

Глава одиннадцатая

Методики проведения испытаний объектов на молниестойчивость

11.1. Выбор условий и параметров имитации молнии при проведении испытаний

Типовые испытания объектов проводятся по стандартным методикам. В них определены требования к порядку выполнения отдельных процедур, последовательность операций, параметры воздействующих импульсов, взаимное расположение испытательного стенда и объекта испытаний в помещении лаборатории. Характеристики измерительного комплекса также оговорены в большинстве стандартов. Условия испытаний, как правило, должны быть максимально приближены к условиям эксплуатации объекта. Вместе с тем при выполнении испытаний в конкретной лаборатории необходимо считаться с реальными условиями. В редких случаях испытательные лаборатории предназначены для работ с однотипными объектами. К таким лабораториям можно отнести те, которые находятся на промышленных предприятиях, выпускающих электротехническое оборудование, например трансформаторы, высоковольтные изоляторы, конденсаторы, кабели и т.п. В соответствии с номенклатурой изделий предприятия создаются испытательные лаборатории с определенным набором испытательных установок и измерительных приборов. Испытания в таких лабораториях проводятся по типовым программам, так как целью испытаний является подтверждение соответствия изделия установленным нормам. Например, при испытаниях трансформаторов высокого напряже-

300

ния определенного класса жестко заданного импульса, его максимальное значение, число воздействий этими импульсами. Оговорены методики настройки испытательного генератора импульсных напряжений, мероприятия по предотвращению случайного воздействия импульсами большего значения. Такие испытания носят рутинный характер.

Иной подход существует при выполнении испытаний на стадии разработки и изготовления новых видов изделий. В этом случае разрабатываются методики и программы испытаний, имеющие целью определить не только соответствие изделия стандартным нормам, но и запас прочности, а также выявить возможность возникновения нежелательных процессов в изделии при вариации параметров воздействия. Дело в том, что нормированные испытания не могут в точности соответствовать конкретным условиям эксплуатации. Поэтому в процессе проектирования изделия и его составных частей необходимо иметь информацию об их способностях выдерживать предельные параметры воздействия. Для примера можно привести тот же трансформатор. При разработке трансформатора, предназначенного для подстанций более высокого класса напряжения, чем существующие, потребуется проводить не только испытания, но и исследования процессов в обмотках при воздействии импульсов с различными параметрами. Так как трансформатор будет снабжаться проходным изолятором на новый класс напряжения, то и изолятор, а точнее, его опытный образец, должен быть подвергнут широкому спектру воздействий.

Еще сложнее обстоит дело в том случае, когда требуется произвести сертификацию принципиально нового типа изделия. В этом случае исследовательские работы, выполняемые на стадии проектирования и разработки опытного образца, могут завершиться требованием изменить существующие нормы испытаний. В качестве примера можно назвать ситуацию, возникшую при выполнении программы «Спейс Шаттл» в США. Ко времени создания космического челнока существовали нормы испытаний на молниестойкость самолетов. Однако Национальное аэрокосмическое агентство (НАСА) вынуждено было провести ряд исследований по инициированию молнии ракетами и самолетами

[7.12]. Экспериментальные запуски ракет для инициирования молнии производились на высоте 3300 м в Сокорро, штат Нью-Мексико, и с уровня моря в Космическом центре им. Кеннеди и в его окрестностях, штат Флорида. Помимо этого, НАСА выполнило исследовательскую программу по инициированию молнии самолетом. Для осуществления программы использовался специально оборудованный самолет типа F-106 В. Выполнение таких дорогостоящих работ преследовало цель определить условия и параметры воздействий на компоненты сложных летательных аппаратов при испытаниях в лабораториях.

По мнению специалистов, космические корабли многообразного использования восприимчивы к целому ряду воздействий молнии – от повреждения теплозащитных плиток и металлической обшивки до наведения паразитных сигналов в бортовой электронной аппаратуре. Очевидно, что выбор условий испытаний для различных элементов летательного аппарата должен основываться на представлениях о реальных воздействиях в эксплуатации. Для теплозащитных плиток наибольшую опасность представляет импульсная составляющая тока молнии, потому что плитки разрушаются от действия ударной волны, порождаемой протеканием импульсного тока по каналу молнии. Следовательно, при испытаниях на молниестойкость плитки должны обязательно подвергаться разряду с импульсом тока, равным импульсной составляющей тока молнии.

В то же время для металлической обшивки наибольшую опасность представляет постоянная составляющая тока молнии и при испытаниях металлическая обшивка должна подвергаться действию разряда с медленно изменяющимся током в течение времени, характерного для постоянной составляющей тока молнии.

Другой пример подхода к выбору условий испытаний можно найти в случае применения нового лакокрасочного покрытия для внешних поверхностей топливных кессон-баков самолета. Методикой определения соответствия нормам летной годности самолетов (МОС НЛГС) устанавливается, что испытания топливных кессон-баков, находящихся в зоне смещающихся разрядов, должны производиться при импульсном токе 200 кА

со скоростью нарастания 10^{11} А/с (переносимым зарядом не менее 4 Кл) и постоянной составляющей не менее 200 А за время 65 мс (переносимым зарядом не менее 13 Кл). Для впервые применяемого лакокрасочного покрытия не обязательно использовать такие параметры испытательных импульсов. Можно воспользоваться следующей методикой. На образцах, изготовленных с применением новых материалов, экспериментально определяется время удержания разряда в одной точке. Эксперимент проводится в специальной камере, соединенной с воздуходувкой. Скорость ламинарного потока воздуха должна равняться минимальной эволютивной скорости самолета. Обычно это скорость взлета или посадки. Разрядный ток должен быть не менее 200 А. По высоковольтному электроду разрядной камеры канал разряда должен перемещаться равномерно. На заземленном испытуемом образце фиксируются точки удержания канала разряда и расстояние между ними. Известно, что собственно канал разряда движется в потоке воздуха со скоростью, равной скорости потока. Делением расстояния между соседними точками удержания на скорость потока определяется время удержания канала разряда в каждой точке. Время удержания также может быть определено по осциллограммам напряжения на разрядной камере, так как переход канала от одной точки удержания к другой сопровождается резким изменением длины канала и соответствующим этому скачком напряжения. Измеренные интервалы времени между скачками напряжения равны времени удержания канала в точке на поверхности испытуемого образца.

Дальнейшие испытания изделий с применением тех же материалов могут производиться в неподвижном воздухе с импульсами тока, равными оговоренным выше, но с временем протекания не 65 мс, а равным тому, что определено экспериментально.

Таким образом, для измерения условий испытаний могут быть использованы результаты исследовательской работы, обосновывающей правоту или необходимость новых условий.

11.2. Измерения токов и напряжений при испытаниях объектов на молниестойчивость

Техника измерений больших импульсных токов и высоких напряжений достаточно хорошо разработана и подробно описана в [4.4, 11.1]. При испытаниях на молниестойчивость используются общеизвестные делители напряжения, токовые шунты и воздушные трансформаторы тока с интегрирующими элементами – так называемые «пояса Роговского». Однако возникают некоторые трудности, обусловленные слишком большим диапазоном изменения измеряемых величин. Напомним, что нормированный импульс тока равен 200 кА при длительности, лежащей в микросекундном диапазоне времени, а постоянная составляющая тока равна 200 А и имеет длительность до 1 с. Другими словами, составляющие испытательного импульса различаются на три порядка по значению и на пять-шесть порядков по длительности. По этой причине, когда нормированный импульс тока изображают графически, всегда оговаривается, что изображение дается не в масштабе.

Аналогичные трудности измерений токов возникают при исследовании отключающей способности выключателей в энергосистемах. Остаточный ток в выключателе, равный 0,1–10 А, протекает 10^{-5} – 10^{-3} с. Ему предшествует ток короткого замыкания 10^4 – 10^5 А в течение десятых долей секунды. Диапазон разброса параметров тока такой же, как при измерении нормированного тока молнии. Для успешного осциллографирования малых токов, протекающих непосредственно до или после больших импульсных токов, используются ограничители, включаемые между измерительным шунтом и осциллографом. Назначение ограничителя – пропускать без искажения на вход осциллографа сигнал, пропорциональный малому току и срезать сигнал, возникающий на шунте при больших токах. В [11.1] приведена схема ограничителя, успешно применяемая при измерениях токов в процессе испытаний и исследований дугогасящей способности коммутационных аппаратов высокого напряжения. Ограничитель (рис. 11.1) состоит из двух последовательно соединенных Г-образных ветвей. Первая из них содержит линейное

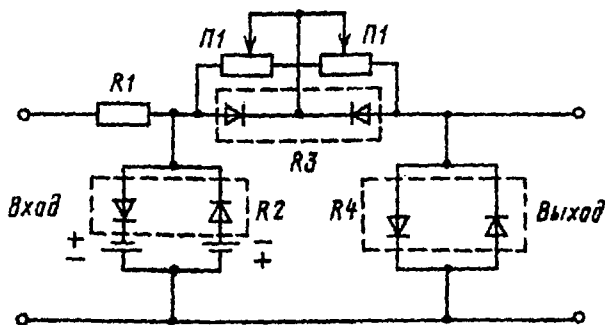


Рис. 11.1. Схема ограничителя уровня сигнала

сопротивление $R1$ и нелинейное сопротивление $R2$, а вторая – два нелинейных сопротивления $R3$ и $R4$. Во второй Г-образной ветви с увеличением входного напряжения сопротивление $R3$ возрастает, а $R4$ уменьшается. Такой характер изменений сопротивлений $R3$ и $R4$ обеспечивает глубокое ограничение. С помощью первой Г-образной ветви выходное напряжение сохраняется неизменным, соответствующим ее уровню ограничения. Потенциометрами $П1$ устанавливается одинаковый уровень ограничения для входных напряжений разной полярности. Ограничитель такого типа допускает кратковременную перегрузку напряжением в несколько киловольт, сохраняя на выходе напряжение, не превышающее нескольких десятков милливольт.

Для одновременной записи импульсной и постоянной составляющих кроме использования ограничителя уровня сигнала приходится применять либо двухлучевой осциллограф с различными скоростями развертки лучей, либо два осциллографа, работающих в различных диапазонах времени.

При измерении напряжений на канале разряда в длинном воздушном промежутке также приходится использовать ограничители величины сигнала, включаемые между делителем напряжения и входом осциллографа, так как падение напряжения на канале существенно (на несколько порядков величины) меньше, чем пробивное напряжение промежутка. При имитации канала молнии в

лабораторных условиях иногда требуется контролировать энергию, выделяющуюся в канале. Для этого необходимо знать значение активного падения напряжения на сопротивлении канала. Делитель напряжения, подключенный к длинному каналу, выдает сигнал, пропорциональный полному падению напряжения, т.е. сумме активного и индуктивного падений напряжения. Чтобы исключить из сигнала индуктивную составляющую, которая может значительно превышать активную при большой скорости изменения тока, необходимо применять компенсацию. Суть метода состоит в том, что к низковольтному плечу делителя включается небольшая катушка индуктивности, магнитно связанная с участком токопровода, по которому протекает разрядный ток. Катушка располагается в пространстве таким образом, что возникающая в ней ЭДС имеет знак, противоположный индуктивному падению напряжения на канале. Настройка системы на полную компенсацию производится следующим образом. Разрядный промежуток закорачивается проводником, сечение которого приблизительно равно сечению канала разряда в момент времени, в который желательно получить компенсацию. Если сопротивление проводника-закоротки много меньше сопротивления канала, то сигнал с делителя будет близок к нулю при условии полной компенсации индуктивной составляющей. Если сигнал существенно отличен от нуля, то изменяется коэффициент связи катушки с разрядным контуром путем перемещения и вращения катушки в пространстве. Настройку системы удобно проводить при колебательном характере разрядного тока. В этом случае даже при значительном активном сопротивлении закоротки, когда сигнал с делителя отличен от нуля, о качестве компенсации индуктивной составляющей можно судить по сдвигу фазы колебания напряжения относительно тока. При полной компенсации сдвиг фаз отсутствует. Следует отметить, что в процессе разряда канал изменяет свои сечение и длину. Поэтому обеспечить точную компенсацию на всю длительность разряда практически невозможно.

Другой способ компенсации индуктивного падения напряжения на канале разряда заключается в том, что заземление делителя напряжения осуществляется не в той точке, где заземлен токо-

вый шунт, а посылка контура. Перемещая точку соединения заземляющего вывода делителя с токопроводом в ту или иную сторону от шунта добиваются удовлетворительного качества компенсации. Тот или иной способ компенсации применяется в зависимости от конструкции токопроводов, места подключения токового шунта и делителя напряжения, конфигурации разрядной цепи.

При испытаниях на молниестойкость электрического, электронного и радиооборудования летательных аппаратов необходимо измерять наведенные напряжения в соединительных проводах. Значения наведенных ЭДС могут достигать нескольких тысяч вольт. Измерение наводок в протяженных проводниках связано с рядом трудностей:

подключение измерительных устройств может повлиять на характеристики исследуемой системы проводов;

заранее не известен частотный спектр колебаний, которые могут возникнуть в сложной системе разветвленных проводов под действием электромагнитного импульса от испытательного тока;

необходимо решить вопрос о том, относительно чего измерять наведенные потенциалы;

летательный аппарат, стоящий на испытательном поле, имеет резонансные характеристики, отличающиеся от тех, которые ему присущи в полете.

Можно назвать еще ряд проблем, связанных с нелинейным характером поведения композиционных материалов, неравномерным растеканием тока по элементам конструкции, влиянием радиопрозрачных участков обшивки и т.п.

Наибольшего значения наведенные напряжения достигают в антенных устройствах летательных аппаратов, так как они не экранируются обшивкой. Измерение наведенных напряжений при испытаниях на молниестойкость антенно-фидерных устройств (АФУ) производится в режиме нагружения АФУ на эквивалент нагрузки.

11.3. Измерение параметров газодинамических возмущений канала разряда

Протекание импульса тока по каналу разряда сопровождается ударной волной. Ударная волна образуется вокруг расширяющегося канала и распространяется по невозмущенному воздуху со скоростью несколько большей, чем та, с которой расширяется фронт области свечения. Зарегистрировать ударную волну можно высокоскоростным фотографированием с применением теневого метода. Суть его заключается в том, что объект съемки помещается в поток света, в котором лучи идут параллельно. Источник света и съемочная камера размещаются по разные стороны от объекта напротив друг друга. При фотографировании самосветящихся объектов, таких как канал разряда, для получения снимков хорошего качества температура источника света должна быть выше, чем у канала. В экспериментах по определению размеров зоны энерговыделения и газодинамического возмущения при имитации канала молнии использовались подсветка от эталонного источника типа ЭВ-45 и сверхскоростной фоторегистратор типа СФР-2М. При определении радиуса канала скоростное фотографирование производилось через интерференционные светофильтры, пропускающие свет с длинами волн 400–410 нм. Для измерения скорости ударной волны использовались также пьезо-керамические датчики [4.2].

Исследования показали, что при токах главного разряда молнии наибольшая скорость распространения фронта ударной волны достигает 5 км/с. По известной скорости можно определить плотность, давление и температуру газа за фронтом ударной волны с использованием табличных данных по термодинамическим функциям и ударной адиабаты воздуха [4.9]. Максимальное значение давления на фронте ударной волны достигает десятков атмосфер. К моменту окончания нормированного импульса тока главного разряда радиус ударной волны равен 100 мм и более.

11.4. Регистрация световых явлений при испытании

Скоростное фотографирование канала разряда при испытаниях на молниестойчивость применяется для определения скорости движения светящейся зоны канала. Фоторегистрация осуществляется с использованием светофильтров, пропускающих волны видимого света определенной длины. Интенсивность свечения измеряется с помощью спектроскопических устройств. Например, свет из канала направляется в двойной монохроматор типа ДМР-4. Интенсивность спектральных линий на выходе монохроматора измеряется с помощью фотоэлектронного умножителя.

При испытаниях топливных баков на искрение используется статическое фотографирование. Испытуемая панель топливного бака прикрепляется внутренней стороной к фототубусу. На внешнюю сторону панели воздействует разряд с нормированными параметрами. При растекании тока разряда по панели могут возникать искрения в местах соединения деталей панели. Особую опасность в этом отношении представляет место соединения различных крышек люков с панелью. Регистрация искрения осуществляется фотоаппаратом, соединенным с тубусом. При нормированных испытаниях на фотопленке должны уверенно регистрироваться световые вспышки с энергией больше 0,2 мДж. Для калибровки чувствительности фоторегистрации в этом случае используется искровой разряд конденсатора через воздушный промежуток 2–5 мм. Емкость конденсатора и его зарядное напряжение подбираются такими, чтобы запасаемая в конденсаторе энергия не превышала 0,2 мДж. Таким образом, при разряде конденсатора энергия в искре не может превысить 0,2 мДж с учетом потерь в соединительных проводах и в самом конденсаторе. Калибровочный искровой промежуток с электродами типа игла–игла устанавливается на испытуемую панель. Затвор фотоаппарата открывается заблаговременно до возникновения искры. Фотографирование осуществляется с использованием объектива с большой светосилой и высокочувствительной фотопленки.

11.5. Методика определения электромагнитного влияния молнии на объекты

Электромагнитное влияние молнии на объекты называют косвенным воздействием. Оно осуществляется электромагнитным полем, возникающим при разряде молнии. Воздействие высокочастотного поля на проводники в объекте сопровождается возникновением в них электродвижущей силы и протеканием наведенных токов. Наведенные токи и напряжения могут представлять опасность для оборудования объекта. Наибольшие наводки имеют место при протекании тока молнии по поверхности объекта.

Электромагнитное влияние молнии на наземный объект может проявиться в случае удара молнии в молниеотвод. Помимо воздействия через электромагнитное поле может иметь место вынос электрического потенциала по оболочкам кабелей, проложенных в земле поблизости от заземлителя молниеотвода.

Для испытаний на косвенные воздействия молнии используются как полномасштабные объекты, так и их модели или макеты. Испытания натурального самолета производятся с целью измерения наведенных токов и напряжений в соединительных проводах и кабелях. При испытаниях используются генераторы импульсных токов высокого напряжения. Однако, как правило, значение испытательного импульса тока не превышает 100–1000 А. Временные характеристики испытательного импульса тока аналогичны нормированным значениям для тока главного разряда молнии. Результаты измерений линейно экстраполируются с тем, чтобы получить значения наводок, которые возникли бы при токе 200 кА.

Испытания на электромагнитное влияние могут проводиться с использованием масштабных моделей объекта, в которых используются те же материалы и соблюдаются соотношения экранирующих и радиопрозрачных элементов конструкции. Жгуты проводов и кабелей прокладываются в модели аналогично натурным. Испытания на моделях могут проводиться как при нормированных, так и при пониженных уровнях тока.

Испытания отдельных систем оборудования...
ся вне состава изделия. При этом моделируются условия работы системы. Наведение электродвижущей силы в соединительных проводах осуществляется от специальных генераторов с помощью импульсных трансформаторов, монтируемых на соединительных проводах и кабелях. Значение и форма возбуждаемых импульсов тока и напряжения нормируются.

Целью испытаний является доказательство того, что фактические уровни наведенных напряжений и токов не превышают установленных контрольных уровней и что оборудование допускает расчетные уровни переходных процессов и воздействие многократных бросков.

Способность электронного оборудования допускать расчетные уровни воздействий при переходных процессах проверяется испытаниями отдельных компонентов, при которых внешние напряжения прикладываются непосредственно к штырькам разъемов. Испытания проводятся на полностью собранных и работающих системах, и при этом контролируются их рабочие параметры и условия возникновения сбоев.

Поскольку число возможных комбинаций импульсов молнии и потоков системных данных очень велико, при проверке защиты системы от сбоев нельзя полагаться только на результаты испытаний системы на сбой или только на результаты анализа способности системы подавлять или компенсировать наводки.

Один из возможных вариантов схемы испытаний с наведением напряжений в жгуте проводов представлен на рис. 11.2. Испытуемое устройство 1 и функционирующее совместно с ним устройство 2 соединены проводами 3. Оба устройства и соединяющие их провода располагаются над заземленным металлическим листом 4. Электропитание устройств 1 и 2 осуществляется от источника питания 5 через устройство согласования 6. Это устройство предназначено для устранения отражений импульсов, приходящих по проводам к источнику питания. Генератор нормированных импульсов 7 и измерительный осциллограф 8 располагаются за пределами испытательного поля. Через трансформатор 9 осуществляется возбуждение импульса в соединительных проводах 3. От этого же трансформатора берется сигнал 11 для

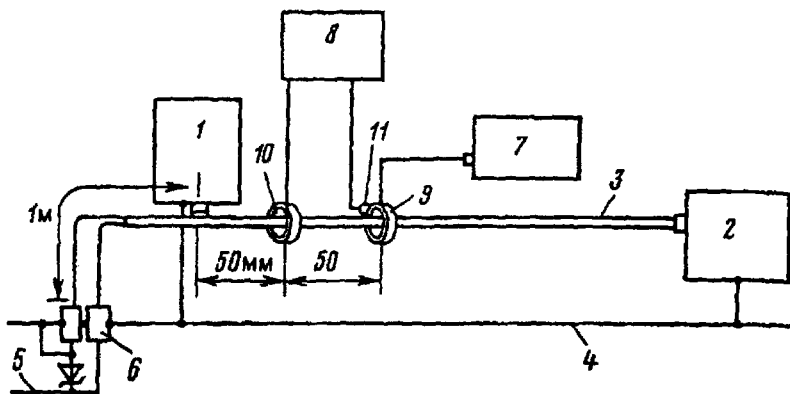


Рис. 11.2. Расположение оборудования при испытаниях на косвенное воздействие молнии

контроля напряжения. Измерительный трансформатор 10 используется для контроля тока, наведенного в соединительных проводах. Высота расположения соединительных проводов над металлическим листом должна равняться той, что имеет место в эксплуатационных условиях, но не менее 50 мм. Толщина металлического листа из меди или алюминия должна быть не менее 0,25 мм, из латуни – 0,5 мм. Испытуемое устройство и другие связанные с ним устройства должны функционировать в нормальном эксплуатационном режиме в момент возбуждения испытательных импульсов.

Испытания на устойчивость к электромагнитному влиянию могут осуществляться и по способу, при котором оборудование или соединенные с ним провода облучаются электромагнитным полем. Источниками поля могут быть полосковая линия или специальная антенна.

Оснащение испытательных стендов автоматизированными с использованием ЭВМ пультом управления и измерительными комплексами позволяет ускорить процесс испытаний, повысить точность и облегчить работу испытателей.

При определении электромагнитного влияния молнии на объекты возникают проблемы электромагнитной совместимости, решение которых отражено, например, в [11.2–11.4].

11.6. Критерии молниестойчивости

В общем виде критерий молниестойчивости объекта формулируется в [7.2] следующим образом. Адекватность проектируемого варианта молниезащиты предъявляемым требованиям проверяется путем демонстрации того, что фактические уровни переходных процессов, появляющиеся в местах соединения проводов и оборудования, не превышают установленных контрольных уровней и что оборудование способно допустить расчетные уровни переходных процессов и воздействие многократных бросков, вызывающих сбои. В соответствии с таким положением для испытаний на молниестойчивость электронного и электрооборудования летательных аппаратов предлагается в новых международных нормах установить три категории оборудования, пять типов испытательных импульсов и пять уровней импульсов.

Критерием стойкости к косвенным воздействиям молнии конкретного оборудования будет экспериментальное подтверждение того, что данное оборудование, отнесенное к конкретной категории, выдерживает воздействие нормированного импульса определенных типа и уровня.

Критерием устойчивости топливных баков к тепловому воздействию является экспериментальное подтверждение отсутствия прожига стенки бака или отсутствия появления на внутренней поверхности стенки бака горячей точки, могущей привести к вспышке паров топлива при воздействии канала разряда с нормированным импульсом тока, соответствующим зоне расположения бака на летательном аппарате.

Критерием устойчивости к электродинамическим воздействиям тока молнии является экспериментальное подтверждение отсутствия механических повреждений агрегатов, препятствующих их нормальному функционированию.

Критерием устойчивости к воздействию искрений в топливных баках при протекании по ним тока молнии является экспериментальное подтверждение отсутствия искрений с энергией больше 0,2 мДж внутри бака при воздействии импульса тока 200 кА со скоростью нарастания 10^{11} А/с.

Критерием устойчивости к прямым воздействиям молнии агрегатов из полимерно-композиционных материалов является экспериментальное подтверждение того, что потеря механической прочности агрегата не превышает допустимой при воздействии разряда с нормированным импульсом тока, соответствующим зоне расположения агрегата на объекте.

Критерием устойчивости диэлектрических оболочек к воздействию напряжений, возникающих при ударе молнии, является экспериментальное подтверждение электрической прочности при воздействии нормированных импульсов напряжения.

Список литературы

К гл. 1

- 1.1. Акопян А.А. Исследование защитного действия молниеотводов: М-Л.: Госэнергоиздат, 1940. (Труды ВЭИ; Вып. 36).
- 1.2. Араго Ф. Гром и молния: Пер. с фр. СПб., 1859.
- 1.3. Грозозащита линий высокого напряжения переменного тока // Итоги науки и техники. Электрические станции и сети / М.В. Костенко, И.М. Богатенков, Ю.А. Михайлов, Ф.Л. Халилов. М., ВИНТИ, 1985.
- 1.4. Мучник В.М. Физика грозы. Л.: Гидрометеиздат, 1974.
- 1.5. Стаханов И.О. О физической природе шаровой молнии. – 2-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1985.
- 1.6. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001.
- 1.7. Шонланд Б. Полет молнии: Пер. с англ. / Под ред. И.М. Имянитова. М.: Гидрометеиздат, Моск. отд-ние, 1970.
- 1.8. Юман М. Молния: Пер. с англ. / Под ред. Н.В. Красногорской. – М.: Мир, 1972.
- 1.9. Anderson R.B., Eriksson A.J. Lightning parameters for engineering application / *Electra*. 1980. № 69. P. 65–102.
- 1.10. Berger K. Blitzstromparameter von Aufwärtsblitzen // *Bull. SEV*. 1978. Bd. 69, № 8. S. 353–360.
- 1.11. Методы получения заряженных аэрозольных образований и их использование / К.В. Анцупов, И.П. Верещагин, М.А. Кошелев и др. // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1990. № 5. С. 78–92.