На правах рукописи

СО АУНГ

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ГРОЗОВЫХ РАЗРЯДОВ

Специальность 05.13.05

«Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2010

Работа выполнена на кафедре «Теоретическая электротехника» в Московском авиационном институте (государственном техническом университете) МАИ (ГТУ).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой.«Теоретическая электротехника»
Московского авиационного института (государственного технического университета)
Кириллов Владимир Юрьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Москалев Александр Иванович

доктор технических наук, профессор
Тумковский Сергей Ростиславович

Ведущая организация: Государственное образовательное учреждение
Московский государственный индустриальный университет (ГОУ ГИУ)

Защита диссертации состоится “06” декабря 2010 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.125.01 при Московском авиационном институте (государственном техническом университете) по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (государственного технического университета) «МАИ».

Автореферат разослан “03” ноября 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.125.01
к.т.н., доцент. А. В. Корнеенкова.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Грозовые разряды сопровождают многие атмосферные явления и процессы: градо- и торнадосодержащие облака, мезомасштабные конвективные комплексы, циклоны умеренных и тропических широт. Они представляют опасность для авиации, энергетики, других отраслей экономики и населения. Увеличение интенсивности воздушного движения, широкое применение композиционных материалов, низковольтных систем управления, компьютерных сетей сопровождается количественным и качественным ростом ущерба от грозовых разрядов. По данным Национального института молниевой безопасности США (г.Луисвилл) потери гражданского сектора этой страны от поражения молниями составляют 4-5 млрд. долларов ежегодно из них: 150-200 млн. от лесных пожаров, около 2 млрд. из-за отмены авиарейсов и их переносов в другие аэропорты, 1 млрд. из-за отключений электроэнергии, 125 млн. от повреждений компьютерных сетей и др. Кроме того, с 1990 по 2000 годы на АЭС зарегистрировано 346 инцидентов, связанных с грозами. Ежегодно страховым компаниям предъявляются около 300 000 требований на возмещение убытков, вызванных молниями (в 2000 году на сумму 332 млн. долларов).

Отличительными признаками грозовых разрядов (ГР) являются широкополосное электромагнитное излучение (ЭМИ) и высокая концентрация электронов в каналах протекания разрядного тока. Молнии, представляют собой мощные разряды, образующиеся в нижних слоях атмосферы.

Молния определяется как нестационарный сильноточный электрический разряд, длина пути которого обычно исчисляется километрами. Разряд молнии переносит в среднем заряд от 140 до 250 Кл.

Полная длительность разряда молнии порядка 0,2 с, а предельный ток может достигать 200 - 300 кА. Молния выводит из строя электронные элементы и устройства. Наносит ущерб в электроэнергетике, повреждает линии электропередачи ЛЭП и подстанции, представляет опасность для нефте-, газо-резервуаров.

Грозовые разряды представляют опасность для технических средств: самолетов, ракет, судов и автомобилей. Грозовые разряды создают излучаемые электромагнитные помехи (ЭМП) в виде электрических и магнитных полей, которые воздействуют на элементы и устройства технических средств. Излучаемые ЭМП от грозового разряда ухудшают качество функционирования технических средств, могут вызывать сбои, отказы, прекращение функционирования. Прямое попадание молнии в техническое средство может привести к катастрофе.

Для обеспечения помехоустойчивости элементов и устройств от излучаемых ЭМП грозовых разрядов необходимо разрабатывать эффективные средства защиты и проверять их на испытательных стендах в лабораторных условиях. Исходными данными для проведения испытаний являются расчетные параметры электромагнитной обстановки в виде напряженности электрического и магнитного полей. Разработка программ, алгоритмов и методов расчета для различных случаев воздействия электрических и магнитных полей на технические средства позволяет определять исходные данные для разносторонних и многоэтапных испытаний элементов и устройств технических средств на воздействие грозовых разрядов.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является:

Исследование переходных процессов в электрических цепях технических средств при воздействии грозовых разрядов для улучшения качества

функционирования с учетом их использования в условиях грозовых разрядов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- Разработка критерия определения ближней и дальней зон распространения электрических и магнитных полей грозовых разрядов.
- Способ расчета напряженностей электрического и магнитного полей грозового разряда в ближней и дальней зонах распространения.
- Методика расчета напряжений и токов в электрических цепях технических средств индуцированных электрическим и магнитным полями грозового разряда.
- Алгоритм расчета импульсного тока для проведения исследований переходных процессов в электрических цепях технических средств при воздействии грозового разряда в лабораторных условиях.
- Методика исследования переходных процессов в электрических цепях технических средств, предназначенная для определения уровней переходных процессов при воздействии грозового разряда.

Методы исследования

При решении поставленных задач в диссертационной работе были использованы: методы математического анализа; методы теории линейных электрических цепей; теоретические основы электротехники; теория электромагнитного поля; методы оптимизации. Расчеты выполнялись с помощью компьютерных программ MatLab, Mathcad.

Научная новизна

1. Предложен критерий определения ближней и дальней зон распространения электрического и магнитного поля от канала тока молнии.

2. Получены формулы расчета напряженностей электрического и магнитного поля на основе апериодической модели тока молнии, в зоне соизмеримой с длиной канала молнии, ближней и дальней зонах распространения.
3. Разработана методика расчета индуцированных напряжений и токов в центральных проводниках экранированных кабелей при воздействии электрического и магнитного полей грозового разряда и тока молнии.
4. Разработан алгоритм расчета тока для исследования переходных процессов в электрических цепях технических средств от грозового разряда в лабораторных условиях.
5. Предложена методика исследований переходных процессов в электрических цепях технических средств от грозового разряда в лабораторных условиях.

Достоверность и обоснованность

Достоверность результатов работы основана на использовании в теоретических расчетах, в качестве исходных, обобщенных экспериментальных данных.

Практическое значение работы

1. Разработанная методика расчета напряжений в центральных проводниках позволяет определять эффективность экранов кабелей при воздействии грозовых разрядов.
2. Разработанный алгоритм расчета импульсного тока позволяет ускорить процесс исследований технических средств на воздействие грозового разряда в лабораторных условиях и сократить время их проведения.
3. Предложенная методика проведения исследований переходных процессов от грозового разряда позволять уменьшить затраты на

проектирование технических средств с учетом их использования в условиях грозовых разрядов.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались автором и обсуждались: на 2-ой Всероссийской конференции ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2009» (г. Москва 2009г.), на 8-ой научно-техническая конференции «Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии» (г. Санкт-Петербург, 2009г.), на 8-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009» (г. Москва 2009г.), на научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010» (г. Москва 2010г.). Тезисы докладов опубликованы. Опубликована статья под названием «Расчет электрического поля грозового разряда» в журнале «Технологии ЭМС», Москва, 2009 г, № 2(29), 66-68 стр..

Публикации

По основным результатам выполненных в диссертации исследований опубликовано 5 печатных работ. В том числе опубликована одна статья в журнале, включенном в списке ВАК.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников. Основная часть диссертации содержит 123 страницы машинописного текста, включая 79 рисунков и 3 таблицы. Список литературы включает 39 наименований. Общий объем диссертационной работы составляет 135 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулирована цель исследований, определенны решаемые научно-технические задачи, показаны научная новизна и практическая ценность результатов, дана информация о структуре, апробации, публикациях и практическому использованию материалов диссертационной работы.

В первой главе диссертации приведено описание физической природы и даны параметры грозового разряда. Проанализированы три основные типа грозовых разрядов линейная молния, шаровая молния и тихие разряды. Проведен сравнительный анализ моделей тока молнии. Систематизированы прямые и косвенные воздействия электромагнитных помех грозовых разрядов на элементы и устройства технических средства (рис. 1). Сформулированы требования к параметрам испытательных установок. Важнейшее требование заключается в обеспечении прохождения импульса тока заданной формы через испытываемое техническое средство. Приведено описание методики испытаний технических средств на молниеустойчивость от грозового разряда.

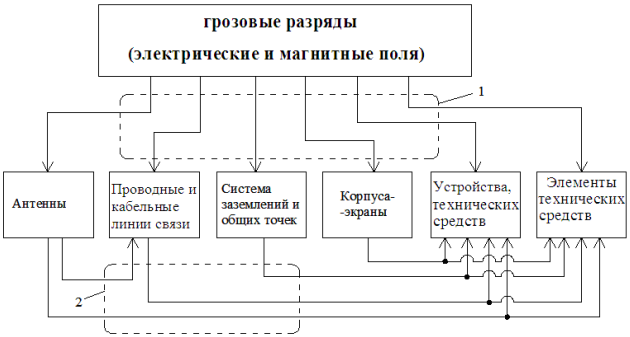

Рис. 1. Схема воздействий грозового разряда на элементы и устройства технических средств: 1 – прямое воздействие; 2 – косвенное воздействие.

Во второй главе диссертации предложен критерий для нахождения границы зон распространения излучаемых импульсных электромагнитных помех в виде электрического и магнитного поля от грозового разряда. Критерий для нахождения границы зон распространения электромагнитного поля при появлении импульсных грозовых разрядов заключается в выполнении условия:

$$\int_0^{\omega_{гр}} |F(j\omega)|^2 \cdot d\omega \geq k \int_0^{\infty} |F(j\omega)|^2 \cdot d\omega \quad ,$$

где $\omega_{гр} = V / R_{гр}$ – граничная частота;

V – скорость распространения излучаемых ЭМП;

$R_{гр}$ – расстояние от источника ЭМП до границы раздела зон;

k – коэффициент, определяющий величину энергии излучаемой помехи в ближней зоне;

F ($j\omega$) – спектральная функция излучаемой электромагнитной помехи.

Если приемник (техническое средство) располагается на расстоянии $R_п < R_{гр}$, то, следовательно, он находится в ближней зоне, где $R_{гр} = V/\omega_{гр}$. Расчет параметров излучаемой электромагнитной помехи – напряженностей электрического и магнитного полей осуществляется по формулам для индукционной зоны. Соответственно при $R_п > R_{гр}$ расчет осуществлется по формуле для дальней зоны рис. 2.

Значения коэффициента *k* при определения границы разделения ближней и дальней зон могут изменяться в пределах k = 0,9 – 0,98 .

Получены формулы для расчета напряженностей электрического и магнитного полей грозового разряда в зоне размером меньше или соизмеримой с длиной канала молнии на основе апериодической модели тока молнии. Схема для рачета напряженности электрического и магнитного поля на основе метода зеркального отражения приведена на рис. 3.

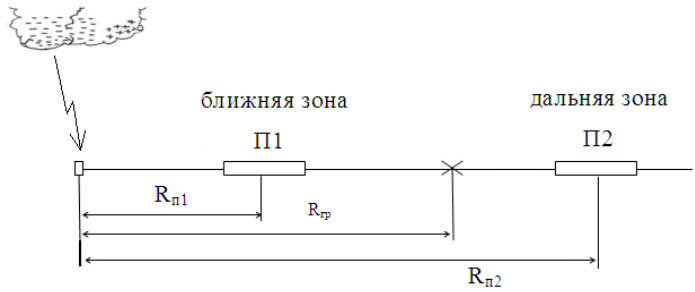

Рис. 2. Схема расположения приемника относительно источника и границы зон: П1 – приемник ЭМП в ближней зоне; П2 – приемник ЭМП в дальней зоне; $R_{п1}$ – расстояние П1 от грозового разряда; $R_{п2}$ – расстояние П2 от грозового разряда; $R_{П1} \le 0{,}1R_{ГР}$; $R_{П2} \ge 10R_{ГР}$.

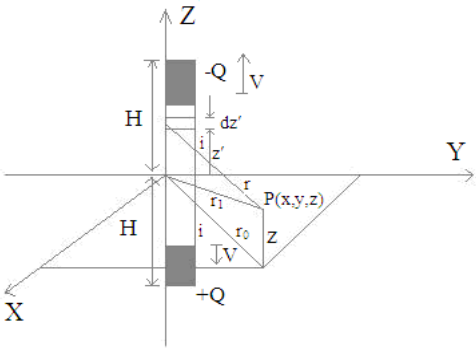

Рис. 3. Схема модели для рачета напряженности электрического и магнитного поля на основе метода зеркального отражения:

H – высота облака;

Q – величина заряда;

P – точка наблюдения;

V–скорость распространения импульса тока; z – высота точки наблюдения над поверхностью земли;

r_0 – расстояние от канала молнии; r – расстояние от dz′ до P; r_1 – расстояние от 0 до P.

Формулы вихревой E_{z1} и потенциальной E_{z2} составляющих напряженности электрического поля грозового разряда полученные в соответствии со схемой (рис. 3) имеют вид

$$E_{z1}(t) = -\frac{\partial \overline{A}_z}{\partial t} = -\frac{\mu_0 I_m}{4\pi}\int_0^H \left[\frac{-a_1 \cdot e^{-a_1\left[t-(z'/v)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]} - a_2 \cdot e^{-a_2\left[t-(z'/v)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]}}{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}} \cdot 1\left[t-(z'/v)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{-a_1 \cdot e^{-a_1\left[t-(z'/v)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]} - a_2 \cdot e^{-a_2\left[t-(z'/v)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]}}{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}} \cdot 1\left[t-(z'/v)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]\right] \cdot dz'$$

$$E_{z2}(t) = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{I_m}{4\pi\varepsilon_0\beta c}\int_0^H \frac{d}{dz}\left[\frac{e^{-a_1\left[t-(\frac{z'}{v})-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]} + e^{-a_2\left[t-(\frac{z'}{v})-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]}}{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}} \cdot 1\left[t-(\frac{z'}{v})-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right] + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-a_1\left[t-(\frac{z'}{v})-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]} + e^{-a_2\left[t-(\frac{z'}{v})-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]}}{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}} \cdot 1\left[t-(\frac{z'}{v})-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]\right] \cdot dz'$$

где A_z, φ – векторный и скалярный электродинамические потенциалы.

Результирующая напряженность электрического поля вычисляется по формуле

$$\overline{E}_z = \overline{E}_{z1} + \overline{E}_{z2} = -\frac{\partial \overline{A}_z}{\partial t} - \frac{\overline{\partial \varphi}}{\partial z} \ . \qquad (1)$$

Для расчета напряженностей электрического и магнитного полей грозового разряда принята модель тока молнии в виде

$$i(t) = I_m(e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}) \cdot 1(t - \frac{z}{V})$$

где $1(t-\frac{z}{V}) = \begin{cases} 1\ ,\ t \geq \frac{z}{V} \\ 0\ ,\ t < \frac{z}{V} \end{cases}$.

Временная диаграмма, напряженности электрического поля E рассчитанной по формуле (1) приведена на рис. 4.

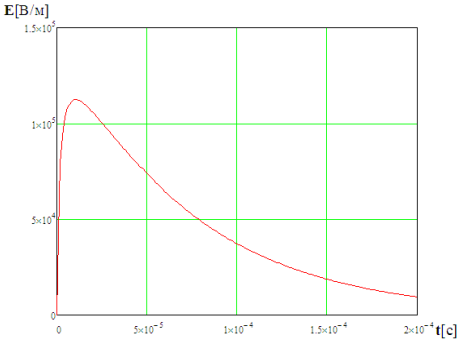

Рис. 4. Временная диаграмма напряженности электрического поля грозового разряда : для параметров I_m=20·10^{3}А; a_1= 0,0138·10^6 с$^{-1}$; a_2= 1,6253·10^6 с$^{-1}$; z = 0 м; r = 50 м; H=2000 м; c = 3·10^8 м/с; V = 5·10^7 м/с; t= 1·10^{-6} …200·10^{-6} с.

Формула для расчета напряженности магнитного поля имеет вид

$$H(t)=\frac{r_0\cdot I_m}{4\pi\sqrt{r_0^2+(z-V\cdot t)^2}}\cdot\left[-\int_0^H\frac{e^{-a_1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]}\cdot\left(\frac{a_1\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}-1\right)+e^{-a_2\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]}\cdot\left(\frac{a_2\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}-1\right)}{r_0^2+(z-z')^2}\cdot 1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]\cdot dz'+\right.$$

$$\left.+\frac{\int_0^H\frac{e^{-a_1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right]}-e^{-a_2\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right]}}{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}\cdot 1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z-z')^2}}{c}\right)\right]\cdot dz'}{\sqrt{r_0^2+(z-Vt)^2}}\right\}+\frac{r_0\cdot I_m}{4\pi\sqrt{r_0^2+(z+Vt)^2}}$$

$$\left\{-\int_0^H\frac{e^{-a_1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]}\cdot\left(\frac{a_1\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}-1\right)+e^{-a_2\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]}\cdot\left(\frac{a_2\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}-1\right)}{r_0^2+(z+z')^2}\cdot 1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]\cdot dz'+\right.$$

$$\left.+\frac{\int_0^H\frac{e^{-a_1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right]}-e^{-a_2\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right]}}{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}\cdot 1\left[t-\left(\frac{z'}{V}\right)-\left(\frac{\sqrt{r_0^2+(z+z')^2}}{c}\right)\right]\cdot dz'}{\sqrt{r_0^2+(z+Vt)^2}}\right\} \qquad (2)$$

Временная диаграмма напряженности магнитного поля H , для параметров : r = 50 м ; z = 0 м в соответствии с формулой (2) приведена на рис. 5.

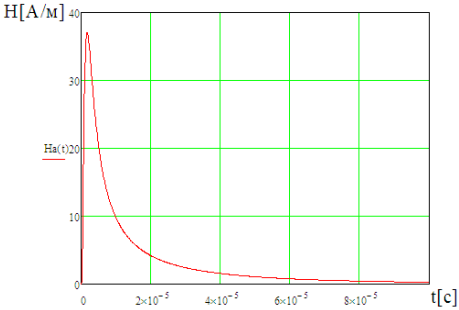

Рис. 5. Временная диаграмма напряженности магнитного поля H : для параметров I_m=20·10^{3}А; a_1= 0,0138·10^6; a_2= 1,6253·10^6; H=2000 м; c = 3·10^8 м/с; V = 5·10^7 м/с; t= 1·10^{-6} …100·10^{-6} с.

Получены формулы для расчета напряженностей электрического и магнитного полей в ближней и дальней зонах. Изменение напряженности магнитного поля грозового разряда во времени в дальней определяется формулой

$$H_{\psi 1}(t) = \frac{I_m H \cdot \sin\theta}{4\pi r c}\left[a_2 \cdot e^{-a_2(t-\frac{r}{c})} - a_1 \cdot e^{-a_1(t-\frac{r}{c})}\right],$$

изменение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля $E_\theta(t)$ имеет вид

$$E_{\theta 1}(t) = \frac{I_m H \cdot \sin\theta}{4\pi r \varepsilon_a c^2}\left[a_2 \cdot e^{-a_2(t-\frac{r}{c})} - a_1 \cdot e^{-a_1(t-\frac{r}{c})}\right],$$

где $\varepsilon_a=\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0$; θ=90°.

В диссертации приведены временные диаграммы, изменения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля грозового разряда в ближней и дальней зонах.

В третьей главе диссертации исследованы переходные процессы при воздействии электрического и магнитного полей в ближней зоне грозового разряда на электрические цепи. Используя эквивалентные схемы расчета исследована реакция цепи в виде межблочой симметричной линии связи при воздействии электрического и магнитного поля грозового разряда.

Токи и напряжения в линии связи определяются по формулам при условии подстановки в них (1) и (2)

$$I(t) = \frac{2 \cdot l \cdot h \cdot \pi \cdot \varepsilon_0}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right)} \cdot \frac{dE(t)}{dt} \quad , U(t) = 2 \cdot l \cdot h \cdot \mu_0 \cdot \frac{dH(t)}{dt}$$

При значениях r=50м, z=0м, временные диаграммы напряжения и тока индуцированных грозового разряда в линии длиной *l*=1м, с диаметром продников 2a=0.001м и расстоянии между ними h=0.01м, приведены на рис. 6 и рис. 7.

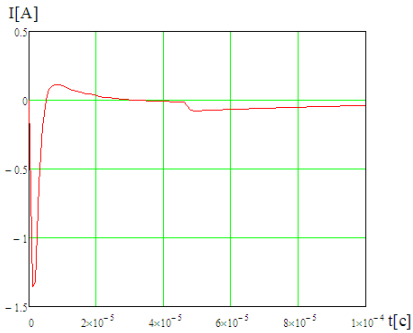

Рис. 6. Временная диаграмма тока I в линии связи.

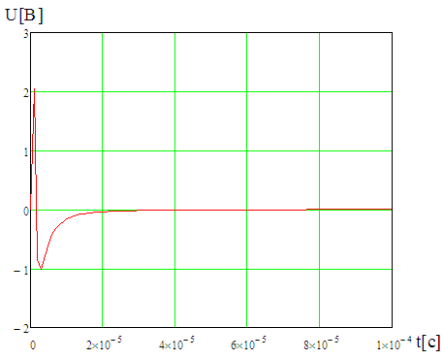

Рис. 7. Временная диаграмма напряжения U в линии связи.

Разработана программа расчета напряжений и токов на экране заземленного кабеля (рис.8) под воздействием магнитного поля грозового разряда апериодической формы

$$H(t) = H_m(e^{-a_1 t} - e^{-a_2 t}) \ .$$

Временные диаграммы напряжений и токов на экране кабеля полученные с помощью разработанной программы для кабеля для значений, например, H_m=1000[А/м]; a_1=1,2288·$10^4$$c^{-1}$; a_2=2,6376·$10^6$$c^{-1}$; *l*=500м; h=0,01м приведены на рис. 9.

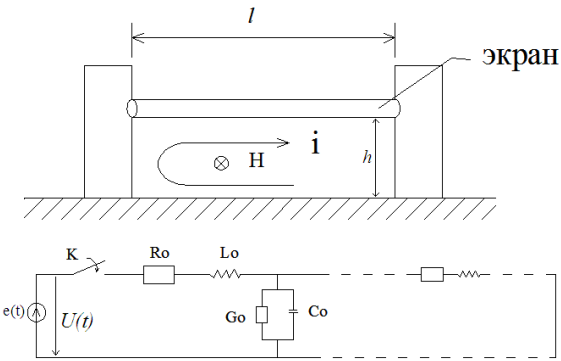

Рис. 8. Эквивалентная схема экрана кабеля в виде цепи с распределенными параметрами.

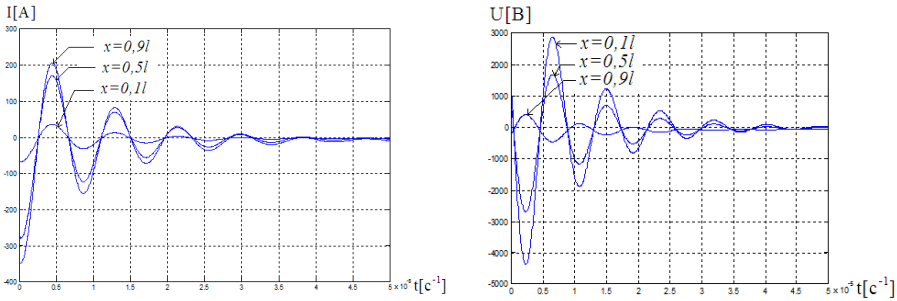

Рис. 9. Временные диаграммы тока и напряжения, для H_m=1000[А/м]; a_1=1,2288·$10^4$$c^{-1}$; a_2=2,6376·$10^6$$c^{-1}$; *l*=500м; h=0,01м; x=0,1*l*, x=0,5*l*, x=0,9*l*.

Разработана методика расчета напряжения индуцированного на центральном проводнике кабеля под воздействием грозового разряда. Для расчета используется формула сопротивления связи представлена в виде

$$Z_{CB}(\omega) = \frac{(1+j)}{2\pi \cdot r_0 \cdot \sigma \cdot \sqrt{\frac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}} \cdot \sinh\left[\frac{(1+j)d}{\delta}\right]} + j\omega M \ , \qquad (3)$$

где r_0 – радиус оболочки кабеля;

σ – удельная проводимость материала оболочки, См/м;

$\delta = \sqrt{\dfrac{2}{\omega \cdot \mu \cdot \sigma}}$ – толщина скин-слоя материала оболочки, м;

d– толщина оболочки кабеля, м ;

$j\omega M$ – сопротивление утечки через неоднородности экрана в виде оплетки. Частотная диаграмма сопротивления связи с экраном состоящим из трех оплеток приведена на рис.10.

Расчет индуцированных на центральном проводнике кабеля с тремя оплетками напряжения *U(t)* осуществляется по формуле

$$U(t) \doteq U(p) = I(p) \cdot Z_{CB1}(p) \tag{4}$$

где $Z_{CB1}(p) = \dfrac{1}{T^2 p^2 + mp + n} + pM$, (5)

I(p) – изображение по Лапласу тока на экране кабеля создаваемого грозовым разрядом.

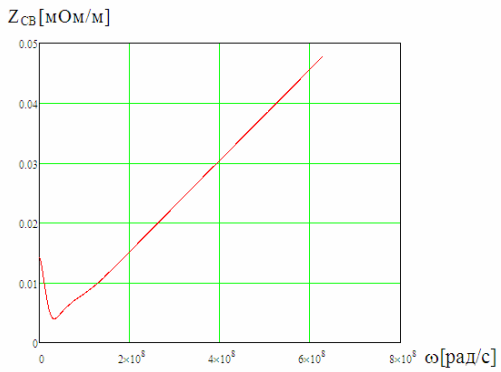

Рис 10.Частотная зависимость сопротивления связи для гибкого коаксиального кабеля с тремя оплетками: $r_0=2\cdot10^{-3}$м; $\sigma=5{,}6\cdot10^{7}$См/м; $\mu_a=\mu_r\cdot\mu_0$; $\mu_r=1$; $\mu_0=4\cdot\pi\cdot10^{-7}$Гн/м; $d=0{,}1\cdot10^{-3}$м; $z_в$= 50 Ом; $\dfrac{M}{z_B} = 4{,}67\cdot10^{-12}\,Гн/Ом\cdot м$.

Коэффициенты T, m, n определяются при аппроксимации модуля функции (3) модулем функции (5) с помощью итерационного метода Ньютона. Для значений $r_0=2\cdot10^{-3}$м; $\sigma=5{,}6\cdot10^{7}$См/м; $\mu_a=\mu_r\cdot\mu_0$; $\mu_r=1$; $d=0{,}1\cdot10^{-3}$м,

μ_0=4·π·10^{-7}Гн/м; М=4,67·10^{-12}*Гн/Ом.м* коэффициенты в выражении (4) имеют вид

$$T = 6,4932 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{м \cdot с^2}{мОм}},\ n=75,9567 \frac{м}{мОм},\ m = 7,1742 \cdot 10^{-6} \frac{м \cdot с}{мОм}\ .$$

Временная диаграмма напряжения на центральном проводнике кабеля с экраном из трех оплеток при протекании по экрану тока грозового разряда $i(t) = I_m(e^{-a_1 \cdot t} - e^{-a_2 \cdot t})$ с параметрами I_m=10 кА , a_1= 0,0138·10^6 $с^{-1}$, a_2 = 1,6253·10^6 $с^{-1}$, приведена на рис.11.

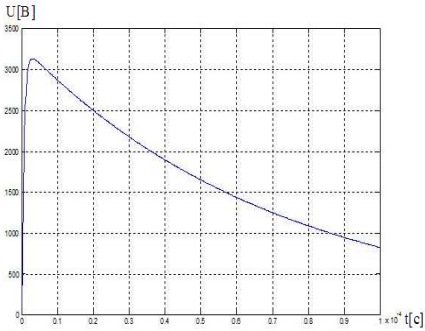

Рис. 11. Временная диаграмма напряжения на центральном проводнике кабеля с тремя оплеткам.

В четвертой главе диссертации предложена методика исследований переходных процесов в электрических цепях технических средств при воздействии грозовых разрядов в лабораторных условиях.

Исследование сложных технических средств связано со значительными материальными и временными затратами, поэтому выбор алгоритма исследования переходных процесов является одной из главных задач. В общем случае алгоритмы исследования строятся по следующей схеме:

– определяется неработоспособное техническое средство;

– определяется отказавшее устройство технического средства с максимально возможной точностью;

– находится элемент(ы), вызвавшие отказ устройства.

При проведении исследований переходных процесов при воздействии грозовых разрядов в лабораторных условиях создаются преднамеренные высоковольтные разряды. В результате воздействия электрического и магнитного полей от высоковольтных разрядов и самих разрядов на техническое средство возможны следующие состояния:

– сохранение и продолжение работоспособности технического средства (техническое средство невосприимчиво или устойчиво);
– полное нарушение работоспособности технического средства;
– нарушение работоспособности при сохранении функционирования;
– нарушение работоспособности только при воздействии разрядов и создаваемых ими полей.

Схема исследования переходных процессов в электрических цепях технических средств в виде графа приведена на рис. 12. На схеме обозначены этапы исследований. Первый этап - комплексные исследования j-го технического средства. Стрелкой B1 обозначено воздействие, создаваемое на первом этапе комплексных исследований. Второй этап - автономные исследования n - подсистем на которые можно разделить техническое средство с воздействиями в виде факторов грозовых разрядов B2, параметры которых определены на первом этапе. Третий этап - автономные исследования m - устройств технического средства из которых состоит n-я подсистема с воздействиями B3, параметры которых определены на втором этапе и.т.д.

Полученные в диссертации формулы позволяют расчитывать напряженности электрического и магнитного полей грозового разряда в лаборатории на основе заданных параметров в пространстве таких как длина разрядного канала, ток разряда, расстояние от канала разряда и т. п.

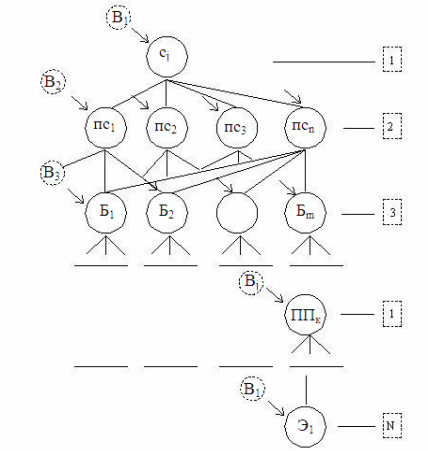

Рис. 12. Схема исследования переходных процессов в электрических цепях технических средств в виде графа.

Диаграммы напряженности электрического и магнитного поля выражающие зависимости напряженностей электрического и магнитного полей от расстояния между каналом разряда и техническом средством r_0 для различных значений тока и значений: a_1= 0,0138·10^6 c^{-1}, a_2 = 1,6253·10^6 c^{-1}, h= 1 м, приведены на рис. 13 и рис. 14, где h – длина канала разряда.

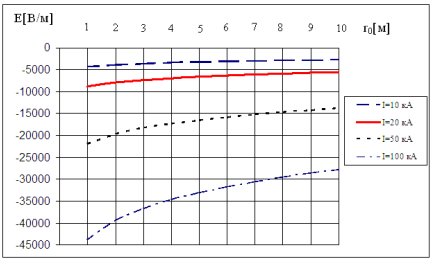

Рис. 13. Диаграмма напряженности электрического поля E в зависимости от расстояния до канала разряда.

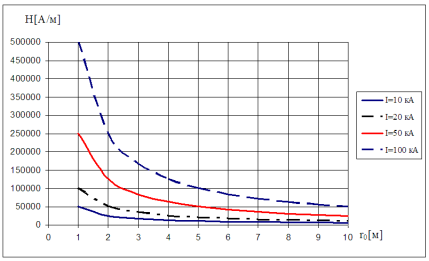

Рис. 14. Диаграмма напряженности магнитного поля H в зависимости от расстояния до канала разряда.

Для исследований переходных процессов в электрических цепях технических средств разработан алгоритм, расчета уровней электрического и магнитного полей в лаборатории. Основные этапы алгоритма указаны на схеме на рис. 15. На первом этапе осуществляется выбор исходных значений для расчета напряженности электрического и магнитного полей. На втором этапе формируются значения для расчета. На третьем этапе рассчитываются напряженности электрического и магнитного полей в пространстве. Алгоритм позволяет определять напряженности электрического и магнитного полей в лаборатории, сравнивает напряженности электрического и магнитного полей в пространстве и напряженности электрического и магнитного полей в лаборатории. Если напряженности электрического и магнитного полей равны, то расчет окончен. В противном случае, осуществляется возврат к второму этапу, со значением $I_{\max} \pm \Delta I_{\max}$ для достижения равенства напряженностей электрического и магнитного полей в лаборатории и пространстве.

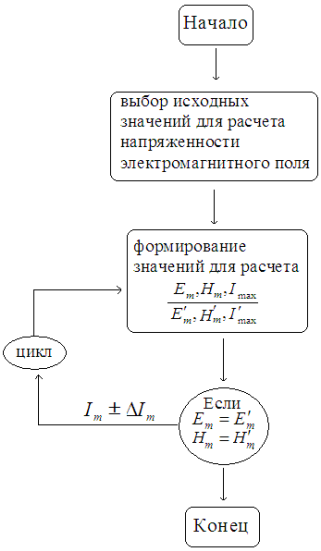

Рис 15. Схема алгоритма для расчета напряженности электрического и магнитного полей в лаборатории.

Разработанный алгоритм позволяет расчитывать значения напряженности электрического и магнитного поля для лабораторных исследований, соответствующие значениям напряженностей в пространстве.

Разработанный алгоритм также позволяет определять расстояние от канала молнии до технических средств, при которых переходные процессы напряжений и токов, возникающие под воздействием электрического и магнитного полей грозового разряда в устройстве, не превышают заданные стандартом нормативные значения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

По основным результатам, полученным в диссертационной работе можно сделать следующие выводы:

1. Проведен сравнительный анализ математических моделей импульсного тока молнии, позволяющий выбрать адекватную модель тока молнии.
2. Предложен критерий определения ближней и дальней зон распространения электрического и магнитного полей создаваемого грозовым разрядом, позволяющий определять зону расположения технического средства относительно грозового разряда.
3. Получены формулы расчета напряженностей электрического и магнитного полей на основе апериодической модели импульса тока молнии в зоне соизмеримой с длиной канала молнии, ближней и дальней зонах, позволяющие определять напряженности на разных расстояниях от канала молнии до технического средства и для различных параметров импульса тока молнии.
4. Разработана методика расчета индуцированных напряжений в центральных проводниках кабелей при воздействии на экран магнитного поля от грозового разряда а также при непосредственном воздействии тока молнии.

5. Разработан алгоритм расчета тока для проведения исследований переходных процессов в электрических цепях технических средств при воздействии грозового разряда в лабораторных условиях.
6. Предложена методика исследований переходных процессов в электрических цепях технических средств, позволяющая определять уровни переходных процессов при воздействии грозового разряда. Предложенная методика позволяет уменьшить затраты на проведение исследований переходных процессов от грозовых разрядов в электрических цепях технических средств.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Со Аунг, «Расчет электрического поля грозового разряда», сборник тезисов 2-ой Всероссийской конференции ученых, молодых специалистов и студентов «Информационные технологии в авиационной и космической технике – 2009», Москва, 2009г. стр.47.
2. Со Аунг, «Расчет кондуктивных электромагнитных помех в электрических цепях от грозового разряда», сборник тезисов 8-ой международной конференции «Авиация и космонавтика – 2009», Москва, 2009г. стр. 181.
3. Со Аунг, «Испытание элементов и устройств технических средств при воздействии имитационных грозовых разрядов», сборник тезисов научно-практической конференции молодых ученых и студентов МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010», Москва 2010г. стр.47.
4. В.Ю. Кириллов, Со Аунг, «Расчет электромагнитного импульса грозового разряда», труды симпозума 8-ой научно-техническая конференции «Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии», Санкт-Петербург, 2009г. стр. 384.

5. В.Ю. Кириллов, Со Аунг, «Расчет электрического поля грозового разряда» // Технологии электромагнитной совместимости, № 2(29), Москва, 2009 г., стр. 66-68.