТ для бесконтактного измерения импульсных токов, разработанные в НИПКИ «Молния» с RL-интеграторами применяются для измерения импульсов тока в диапазоне времен от единиц наносекунд до нескольких микросекунд, а ИИТ с RC-интеграторами применяются для измерения импульсов тока в диапазоне времен от единиц микросекунд до десятков миллисекунд.

4.3.6. Обеспечение помехозащищенности измерительных трактов при испытаниях на молниестойкость

Для обеспечения помехозащищенности измерительных трактов хорошо себя зарекомендовали волоконно-оптические линии передачи информации.

Это объясняется следующими факторами:

- использование в цепях передачи информации элементов оптоэлектроники уменьшает количество замкнутых для воздействующего помехового электромагнитного поля контуров;
- оптоэлектронные элементы пропускают информацию только в одном направлении, вследствие чего ослабляется влияние помех, действующих на выходные цепи схем ТС.

В качестве практического примера системы с использованием волоконно-оптические линии передачи информации на рис. 4.25 приведена структурная схема такого комплекса разработки НИПКИ «Молния» (Украина) [4.3].

Система состоит из двух блоков БПС и БП информационно связанных между собой посредствам двух волоконно-оптических линий. Одна из линий СВ-1 предназначена для передачи информации об измеряемом параметре, другую линию СВ-2 используют для управления процессом измерения. Применение двух волоконно-оптических линий позволяет существенно увеличить уровень помехозащищенности системы в целом.

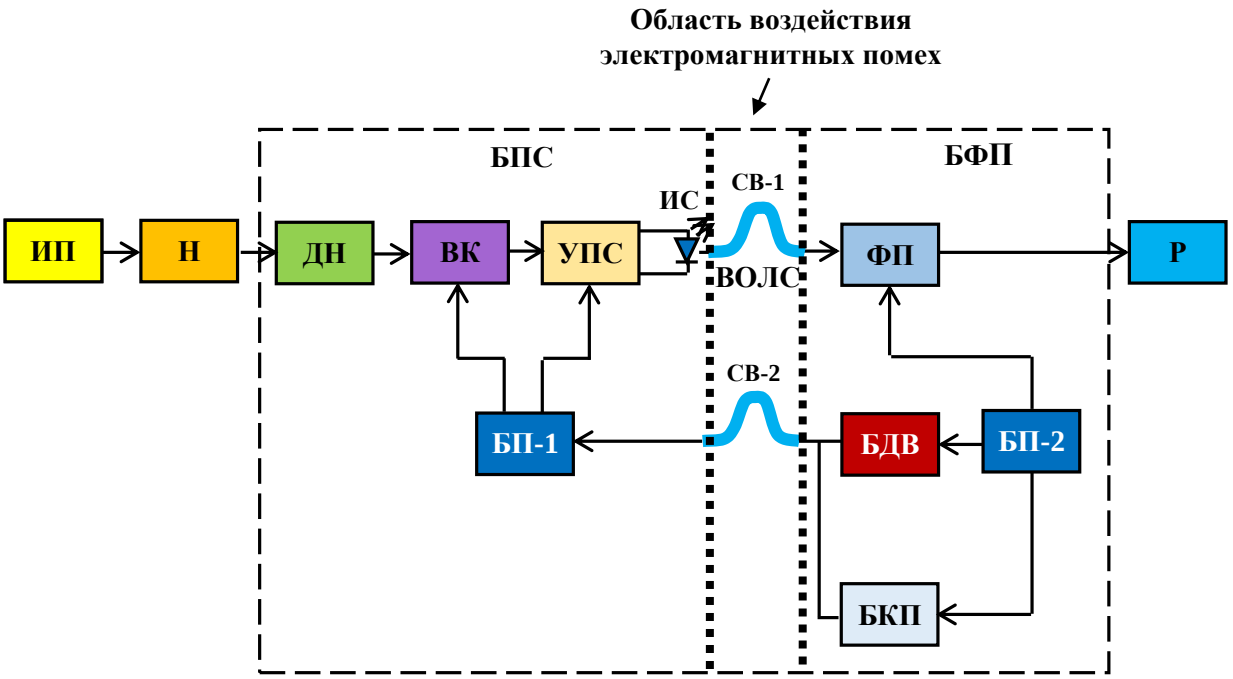


Рис. 4.25 – Структурная схема измерительного комплекса с использованием волоконно-оптической линии передачи информации

ИП – измерительный преобразователь; Н – нагрузка;
ДН – делитель напряжения; ВК – входной каскад;
УПС – усилитель-преобразователь электрического сигнала в световой;
ИС – импульсный источник света;
БП-1, БП-2 – блок питания; ФП – фотоприемник;
БДВ – блок дистанционного включения БП-1;
БКП – блок контроля параметров БПС; Р – регистратор;
БПС – блок преобразования электрического сигнала в световой;
БФП – блок преобразования светового сигнала в электрический;
СВ-1, СВ-2 – гибкий волоконный световод;
ВОЛС – волоконно-оптическая линия связи

Принцип работы измерительного комплекса состоит в следующем. В зону действия измеряемого параметра (*E, H, U, I*) помещается соответствующий измерительный преобразователь (ИП), на нагрузке (Н) которого выделяется импульс напряжения, пропорциональный измеряемому параметру.

Далее этот импульс поступает на вход блока преобразования электрического сигнала (БПС) в пропорциональный ему световой сигнал. БПС состоит из следующих узлов:

– широкополосного делителя напряжения (ДН), предназначенного для ослабления входного импульса напряжения до величины, необходимой для неискаженной работы последующих элементов БПС;

– широкополосного высокоомного входного каскада (ВК), предназначенного для согласования высокого выходного сопротивления ДН с низким входным сопротивлением усилителя-преобразователя (УПС);

– усилителя мощности УПС, предназначенного для усиления мощности сигнала с выхода ИП;

– ИС предназначен для преобразования импульса напряжения в пропорциональный ему импульс света, к выходному окну которого подстыковывается световод СВ-1;

– СВ-1 – гибкий волоконный моносветовод длиной до 200 м, размещенный в светонепроницаемой диэлектрической оболочке.

Импульс света с выхода СВ-1 поступает через входное окно на фотоприемник (ФП). Он представляет собой скоростной импульсный фотодиод, в котором происходит обратное преобразование светового импульса в пропорциональный ему электрический импульс. Этот импульс с выхода фотоприемника поступает на регистратор Р, напряжение на входе которого пропорционально измеряемому параметру. Соотношение между ними составляет коэффициент преобразования измерителя.

Для питания электронных узлов БПС и ФП применяются источники питания БП-1 и БП-2. БП-1 – автономный источник питания на базе аккумуляторной батареи, а БП-2 – сетевой источник питания.

Для улучшения условий эксплуатации измерителя в него введены сервисные блоки БДВ и БКП. Блок дистанционного включения (БДВ) предназначен для дистанционного включения по световоду СВ-2 блока питания БП-1.

Блок контроля параметров (БКП) выполняет функции текущего контроля параметров всех узлов измерителя.

Конструктивно ФП, БДВ, БКП и БП-2 объединены в единый блок БФП – блок фотоприемника.

Разработанная система может иметь до 200 каналов передачи информации с надежной защитой от воздействий мощных электромагнитных помех в широком частотном диапазоне до сотен ГГц.

4.3.6.1 Рекомендуемая схема заземления элементов измерительного комплекса

Опыт эксплуатации имитаторов мощных электромагнитных полей свидетельствует о необходимости оптимизации схемы заземления элементов измерительного комплекса. Особенно, это важно при использовании кабельных линий передачи информации (КЛПИ). Часть КЛПИ находится непосредственно в испытательном объеме имитатора, поэтому, на них наводятся высокие потенциалы, достаточные для пробоя изоляционных промежутков. Основные рекомендации, касающиеся КЛПИ, приведенные далее в этом подразделе, взяты из [4.2, 4.12].

Наиболее распространенными рецепторами привнесенных помех являются внешние кабели. Из-за своей длины они более эффективно взаимодействуют с внешней электромагнитной обстановкой, чем корпус аппаратуры, печатная плата или другие элементы конструкции. Кабели и соединители, которыми они подключаются к аппаратуре, должны проектироваться особенно тщательно. При этом основной целью должно являться предотвращение излучения дифференциальных компонент тока, с одной стороны, а с другой стороны, чтобы синфазные компоненты токов, наведенные от внешних полей, не были связаны с сигнальной цепью и не воздействовали на эту цепь.

Во многих случаях необходимо использовать экранированные кабели. Обычно исключением являются силовые кабели (подводящие питание к фильтру источника питания) и низкочастотные кабели интерфейса, которые могут за счет собственных параметров обеспечить помехоустойчивость к переходным процессам и радиочастотам. Интерфейс без фильтров и без экранов создает путь для внешней помехоэмиссии и для нежелательной связи. Отметим, что разделка кабеля в соединителе является критической операцией, определяющей свойство экрана кабеля.

Для того чтобы минимизировать перекрестные помехи внутри кабеля, сигналы, которые передаются по нему, должны быть приблизительно равны (разница между ними, например, 10 дБ), как по току, так и по напряжению. Кабели, несущие высокочастотные токи помех, должны быть удалены от других кабелей, даже внутри

экранированных корпусов, поскольку возмущения могут быть причиной возникновения помехоэмиссии по синфазной компоненте. Значение частоты, при котором «низкая частота» становится «высокой частотой», определяется длиной кабеля, значением его емкости и волнового импеданса передающей линии.

В [4.12] для монтажа кабелей и заземления в зданиях рекомендуется, чтобы кабели, по которым распространяются сигналы различных типов, были пространственно разделены. Кабель должен быть расположен на расстоянии 0,15 м от другого, если он содержит металлический проводник, который используется как параллельный проводник заземления.

Опираясь на рекомендуемые требования по расположению различных классов кабелей, можно надеяться на то, что хорошие результаты будут достигнуты без изменения маршрутов укладки кабелей и их комбинации, т.е. главные требования ЭМС будут учтены. Существует достаточно много ситуаций, когда инсталляция оборудования выполняется не квалифицированным и необученным техническим персоналом, который игнорирует важные требования спецификаций.

Все возвратные токи должны быть непосредственно связаны со своими сигнальными линиями или шинами питания, желательно применением двухпроводных линий (витых пар), что позволяет снизить связь между цепями за счет магнитного поля. Возвратные токи не должны быть общими для цепей питания и сигнальных линий, и по возможности их не должно быть между отдельными сигнальными линиями, поскольку это приводит к появлению связи через общее сопротивление.

Не очевидно, что возвратный ток будет протекать в проводнике, который расположен рядом с сигнальным проводом, когда существует некоторый альтернативный путь для возвратного тока, который может быть принят во внимание. Для постоянного тока, путь возвратного тока действительно определяется только значением сопротивления проводника. Но при увеличении частоты взаимная индуктивность связанной пары (витой пары, коаксиальной линии или подобной конструкции) становится меньше, чем индуктивность каждого из элементов проводной линии по отношению к заземляющей поверхности. Площадь замкнутого контура, образованного двумя проводниками, существенно меньше, чем площадь контура ограниченного соединительной линией и

заземляющей поверхностью. Поэтому протекание возвратного тока по локальному пути становится предпочтительным по сравнению с путями, проходящими по земле. Это является основной причиной, по которой для передачи данных используется кабель в виде витой пары или коаксиальной линии.

Синфазные компоненты токов в экране кабеля являются результатом значительных внешних эмиссий. Распространенная техника снижения этих токов заключается в применении ферритовых дросселей, которые установлены в месте выхода кабеля из экранированного корпуса, подавляющих синфазные токи. Такой дроссель значительно увеличивает полное сопротивление кабеля по отношению к высокочастотным синфазным токам без воздействия на дифференциальные компоненты тока.

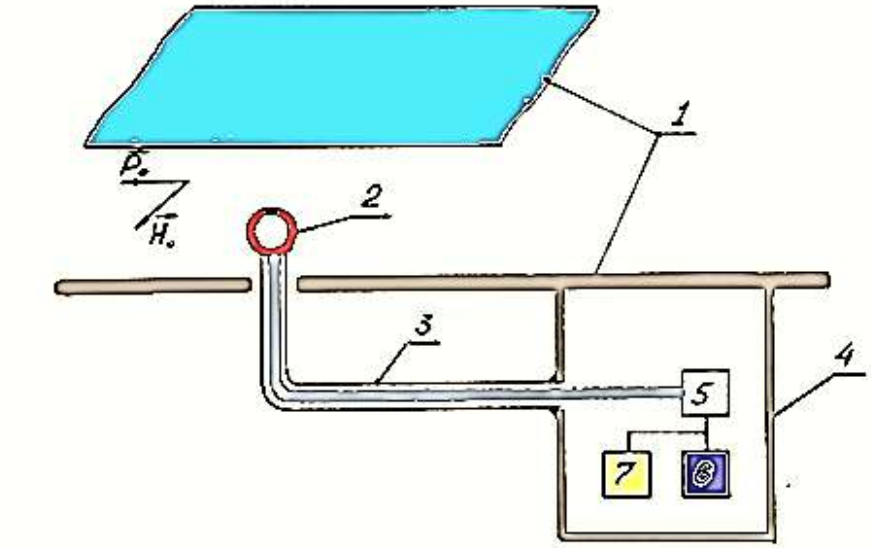
Альтернативой дискретному дросселю является покрытие кабеля на некотором отрезке гибким ферритовым материалом. Преимущество подобного решения заключается в снижении до минимума внешних компонентов и уменьшении амплитуды стоячих волн на высоких частотах, поскольку за счет введения ферритов происходит поглощение энергии при распространении отраженных токовых волн от источника и от нагрузки. Это особенно важно для минимизации антенного эффекта кабеля, создающего поле излучения. Применение ферритов для неэкранированных кабелей, таких как кабели питания также целесообразно. Такие кабели с ферритовыми элементами, к сожалению, дороги, недоступны широкому кругу производителей и, подобно другим вариантам применения ферритов, эффективно работают только на очень высоких частотах. Это требует специальных применений в тех случаях, когда прогнозируется соответствующее воздействие. Так, например, это решение может применяться, когда переходные процессы или электростатический разряд распространяются вдоль кабеля и могут привести к нарушению работоспособности.

4.3.6.2 Рекомендации по защите измерительного оборудования от влияния мощного электромагнитного излучения грозовых разрядов

Источниками помех в имитаторах полей молнии являются искровые промежутки ГИН и ГИТ, импульсная корона на проводниках, находящихся под высоким напряжением, искрения в местах соединения отдельных элементов, и в первую очередь сами испытательные поля. Вследствие этого, временные параметры помехонесущих полей лежат в диапазоне от сотен наносекунд до десятков миллисекунд, а их амплитудные значения могут достигать сотен киловольт на метр и тысяч ампер на метр. Это обстоятельство приводит к тому, что помехонесущие поля таких установок распространяются на значительные расстояния и воздействуют практически на все элементы измерителей. Поэтому, рекомендации по повышению помехозащищенности, которые приведены ниже, могут быть распространены не только на измерительные устройства, но и на различного рода вспомогательные элементы испытательных и испытываемых устройств (линии связи, источники и линии питания и т.д.).

Конструктивно устройства для измерения полей ЭМИ в своем большинстве содержат: измерительные преобразователи того или иного типа (ИП), линии передачи информации (ЛПИ), выходные и согласующие устройства и регистрирующую аппаратуру. Вследствие различий в конструкции и условиях эксплуатации этих элементов СИТ, пути проникновения помехи в них различны, что приводит к различным амплитудно-временные характеристикам отклика СИТ на одно и то же ЭМ воздействие. Поэтому, мероприятия, принимаемые для защиты элементов измерителей от помех, чаще всего носят индивидуальный характер, за исключением некоторых, являющихся общими для всех элементов.

Эффективная защита от помех регистрирующих устройств достигается размещением их в экранированной измерительной кабине и обеспечением автономным источником электропитания (рис. 4.26). Наилучшие результаты получаются в том случае, если измерительная кабина состоит из двух или более экранирующих слоев, изолированных друг от друга и от токоведущих частей имитатора.



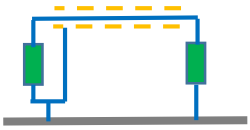
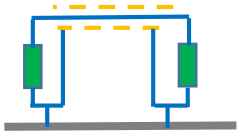
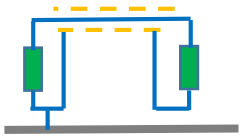
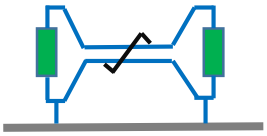
1 – электроды ПЛ имитатора электрического поля молнии;
2 – измерительный преобразователь ИНМП;
3 – кабельная ЛПИ;
4 – экранированная измерительная кабина;
5 – регистратор;
6 – автономная система электропитания;
7 – автономная система синхронизации

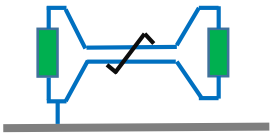
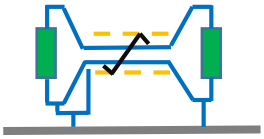
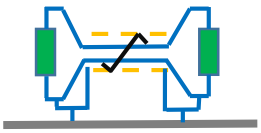
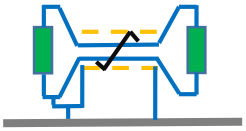
Рис. 4.26 – Пример компоновки ИНМП в электромагнитном поле имитатора

К общим мероприятиям необходимо также отнести и заземление всего измерительного устройства в одной точке. Это мероприятие совместно с экранированием элементов исключает образование замкнутых контуров.

Особое значение при этом принимают рациональное заземление защитных оболочек-экранов измерительных кабелей. Главным критерием рационального заземления кабельных линий является исключение образования замкнутых контуров заземления чувствительных к воздействиям помеховых магнитных полей и разрыв путей протекания по их элементам уравнительных токов. В табл. 4.10 приведены различные способы заземления кабельных линий передачи информации и их сравнительные характеристики защищенности от влияния внешних ГЭМИ.

Таблица 4.10 - Сравнительные характеристики защищенности кабельных линий связи от влияния ГЭМИ при различных вариантах их заземления [4.2]

№ п/п	Вариант заземления	Краткая характеристика
1	2	3
1		Цепь практически не защищена от влияния как электрических, так и магнитных полей помех
2		Заземление на одном из концов оболочки коаксиального кабеля не сказывается на ослаблении магнитного поля помехи, так как цепь имеет большую по площади петлю, образованную центральной жилой и землей. По отношению к влиянию электрического поля помехи цепь более защищена чем в варианте 1.
3		Заземление обоих концов оболочки коаксиального кабеля обеспечивает некоторую защиту цепи от влияния магнитного поля помехи. Эта защита была бы еще лучше, если бы не замкнутый контур заземления. Цепь хорошо защищена от влияния электрического поля помех.
4		Цепь имеет самую высокую защищенность по магнитному полю из всех ранее приведенных вариантов ввиду существенного уменьшения площади петли «жила-земля» и разрыва контура заземления. По степени защищенности от влияния электрического поля помех цепь близка к варианту 2.
5		Наличие замкнутого контура, образованного при заземлении обоих концов кабельной линии, снижает степень защищенности от магнитного поля помех, достигаемую за счет применения витой пары. Защищенность по электрическому полю высокая.

6		Разрыв замкнутого контура заземления приводит к существенному увеличению по сравнению с вариантом 5 защищенности цепи от влияния магнитного поля помех. Однако, связь через электрическое поле несколько снижает общую степень защищенности цепи.
7		Добавление к витой паре защитной оболочки экрана с одним заземленным концом по сравнению с вариантом 5 не дает практически никакого эффекта увеличения степени защищенности от помех электрических и магнитных полей.
8		Заземление обоих концов защитной оболочки кабеля обеспечивает дополнительную защиту цепи, поскольку экран обладает малым сопротивлением и отводит часть тока, наводимого магнитным полем помех в контуре заземления. Лучшее решение проблемы защиты, применительно к ВЧ помехам. Не может быть эффективно при больших уровнях НЧ помех.
9		За счет отрыва витой пары кабельной линии связи от земли и исключения попадания в нее токов земли, имеет в среднем в 2 раза выше защитные свойства, чем у варианта 8. Влияние замкнутого контура «защитная оболочка-земля» остается, что приводит к некоторому снижению защитных свойств цепи.
10		Имеет высокую степень защищенности за счет разрыва контура заземления, отрыва одного из концов витой пары кабельной линии связи от земли и заключение ее в защитную оболочку-экран
11		Обеспечена лучшей защитой, чем в варианте 10, поскольку она объединяет в себе все лучшие свойства коаксиальной цепи варианта 4 и витой пары варианта 10.

Окончание табл. 4.10

1	2	3
12		Используется принцип симметрирования относительно земли. В основном применяется для длинных линий связи дистанционного управления. Может иметь «плавающий» потенциал относительно земли или заземленную «среднюю» точку. Решает проблему широкополосной защищенности от низких до высоких частот.
13		Обладает высокой защищенностью от всех видов помех в широких пределах частотного диапазона. Основной недостаток – высокая стоимость и относительно большие размеры в сечении кабельной линии.

Кроме общих защитных мероприятий на практике применяются и индивидуальные, призванные дополнить и улучшить помехозащищенность измерительных устройств. Эти мероприятия основаны на выявлении наилучших с этой точки зрения режимов работы измерителя и его отдельных элементов, их конструктивных и электрических характеристик.

К этим мероприятиям можно отнести:

1) оптимизацию компоновки элементов СИТ таким образом, чтобы в помехонесущем поле находилось минимальное количество его элементов;

2) конструирование СИТ с максимально возможным полезным сигналом;

3) замену кабельной ЛПИ на ВОЛС;

4) создание вспомогательных систем и устройств, например, систем синхронизации, питания осциллографа и т.д., не подверженных воздействию помех и не генерирующих помехи.

В качестве рекомендации по защите измерительного оборудования от влияния мощного электромагнитного импульса следует использовать общие принципы обеспечения ЭМС, которые описаны в пособии [4.7].

Зонирование (компоновка оборудования). Проектирование для обеспечения ЭМС начинается с формулирования принципов

управления потоком электромагнитных помех в аппаратуру или из нее, предполагая, что помехи будут генерироваться любым изделием, включающим активные электронные компоненты [4.7]. Чтобы улучшить электромагнитную совместимость изделия, необходимо установить барьеры и обеспечить такие пути тока, чтобы входящие электромагнитные помехи были устранены (отражены или поглощены) до их воздействия на электронное устройство. В любом случае следует проектировать меры, которые можно применить на трех уровнях: первичном, вторичном и третичном, как показано на рис. 4.27.

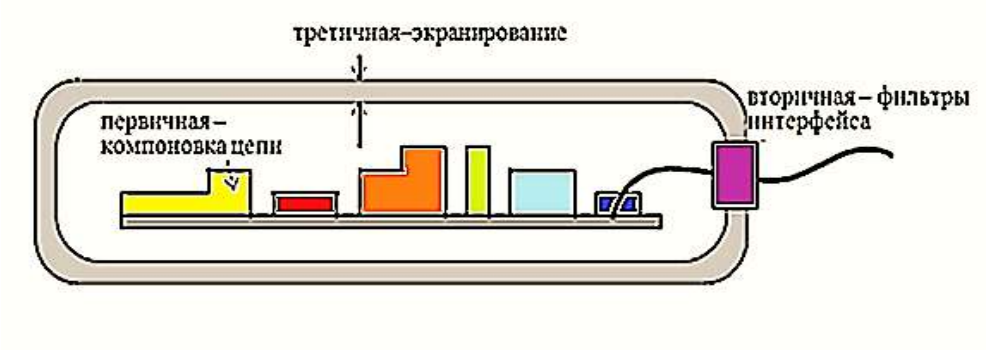


Рис. 4.27 — Меры обеспечения ЭМС [4.7]

Обеспечение ЭМС на первичном уровне предполагает такие меры проектирования, как развязку, использование симметричных схем, ограничение полосы частот и быстродействия, а также специальную компоновку плат и заземление. Для некоторых неответственных цепей, особенно для тех, которые не имеют соединительных кабелей, будет достаточно обычных мер проектирования.

На вторичном уровне всегда следует принимать во внимание интерфейсные связи между внутренними цепями и внешними кабелями. Это, несомненно, главный маршрут для распространения электромагнитных возмущений в обоих направлениях и для некоторых изделий (особенно при процессе проектирования) весь процесс управления может быть сведен к применению фильтров на интерфейсных входах. Выбор и установка соединителей - важная часть этого примера.

Полное экранирование (третичный уровень) является дорогим выбором, и это решение принимается, когда все другие меры исчерпаны. Но так как заранее трудно или невозможно прогнозировать эффективность первичных мер, следует учитывать вынужденную возможность применения экрана. Это приводит к проектированию геометрии конструкции таким образом, чтобы

обеспечить использование металлического корпуса или корпус с нанесенным металлическим покрытием. В последнем случае следует гарантировать, чтобы отверстия и соединения в корпусе соответствовали требованиям для соединений на радиочастотах, соединения заземления расположены в соответствующем месте, и конструкция корпуса позволяла бы легко наносить проводящее покрытие.

Наиболее рентабельный подход состоит в том, чтобы рассмотреть компоновку и заземление на начальной стадии. Ни одной единицы стоимости не добавляется при проектировании системы заземления. До 90% от постпроектных проблем ЭМС вызваны плохо разработанной компоновкой или заземлением. Хорошо разработанная компоновка и система заземления может улучшить как помехоустойчивость, так и защиту от помехоэмиссии, в то время как в неудачной конструкции кабелепровод может способствовать излучению или проникновению помех извне. Важнейшими принципами компоновки и заземления являются:

– разбиение системы для возможности управлять токами электромагнитных помех;

– рассмотрение заземления как пути протекания тока помех внутри аппаратуры и токов проводимости вне ее;

– рассмотрение заземления как средства предотвращения токов помех от активных сигнальных цепей; это означает, что требуется тщательное определение местоположения точек заземления и минимизации как собственного полного сопротивления заземления, так и его полного передаточного сопротивления к схеме;

– проектирование проводящих частей структуры с учетом того, что они неизбежно несут токи помех, которые желательно удалять от схемы.

Разбиение системы. На первом шаге проектирования необходимо разбить систему на отдельные части. При неудачном разбиении или при его отсутствии система может иметь подсистемы, сгруппированные в отдельные области на платах или в корпусах, но интерфейс между ними не будет точно определен и внешние порты будут рассредоточены по периферии групп. Это создает трудности при управлении токами синфазной моды, которые будут существовать в различных интерфейсах. Рассредоточение портов означает, что расстояние между ними на противоположных сторонах

системы велико, что приводит к напряжениям, возникающим на индуктивности шины заземления, как результат входных помех, а также сильной связи через кабели как источников внутренней помехоэмиссии.

Обычно единственный способ управлять помехоэмиссией и помехоустойчивостью такой системы - размещение общего экрана вокруг нее и установка фильтров на каждый интерфейс. Во многих случаях будет трудно или невозможно поддерживать целостность экрана для обеспечения его надлежащих свойств – необходимы отверстия и точки доступа, что снижает эффективность экранирования.

Разделенная система. Разбиение делит систему с позиции ЭМС на критические и некритические секции. Критические секции - секции, которые содержат источники излучений, такие как микропроцессоры или видеоцепи, или секции, которые особенно чувствительны к внешним помехам: микропроцессорные цепи и низкоуровневые аналоговые цепи. Для некритических секций уровень сигналов, полоса пропускания и функции цепи такие, что они не восприимчивы к внешним возмущениям и не способны к их порождению: не синхронизированная логика, линейные источники питания, каскады усилителей мощности - типичные примеры. На рис. 4.28 показан такой метод разбиения.

Критические секции могут быть заключены в экранирующий кожух, и все входящие и исходящие соединения тщательно проектируются.

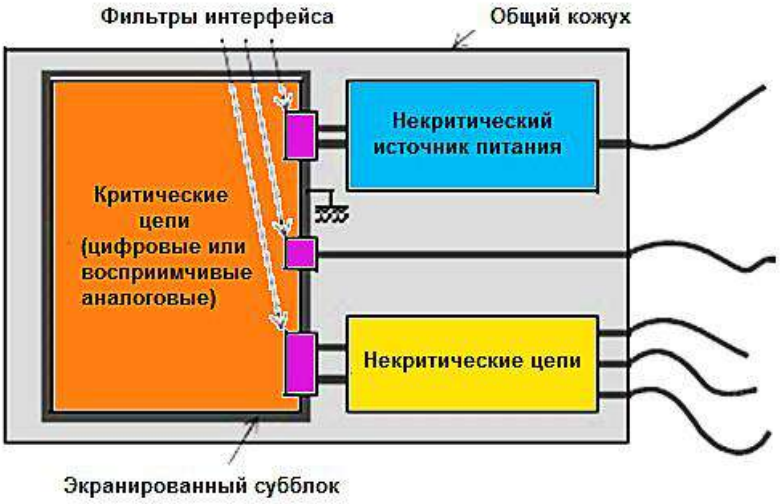


Рис. 4.28 – Метод разбиения системы

Этот корпус может заключать все изделие или часть его в зависимости от характера цепи: основная цель проектирования заключается в минимизации числа управляемых интерфейсов и обеспечение их физического расположения близко друг к другу.
Каждый интерфейс, который требует фильтрации или экранированного кабеля, увеличивает стоимость изделия. Системы без электрических портов - такие как карманный калькулятор или инфракрасный выносной контроллер - представляют идеальный случай с позиции ЭМС.

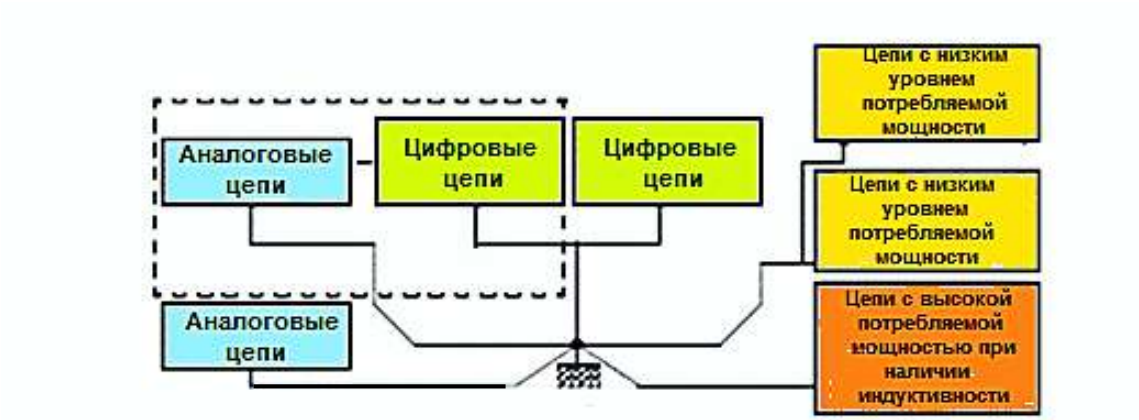
Отметим, что применение проводящих экранов проявляется в двух аспектах: устанавливает барьер на пути электромагнитных возмущений и обеспечивает пути для возвратного тока при применении заземления на экран (проводящий корпус).

Заземление и металлизация. Как только система должным образом разделена, необходимо гарантировать надежное заземление. Основная цель заземления состоит в том, чтобы создать опорную точку для внешних подключений к системе. Классически заземление определяется следующим образом: «эквипотенциальная точка или плоскость, которая служит как опорная точка для цепи или системы». Это определение неприменимо в присутствии токов, протекающих в системе заземления. Даже когда сигнальные токи незначительны, токи в системе заземления, индуцированные внешними электрическими и магнитными полями, будут смещать потенциал земли. Хорошая система заземления будет минимизировать эту разность потенциалов по сравнению с рабочим уровнем, но не может полностью устранить ее. Было предложено [4.12], что термин «заземление» в традиционном использовании должен быть пересмотрен в пользу «опорной точки», что это более точно отражает суть. Альтернативное определение для заземления: «путь с низким полным сопротивлением, по которому ток возвращается к его источнику». Это подчеркивает факт протекания тока и потребность малого полного сопротивления, что особенно важно при высоких частотах. Токи заземления всегда циркулируют в части петли. Задача состоит в проектировании петли таким образом, чтобы индуцированное напряжение оставалось достаточно низким в критических местах. Этого можно достичь проектированием системы заземления столь компактной и локальной, насколько это возможно.

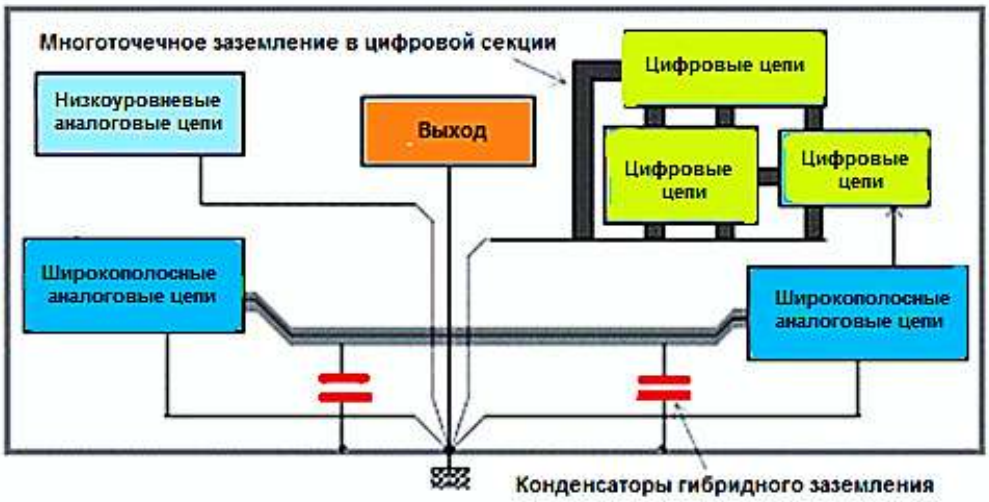
Наиболее важной функцией системы заземления по обеспечению ЭМС является минимизация напряжений помех в критических точках по сравнению с полезным сигналом. Для выполнения этого условия необходимо обеспечить путь с малым полным передаточным сопротивлением, расположенный в критической области.

Системы заземления. Рабочая система заземления, предназначенная для создания опорного уровня, может быть конфигурирована в виде одноточечной, многоточечной или гибридной системы (рис. 4.29)[4.12].

а) одноточечное заземление



б) модифицированное одноточечное заземление



с) многоточечное и гибридное заземление

Рис. 4.29 – Типы систем заземления

Одноточечная система заземления (рис. 4.29 а) концептуально самая простая, и в ней устраняется связь через общее сопротивление заземления и петли заземления на низких частотах. Каждый модуль схемы имеет собственное подключение к единственной точке заземления, и каждая стойка или субблок имеет единственную связь с шасси. Любые токи, протекающие в системе заземления, не влияют на схему. Эта система хорошо работает до частот мегагерцового диапазона, но протяженность каждого заземляющего соединения приводит к тому, что с возрастанием частоты возникает синфазная компонента напряжения между концами шин, обеспечивающих заземление различных модулей. При длинах соединения, равны нечетному числу четвертей длины волны, модули (цепи) оказываются эффективно изолированными друг от друга. В то же время паразитная емкость способствует возникновению токов, стремящихся обойти путь одноточечного заземления.

Модификация одноточечной системы (рис. 4.29 б) связывает вместе цепи заземления модулей с однотипными характеристиками, и далее присоединяют эти цепи к общей точке одноточечного заземления. Это позволяет уменьшить связь через общее сопротивление между цепями и в то же время позволяет высокочастотным цепям заземления оставаться локальными. Самые шумящие цепи располагаются ближе к общей точке для минимизации эффекта связи через общее сопротивление. Когда

отдельный модуль имеет более чем одну систему заземления, они должны быть связаны встречно включенными диодами для предотвращения повреждений, когда цепи разъединяются.

В *гибридном и многоточечном заземлении* (рис. 4.29 с) устраняются проблемы, присущие одноточечной системе. Многоточечное заземление необходимо для цифровых систем и высокочастотных цепей с высоким уровнем сигнала. Модули и схемы соединяются вместе многими короткими связями для минимизации напряжений синфазной моды, вызванных полным сопротивлением заземления. Альтернативным решением является применение большого числа связей с шасси, заземленной панелью или с другим проводящим телом с низким полным сопротивлением. Это не подходит для восприимчивых аудиоцепей, поскольку в замкнутых петлях, реализованных при таком подключении, будут индуцироваться токи за счет изменения во магнитного поля. В таких цепях трудно устранять возмущение на частотах 50/60 Гц в случае, если велика амплитуда изменения индукции магнитного поля, поскольку площадь петли также велика. Цепи, работающие на высоких частотах или уровнях, не восприимчивы к этим помехам и многоточечная подсистема заземления может быть сведена к одноточечной в полной системе.

В гибридной системе используются реактивные компоненты (конденсаторы и индуктивности) для создания системы заземления, которая по-разному функционирует на низких и высоких частотах. Это может быть необходимо в чувствительных широкополосных цепах. В примере, представленном на рис. 4.29 с, экран относительно длинного кабеля заземлен непосредственно на шасси через конденсатор для предотвращения режима стоячих волн, формируемых на радиочастотах. Конденсаторы блокируют постоянную составляющую и низкие частоты, и поэтому предотвращается образование не желательных дополнительных петель в системе заземления между двумя модулями.

При использовании реактивных компонентов в качестве элементов системы заземления, необходимо обеспечить отсутствие паразитных резонансов в цепях заземления, которые могут усилить токи помех. Например, конденсатор емкостью 0,1 мкФ, который используется для развязки кабеля, индуктивность которого составляет 0,1 мкГц, вызывает резонанс на частоте 1,6 МГц. Вблизи этой частоты будет казаться, что кабель не заземлен. Когда

используется отдельно заземление для цепей постоянного тока и пластины заземления для радиочастотных цепей (такие как шасси или рама), то подсистема заземления цепей постоянного тока подсоединяется к раме конденсатором емкостью 10…100 нФ. Две системы должны быть объединены связью с низким полным сопротивлением в одной точке, в которой присутствует наиболее высокая скорость изменения тока di/dt, типа материнской платы или объединительной платы блока.

Фундаментальный инструмент для использования на всех стадиях проектирования аппаратуры - карта заземления. Это диаграмма, которая показывает все опорные точки заземления и пути заземления (через структуры, экраны кабелей и т.п., а также проводники плат и проводные соединения) для всей аппаратуры. Она отражает только функцию заземления, опуская все остальные или представляя их в виде блок-схем. Ее создание, реализация и обслуживание на всех стадиях проекта должно находиться под эгидой требований ЭМС.

Для изделий, имеющих размер до 1 м, на частотах ниже 1 МГц возможно одноточечное заземление, и в ряде случаев оно предпочтительно. Для изделий этого размера одноточечная система заземления не пригодна для частот выше10 МГц, потому что индуктивность провода неприемлемо увеличивает полное сопротивление заземления, а паразитные емкости способствуют образованию непреднамеренных путей для токов заземления. Это создает в системе заземления петли, которые могут быть восприимчивы к магнитным полям, что следует избегать применением гибридной системы, особенно для очень чувствительных цепей.

С позиций ЭМС даже схема, которая предназначена для работы на низких частотах, должна показывать хорошую защищенность от радиочастотных возмущений. Это означает, что аспекты конфигурации ее заземления, которое подвергается воздействию возмущений - по существу все внешние интерфейсы, - должны быть спроектированы в виде многоточечного заземления. В крайнем случае, для интерфейсов должно быть обеспечено применение некоторых заземленных панелей или плат с малым полным сопротивлением.

Литература к главе 4

4.1. Кравченко В.И. Молния. Электромагнитные факторы и их поражающее воздействие на технические средства. - Харьков: Изд-во - "НТМТ". 2010. – 292с.

4.2. Кравченко В.И. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справочник.- М.: Радио и связь, 1991. - 264 с.

4.3. Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н., Князев В.В. Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник национального технического университета «ХПИ», г. Харьков, № 35, 2004, С. 29-54.

4.4. Test Operations Procedure (TOP) -2.511:2009 Electromagnetic Environmental Effects System Testing.-179 p.
Ресурс: http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a506300.pdf.

4.5 MIL-STD-464C:2010 Department of defense. Interface standard. Electromagnetic Environmental Effects Requirements for Systems. DoD.-2010. - 165 p.

4.6 ДСТУ ГОСТ 8.256-2008 Государственная система измерений. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения.

4.7. Шваб А. Измерение на высоком напряжении. Измерительные приборы и способы измерения. – 2-е изд., перераб. и доп. Пер. с нем. –М.: Энергоатомиздат, 1983, 264 с., ил.

4.8. Кужекин И.П. Испытательные установки и измерения на высоком напряжении. - М.: Энергия, 1980. - 136с.

4.9. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. - 391с.

4.10. Немченко Ю.С. Широкополосные средства измерения импульсных магнитных полей // Вестник национального технического университета «ХПИ», г. Харьков, № 35, 2004, С. 29-54. - 9 с.

4.11. MIL-STD-461G:2011 Department of defense. Interface standard. Requirements for the control of electromagnetic interference. Characteristics of subsystems and equipment. DoD.-2011.-280 p.

4.12. Уилльямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / Пер. с англ. В.С. Кармашев // -М.: Издательский дом «Технология», 2003.-540 с.

Приложение к главе 4

П.4 Эталоны импульсных электрических, магнитных (электромагнитных) полей, токов и напряжений Украины

Измерительные средства, применяемые для проведения испытаний на воздействие внешних электромагнитных факторов и тестирования бортовых линий связи и оборудования ЛА, в соответствии с метрологическими требованиями проведения испытаний, предусматривают обеспечение обязательной поверки и аттестации применяемых измерительных средств и контрольно-регистрирующей аппаратуры. Для этих целей в соответствии с нормативными требованиями используются первичные или вторичные эталоны, а также поверочные установки высшей точности.

В Украине, разработан и введен в действие эталон импульсных электрических, магнитных (электромагнитных) полей, токов и напряжений (Эталон-РЭМП). Он предназначен для аттестации измерительных средств, применяемых при испытании объектов, содержащих в своей основе радио- и электротехническое оборудование, на соответствие требованиям электромагнитной совместимости и стойкости к воздействию широкого класса электромагнитных помех естественного и искусственного происхождения [П.4.1].

Эталон представляет собой высоковольтную импульсную установку с предельными амплитудными и временными параметрами. Амплитудный диапазон импульсов электрического поля лежит в диапазоне от 4 В/м до 200 кВ/м, а импульсов магнитного поля – в диапазоне от 10 мА/м до 500 А/м. Длительность фронта импульсов менее 10^{-9}с.

В его состав входит высоковольтный импульсный источник питания (ВИП), разряжаемый на полеобразующую систему (ПС). При этом ВИП должен генерировать однократные импульсы высокого напряжения U и больших токов I, временные параметры которых соответствуют требованиям табл. 4.10, а амплитуды этих импульсов должны обеспечивать создание необходимых уровней E- и H-полей с учетом коэффициента преобразования ПС.

Таблица П.4.1 – Амплитудно-временные параметры полей, воспроизводимые Эталоном - РЭМП [П.4.1, П.4.5].

Наименование характеристики	Размерность	Вид поля	
		электрическое	магнитное
Наносекундный диапазон			
Диапазон максимальных значений	В/м , (А/м)	от $4\cdot10^{3}$ до $2\cdot10^{5}$	от 5 до 500
Длительность фронта	с	не более $8\cdot10^{-9}$	не более $8\cdot10^{-9}$
Длительность импульса	с	не менее $1{,}5\cdot10^{-4}$	не менее $1{,}5\cdot10^{-4}$
Субнаносекундный диапазон			
Диапазон максимальных значений	В/м, (А/м)	от 3 до $1{,}5\cdot10^{5}$	от $7{,}5\cdot10^{-3}$ до 375
Длительность фронта	с	не более $1\cdot10^{-9}$	не более $1\cdot10^{-9}$
Длительность импульса	с	не менее $2\cdot10^{-7}$	не менее $2\cdot10^{-7}$

Основные требования к ПС – это создание *E*- и *H*-полей с равномерной структурой, четко известными направлениями векторов полей и, по-возможности, легко рассчитываемыми амплитудами по геометрическим размерам ПС. Наиболее удовлетворяют требованиям к ПС направляющие системы типа полосковых линий (ПЛ). ПЛ – это два достаточно длинных ленточных проводника шириной b и длиной l, расположенных параллельно на расстоянии h друг от друга и у которых выполняется требования:

$$b, \ell > h, \qquad (П4.1)$$

$$d << b, \ell, h, \qquad (П4.2)$$

$$\lambda < h, b, \ell, \qquad (П4.3)$$

где λ – эквивалентная длина волны.

Вдоль ПЛ распространяется плоская электромагнитная волна ТЕМ-типа, которая в любом поперечном сечении ПЛ имеет

однозначное направление векторов $\bar{E}$ и $\bar{H}$-полей (рис. П4.1), а их соотношение определяется формулами

$$E / H = 120\pi, \qquad (П4.4)$$

$$E = U / H \qquad (П4.5)$$

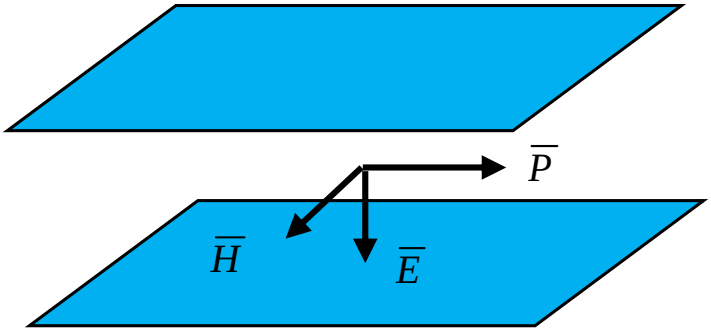


Рис. П4.1 - Направление векторов электромагнитного поля в ПЛ

Габариты ПЛ определяют габариты рабочего объема, в котором должно располагаться аттестуемое НСИ. По общепринятой методике габариты рабочего объема составляют 1/3 габаритов ПЛ.. Из анализа выражений (П4.1 – П4.3) вытекает, что чрезвычайно сложно обеспечить выполнение общих требований, предъявляемых к подобным системам в одной ПЛ. Поэтому в Эталоне-РЭМП используется две ПЛ с различными геометрическими размерами, а именно:

- ПЛ-24 с высотой 24 см для генерирования импульсов ЭМП с длительностью фронта ~ 1 нс и длительностью импульса не более 100 нс;
- ПЛ-48 с высотой 48 см для генерирования импульсов ЭМП с длительностью фронта ~ 8 нс и длительностью импульса не менее 100 мкс.

В Эталоне - РЭМП в качестве ПС применены симметричные замкнутые ПЛ (рис. П4.2), которые по сравнению с ПЛ по рис. П4.1 имеют дополнительные преимущества, а именно:

- отсутствие излучения ЭМП за пределы ПЛ;
- возможность одновременного использования двух рабочих объемов: сверху и снизу от центральной плоскости.

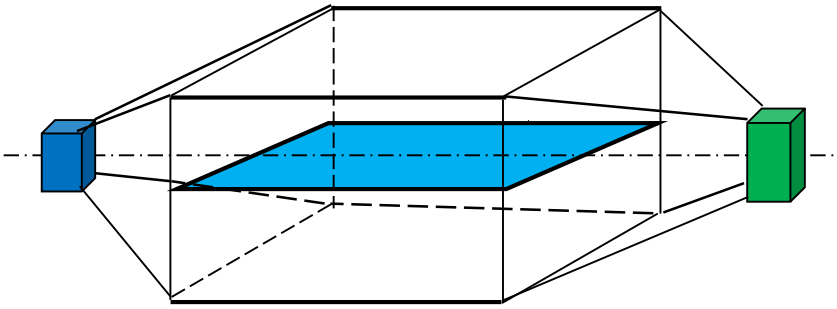


Рис. П4.2 - Симметричная замкнутая ПЛ

При этом габариты ПЛ выбраны таким образом, чтобы волновое сопротивление ПЛ составляло величину 50 Ом

Таким образом, Эталон - РЭМП содержит как бы два независимых эталона:

- эталон субнаносекундных импульсов (ЭСИ);
- эталон наносекундных импульсов (НСИ).

На рис. П4.3 приведена структурная схема Эталона - РЭМП.

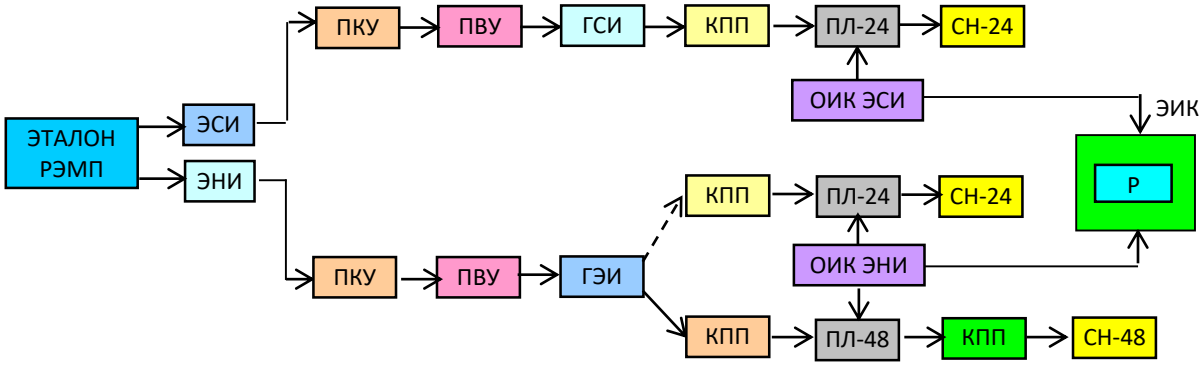


Рис. П4.3 - Структурная схема Эталона-РЭМП

ЭСИ – эталон субнаносекундных импульсов ЭМП; ЭНИ – эталон наносекундных импульсов ЭМП; ПКУ – пульт контроля и управления; ПВУ – повысительно-выпрямительное устройство; ГСИ – генератор ступенчатых импульсов; ГЭИ – генератор экспоненциальных импульсов; КПП – коаксиально-полосковый переход; ПЛ-24 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,24 м; ПЛ-48 – полосковая линия с расстоянием между пластинами 0,48 м; СН – согласующая нагрузка; ОИК – образцовый измерительный комплекс; Р – регистраторы; ЭИК – экранированная измерительная кабина.

Внешний вид Эталона-РЭМП приведен на рис. П4.4.

Рис. П4.4 – Внешний вид Эталона – РЭМП

Две независимые части Эталона – ЭСИ и ЭНИ работают поочередно. Общими элементами ЭСИ и ЭНИ являются ПКУ, ПВУ, и ОИК с Р.

ПКУ (рис. П4.3) устанавливает вид работающего Эталона, режим его работы (одиночный или частотный, ручной или автоматический), амплитуду ЭМП и осуществляет контроль за всеми промежуточными элементами Эталона.

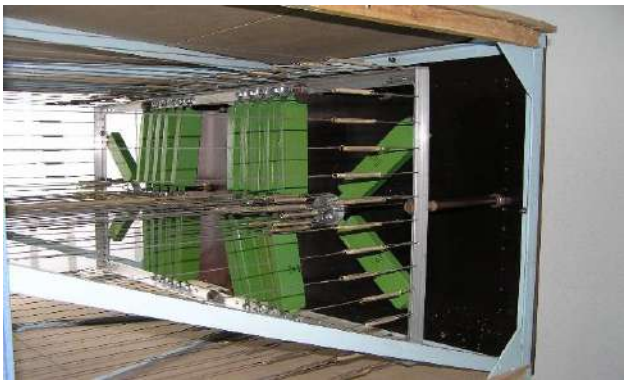
Рис. П4.5 – Общий вид ПКУ

Обе полосковые линии (рис. П4.6) представляют собой симметричные ПЛ замкнутого типа с длиной в несколько раз превышающей поперечные габариты.

а) б)

Рис. П4.5– Общий вид полосковых линий

Согласующие нагрузки СН-24 и СН-48 (рис. П 4.6) предназначены для согласования волновых сопротивлений для устранения отражений от концов линий. ПВУ (рис. П4.7) создает постоянное напряжение до 50 кВ, необходимое для заряда ГСИ и ГЭИ.



а) б)

Рис. П4.6 – Общий вид согласующих нагрузок СН-24 (а) и СН-48 (б)

Рис. П4.7 – Общий вид ПВУ

ГСИ (рис. П4.8) создает импульсы напряжения прямоугольной формы, соответствующей временным параметрам субнаносекундных импульсов. ГЭИ (рис. П4.9) создает импульсы напряжения экспоненциальной формы, соответствующей временным параметрам наносекундных импульсов.

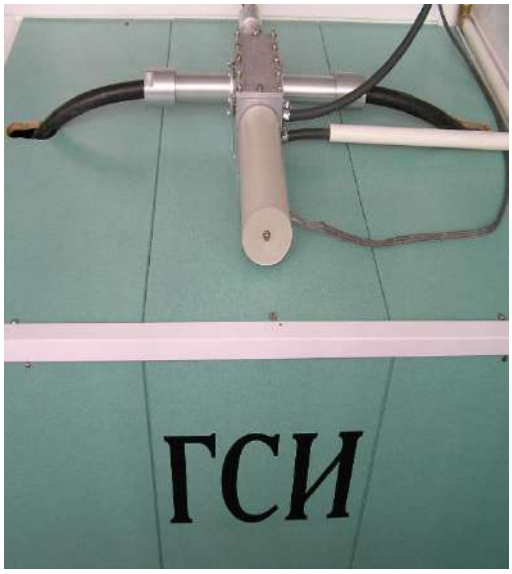


Рис. П 4.8 – Общий вид ГСИ

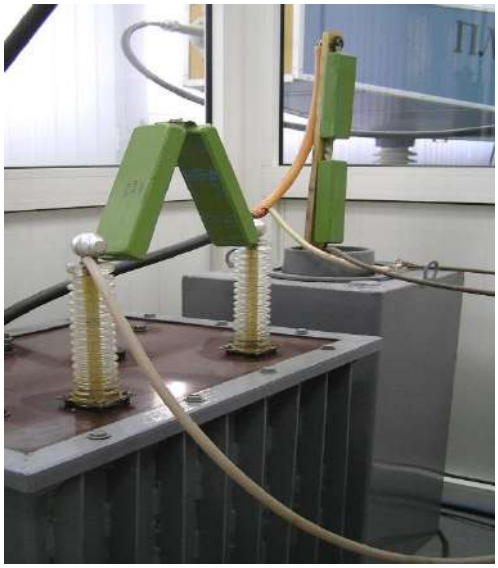


Рис. П4.9 – Общий вид ГЭИ

КПП (рис. П4.10) служит для согласования обеих полосковых линий ПЛ-24 и ПЛ-48 как со стороны входа (с ГСИ и ГЭИ), так и со стороны выхода (с СН).

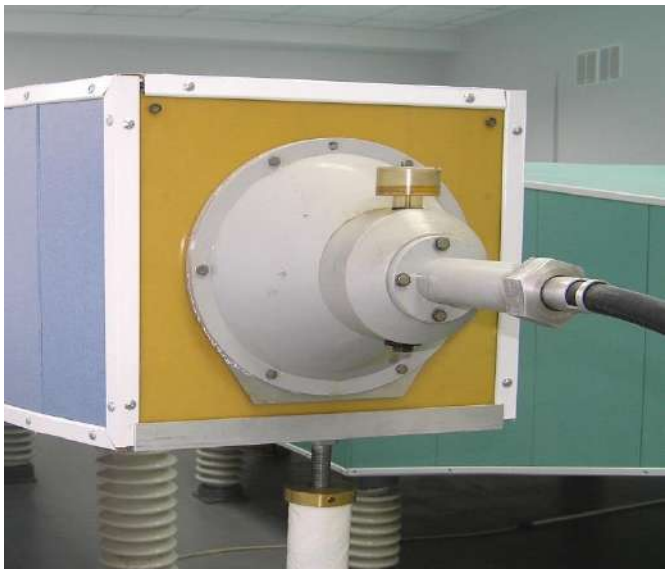


Рис. П4.10 – Общий вид КПП

Для контроля выходных амплитудно-временных параметров Эталона-РЭМП служит штатный измерительный комплекс, состоящий из трех нестандартных средств измерения (НСИ), метрологические параметры которых приведены в табл. П4.2.

Таблица П4.2 - Параметры измерительного комплекса Эталона - РЭМП [П4.4].

Характеристика	Тип НСИ		
	СПЕФВ-ЕК	СПЕФВ-ЕО	СПЕФВ-НО
Измеряемый параметр	*E*-поле	*E*-поле	*H*-поле
Амплитудный диапазон, кВ/м, А/м	0,1-500	10-200	25-530
Время нарастания ПХ*, нс	0,128	4,8	4,4
Длительность ПХ, мкс	0,15	2140	12,3
Доверительные границы относительной погрешности измерения, %	3,3	4,2	3,7
Тип линии связи	кабель ℓ=20 м	световод ℓ =50 м	световод ℓ =50 м
* ПХ – переходная характеристика			

Эталон – РЭМП позволяет проводить метрологическую аттестацию измерительных средств импульсных напряженностей электрических и магнитных полей, токов и напряжений.

Литература к приложению 4

П.4.1. Кравченко В.И., Немченко Ю.С. Исходный Эталон Украины импульсных электрических и магнитных полей – цель создания эталона, требования к нему и его конструктивное исполнение. // Електротехніка і електромеханіка. – 2006, - №2. – Національний технічний університет „ХПІ”, С.76-79.

П.4.2.Немченко Ю.С., Лесной И.П., Лантушко Б.Н., Князев В.В. Метрологическое обеспечение эксплуатации высоковольтных импульсных электроразрядных установок // Вестник национального технического университета «ХПИ», г. Харьков, № 35, 2004, С. 29-54.

П.4.3. Кравченко В.И., Немченко Ю.С., Князев В.В., Лесной И.П. Применение эталона РЭМП в качестве эталона единицы высокого импульсного напряжения. - VII Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)», 12-14 жовтня 2010 р. Наукові праці конференції у 2-х томах. – Т. 1. – Х.: ННЦ «Інститут метрології». – 2010. – С. 211-214

П.4.4. Кравченко В.И., Немченко Ю.С., Князев В.В., Лесной И.П., Аникин В.В. Результаты международного сличения эталонов импульсного электромагнитного поля Украины и Российской Федерации. - VII Міжнародна науково-технічна конференція «Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2010)», 12-14 жовтня 2010 р. Наукові праці конференції у 2-х томах. – Т. 1. – Х.: ННЦ «Інститут метрології». – 2010. – С. 215-217

П.4.5. Nemchenko Yu. S., Knyazyev V.V., Kravchenko V.I and Lisnoy I.P. The development of the pulse electromagnetic processes measurement unity supporting system in Ukraine // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, 18-22 September, 2006, Sevastopol, Ukraine.

Розглянуто сучасні підходи до методів випробувань літальних апаратів на відповідність вимогам блискавкостійкості. Містяться матеріали по методикам випробувань, опису високовольтного випробувального обладнання та метрологічного забезпечення проведення випробувань.
Для інженерно-технічних працівників, що розробляють і експлуатують технічні засоби й студентів відповідних спеціальностей. Також книга може бути корисна широкому колу читачів.

Наукове видання

КРАВЧЕНКО Володимир Іванович
КНЯЗЄВ Володимир Володимирович
ЛІСНОЙ Іван Петрович
НЕМЧЕНКО Юрій Семенович

БЛИСКАВКА ТА ЛІТАЛЬНІ АПАРАТИ

Монографія в трьох томах

Під загальною редакцією проф. В. І. Кравченко

Том 3

Випробування на блискавкостійкість

(російською мовою)

ISBN 617-7618-80-4

9 786177 618804

Відповідальний за випуск *В. І. Кравченко*
Редакція авторська

Підписано до друку 27.07.21.
Формат 60×84 $^{1}/_{8}$. Папір офсетний.
Ум. друк. арк. 42,31. Зам. № .
Наклад 300 прим.

Видавець: Мірошниченко Олег Анатолійович
61002, м. Харків, вул. Дарвіна, 16, кв. 25.
Свідоцтво Державного комітету телебачення і радіомовлення України
серія ДК № 5818 від 28.11.2017 р.
ел. пошта: merash@i.ua

Надруковано у друкарні ТОВ «Цифра Прінт».
Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.
Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30