

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт физики, нанотехнологий и телекоммуникаций

Работа допущена к защите

Директор ВШПФиКТ

_____ Е.Н. Величко

«___» _____ 2020 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ МАГИСТЕРСКАЯ
ДИССЕРТАЦИЯ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДЫ И ФОРМЫ ТОКОВ В
ЗАЗЕМЛИТЕЛЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ МОЛНИЕОТВОДОВ**

по направлению подготовки 16.04.01 Техническая физика

Профиль 16.04.01_05 Радиофизика и электроника

Выполнил

Студент гр. 3441601/80501

В.В. Курикова

Научный руководитель

доцент, к.ф.-м.н.

К.В. Грешневиков

Научный консультант

старший преподаватель

Г.П. Жабко

Консультант

по нормоконтролю

Е.В. Савченко

Санкт-Петербург

2020

РЕФЕРАТ

На 54 с., 15 рисунков,

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЗАЗЕМЛИТЕЛЬ, МОЛНИЕОТВОД, НЕСИММЕТРИЧНЫЙ ВИБРАТОР, КОЛЕБАТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС, ТОК, ИМПУЛЬС НАПРЯЖЕНИЯ, ПРОВОДИМОСТЬ

Тема выпускной квалификационной работы: «Исследование амплитуды и формы токов в заземлителях промышленных молниеотводов».

Данная работа посвящена колебательному процессу. Главная задача состояла в определении при каких условиях могут возникать колебательные движения. Задачи, которые решались в ходе исследования:

1. Обзор современных методов расчета заземлителей.
2. Разработка цилиндрического заземлителя, погруженного в полупроводящую среду. Эквивалентная электрическая схема с сосредоточенными параметрами.
3. Исследование процессов распространения волн тока в заземлителе как в несимметричном вибраторе. Разработка электродинамической модели и алгоритма расчета.
4. Переходные процессы при импульсном воздействии. Расчет уровня и формы токов.

Были получены аналитически формулы тока, на основе представления заземлителя как электрического вибратора, погруженного в среду.

Показано, что колебательные процессы можно представить как аналог колебательного контура.

Все это полезно для тех, кто разрабатывает заземлители и занимается созданием молниеотводов. Это дает возможность воспользоваться результатом формул для исследования тока для любых импульсов, параметров заземлителей, земли и т.д.

ABSTRACT

54 pages, 15 pictures

KEYWORDS: GROUNDING CONDUCTOR, LIGHTNING COLLECTOR, UNSYMMETRIC VIBRATOR, OSCILLATORY PROCESS, CURRENT, VOLTAGE IMPEDANCE, CONDUCTIVITY

The subject of the graduate qualification work is “Study of amplitude and shape of currents in earth electrodes of industrial lightning leads”.

The given work is devoted to oscillatory process. The main task was to determine under what conditions oscillating movements could occur. Objectives of the study:

1. Overview of modern methods of earth electrode calculation.
2. Development of a cylindrical earth electrode immersed in a semi-conductive medium. Equivalent electrical circuit with concentrated parameters.
3. Study of current wave propagation processes in the earthing electrode as in an asymmetric vibrator. Development of electrodynamic model and calculation algorithm.
4. Transient processes under pulse action. Calculation of current level and shape.

Analytically, current formulas were obtained based on the representation of the earthing electrode as an electric vibrator immersed in the medium.

It is shown that oscillatory processes can be represented as analogue of oscillatory circuit.

All this is useful for those who develop earth electrodes and create lightning leads. This makes it possible to use the result of the formulas to examine the current for any pulses, earth electrode parameters, earth, etc.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Глава 1. Обзор литературы.....	8
1.1 Общие сведения	8
1.2 Молниезащита	8
1.3 Параметры и характеристики промышленных молниеотводов	9
1.4 Электрические характеристики почв	11
1.5 Обзор современных методов расчета заземлителей.....	11
Глава 2. Ток в заземлителе	19
2.1 Общие положения	19
2.1.1 Зависимость от времени	19
2.1.2 Обозначения	20
2.2 Задача электростатики.....	21
2.3 Задача постоянных токов	22
2.4 Эквивалентная схема	25
2.5 Антенная задача	27
2.6 Импульсный ток.....	29
2.6.1 Импульсное напряжение	29
2.6.2 Спектры сигналов. Восстановление функции $i(t)$	33
2.7 Колебательные процессы	33
Глава 3. Примеры расчетов.....	36
3.1 Программа.....	36
3.2 Построение графиков	37
3.2.1 График импульса напряжения	37
3.2.2 Графики тока	38
3.3 О характере $Z(w)$	45
Заключение	46
Список литературы	48

Список сокращений

СИ – система исчислений;

ЗУ – заземляющее устройство.

ВВЕДЕНИЕ

Основной темой будем считать заземлители.

Заземлители представляют из себя проводники, непосредственно соединенные с землей. Это может быть один или группа проводников.

Для защиты от удара молнии на здания и сооружения устанавливают специальные устройства – молниеотводы.

Отличие данной работы в применении теории антенн к полупроводящей среде для расчета токов и параметров заземлителей молниеотводов. Обычно рассматривают в статике. Мы рассматриваем колебательный - более сложный случай, как несимметричный вибратор.

Все это полезно для тех, кто разрабатывает заземлители и занимается созданием молниеотводов. Они обеспокоены большими токами и возникающими колебательными процессами. Это дает возможность воспользоваться результатом формул для исследования тока для любых импульсов, параметров заземлителей, земли и т.д.

Наша главная задача состоит в том, что колебательный процесс возникает. Мы рассматриваем вибратор, как длинную линию. Привычный вариант – это когда волна тока доходит до конца, и пока дойдет весь ток разойдется. А если вокруг цилиндра почва плохо проводящая, ток не успевает выходить, доходит до конца и опять обратно. В итоге ток будет ходить «туда-сюда» и возникают переколебания.

Мы аппарат антенн используем и исследуем при каких параметрах почвы, размерах возникает колебательный процесс.

Объектом исследования в нашем случае – процессы тока в заземлителе.

Мы используем те подходы, формулы, которые используются в теории антенн.

Отличие состоит в том, что размеры другие, частоты. Излучающая часть антенны окружена воздухом без потерь. Нас интересует сколько она электромагнитных волн излучит в пространстве. У нас нет никаких излучений,

она окружена проводящей глиной. Токи стекают в эту глину, почву или песок и никакого излучения тут нет.

Наша задача состоит в том, чтобы токи уходили в землю. По сравнению с проводимостью земли, наш металл, не зависимо от материала из которого он изготовлен, будет считаться идеально проводящим. Мы будем говорить о потерях окружающей среды.

Цель работы: определить при каких условиях могут возникать колебательные движения.

Задачи работы:

- 1) Обзор современных методов расчета заземлителей.
- 2) Разработка цилиндрического заземлителя, погруженного в полупроводящую среду. Эквивалентная электрическая схема с сосредоточенными параметрами.
- 3) Исследование процессов распространения волн тока в заземлителе как в несимметричном вибраторе. Разработка электродинамической модели и алгоритма расчета.
- 4) Переходные процессы при импульсном воздействии. Расчет уровня и формы токов.

Новизна работы:

1. Впервые в отличие от обычного подхода получаем колебательный процесс тока.
2. Получаем для любого заземлителя, для любых параметров расчет тока.
3. Получаем возможность исследовать ток для любых импульсов.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

1.1 Общие сведения

Молния – это капризное, случайное и непредсказуемое событие. Его физические характеристики включают уровни тока, иногда превышающие 400 кА, температуры до 50000 градусов по Фаренгейту и скорости, приближающиеся к одной трети скорости света.

Молния – это разряд электрического поля, которое образовалось между облаком и землей и другими облаками. Это происходит с нарушением атмосферы в локальной области.

Удары молнии могут вызвать большие разности потенциалов в электрических системах, которые распределены вне одной защищенной структуры или здания. Большие величины тока могут течь в земле и металлическом материале в попытке выровнять потенциал. Часто в проводе между двумя изолированными точками протекают большие импульсные токи. Кроме того, удар создает большое электромагнитное поле, которое может вызывать помехи в электронных и коммуникационных сигналах.

1.2 Молниезащита

Молния встречается на разных уровнях. Система должна быть спроектирована так, чтобы справляться с типичным и большим ударом в этой области. Удары не могут быть остановлены, но энергия может быть отклонена контролируемым образом. Попытка защитить от прямых ударов может повлечь за собой чрезмерные расходы.

Молниезащита включает в себя обеспечение контролируемого пути с низким импедансом к земле для энергии, а не позволяет ей выбирать случайный путь с более высоким импедансом через структуру.

Во время удара наземная система будет насыщаться и иметь повышенный потенциал относительно окружающей территории. Повышенный потенциал

будет сохраняться до тех пор, пока переходный процесс не распространится через систему в землю.

Оборудование в области повышенных потенциалов сконфигурировано для компенсации роста потенциала. Если все электрическое оборудование связано вместе с одной и той же эффективной системой заземления, не будет разницы в потенциале между точками в системе. Однако устройства, подключенные к линиям, выходящим за пределы области равного потенциала, могут быть повреждены.

Несколько предметов влияют на вероятность удара. Частота удара молнии возрастает вместе с квадратом высоты над средней местностью. Это делает изолированные структуры особенно уязвимыми. Острые точки увеличивают вероятность удара. Сильное электрическое поле ниже заряженного облака создаст ионы в окрестности острых точек. Эти ионы увеличивают проводимость воздуха и вероятность облачного разряда (удара) [14].

Когда облако разряжается, точка удара молнии будет центром волны, которая рассеивается в земле. Волна кажется круглыми кольцами вокруг точки удара. Эти волны движутся наружу, очень похоже на рябь воды.

Скорость распространения волны соответствует скорости, с которой энергия будет рассеиваться в землю. Сопротивление почвы и индуктивности контура заземления образуют постоянную времени. Волна будет распространяться быстрее с большей площадью контакта с грунтом и более низким сопротивлением [1].

1.3 Параметры и характеристики промышленных молниеотводов

Для нейтрализации воздействия атмосферных электроразрядов используется комплекс мероприятий и оборудования, таких как молниезащита. Данные мероприятия обеспечивают безопасность людей, предотвращение разрушений и пожаров зданий, различного оборудования.

Признаком классификации зданий и сооружений является характер необходимых работ по молниезащите. Объекты делятся на три группы:

Первая категория – это опасные производственные объекты, где молния может вызвать пожары, взрывы, серьезный ущерб и смерть (в местах, где используются взрывоопасные и легковоспламеняющиеся материалы, работают электростанции и подстанции).

Вторая категория – это взрывоопасные здания и сооружения, в которых горючие и другие вещества хранятся в металлических или специальных емкостях, то есть взрыв не вызовет серьезного повреждения и пожара (хранение топлива, аммиачный холодильник, мельница).

Третья категория – объекты, которые могут быть опасны только при прямых ударах молнии от пожара и разрушения (жилые здания, детские сады, больницы, школы, трубы котельной и промышленные предприятия).

Здания производств, промышленные сооружения обеспечиваются молниезащитой, которая определяется назначением, строением и расположением предприятий. Выбор систем защиты и оборудования производится посредством специальных расчетов. Расчету подлежит количество ударов молнии, которые могут происходить каждые несколько месяцев.

Для обеспечения непосредственной защиты зданий и сооружений от ударов молний используется молниеотвод, который состоит из следующих элементов:

1. приемника, регистрирующего разряд
2. заземлителя, отводящего ток в землю
3. токоотвода, который соединяет приемник и заземляющую систему.

В случае громоотвода разряд электричества пройдет через приемник и обойдет защищаемый объект. Работа оборудования основана на высочайших конструктивных особенностях и имеет хорошо заземленный удар молнии.

Молниеотводы делят на строжневые и тросовые. Первый вариант используется чаще, и использование кабельного оборудования ограничено

узкими конструкциями или объектами со многими подземными сооружениями, которые могут помешать установке опор столбов.

Стержневые устройства могут быть:

- одиночными (антенны);
- двойными – с двумя отдельно размещенными стержнями;
- многократными – с тремя и больше стержнями, создающими общую защитную зону.

Стержневые молниеприемники имеют длину от 200 до 1500 мм, площадь сечения около 100 мм².

Кабельный громоотвод также является одиночным, состоящим из кабеля и двух поддерживающих его опор, а двойной состоит из двух одинаковых устройств одинаковой высоты, установленных параллельно.

Объекты первой категории ниже 30 м оснащаются молниеотводами, монтируемыми отдельно или непосредственно на здании, но изолированного от него. Сооружения высотой более 30 м оборудуются устройствами, установленными не изолированно на самом здании.

Объекты второго типа защищены молниеотводами, расположенными на здании. Для безопасности третьей группы конструкций используется заземление металлической кровли, которая используется в качестве молниеприемника.

Материал, используемый для изготовления молниеотвода – сталь. В качестве устройства, принимающего удары молнии, используются различные металлические конструкции: трубы, сетки и т.д., расположенные над защищаемым объектом.

1.4 Электрические характеристики почв,

Электрические свойства почвы – это параметры искусственно созданных электрических полей, которые подвержены влиянию распределения зарядов, к примеру, неорганических ионов. Данные ионы являются итогом процесса почвообразования. Электрические свойства почв очень важны для разделов

науки, таких как телекоммуникации, электротехника, геофизика и сельское хозяйство. Существуют полуэмпирические диэлектрические модели для почв, которые представляют действительную и мнимую части диэлектрической проницаемости как функцию частоты. Методы измерения для получения диэлектрических свойств грунтов описаны для разных полос частот от нескольких кГц до нескольких ГГц. Конденсаторы с параллельными пластинами широко используются для измерения диэлектрических свойств. Способ линии передачи коаксиальной линии передачи может использоваться в частотной области и временной области. Техника во временной области с линиями передачи обычно называется рефлектометрией во временной области, потому что она основана на измерении напряжения как функции времени импульсов. Метод частотной области с линиями передачи основан на измерении коэффициента отражения линии передачи. Способ линии передачи описан с короткой нагрузкой и нагрузкой разомкнутой цепи, поскольку он полезен для получения характеристического полного сопротивления и электрической проницаемости среды внутри.

Почва имеет многообразный состав, в ней содержится множество минеральных зерен. На элементах зерен образуются матрицы, минеральные и органоминеральные, состоящие из активных центров, либо кластеров. С помощью катионов, находящихся на данных матрицах, происходит нейтрализация отрицательного заряда.

Вышесказанное определяет, что почва – носитель электрического заряда. Коллоидная частица, находящаяся в почве, имеет двойной электрический слой. При наложении поля на почву возникает электрокинетический потенциал.

Электрический ток определённой силы возникает при движении ионов (зарядов), которое осуществляется с помощью движения воды в почве. Его улавливают электроды, помещенные в почву. Следовательно, почва имеет стационарное электрическое поле, которое можно измерить. На потенциал точки влияют содержание поглощенных катионов. Почвенный состав

увеличивает разность потенциалов в разных точках почвы, а высокая влажность способствует выравниванию электрического поля в почве.

Объемная плотность заряда является основным параметром, характеризующим естественное электрическое поле. Напряжение естественного поля измеряют в мВ, как разность потенциалов между двумя точками, а сопротивление почвы с использованием наложения электрического поля на почву. Обычно определяют сопротивление, которое суммирует все сопротивления неоднородного участка почвы.

Электрическое сопротивление может применяться в качестве обобщенного показателя. Основываться это может только на выявленных тесных связях его со свойствами почвы. В результате по потенциалу и удельному электрическому сопротивлению (в зависимости от конкретных условий) можно провести оценку большого спектра почвенных свойств.

Почкообразовательные процессы осуществляются с помощью распределения плотностей подвижных электрических зарядов в почвах, где каждый такой элементарный процесс будет работать на обеднение или обогащение электрическими зарядами: горизонта, части или всей толщи почвенного профиля [15-21].

1.5 Обзор современных методов расчета заземлителей

Система заземления должна учитывать низкий импеданс заземления, а также низкое сопротивление.

Разработка процедур проектирования для заземления и защиты от переходных процессов электрического оборудования основана на традиционных электрических концепциях, но применение может быть очень сложным. Каждая установка уникальна. Местоположение, доступ, почвенные условия, атмосферное взаимодействие и оборудование, подлежащее защите, влияют на проект системы защиты. Разумные решения могут быть приняты при наличии адекватной информации.

Заземлитель – это основной элемент ЗУ. Заземлитель представляет собой одиночный заземляющий электрод или группу электродов (контур заземления), находящихся в электрическом контакте с землей [2].

Для электрического соединения с землей электрических приборов, машин и устройств используют ЗУ. Данное устройство состоит из металлического электрода, находящегося под землей, а также проводника, который соединяет заземление с заземляющей частью. Заземлители – стальные трубы, вертикально забитые в землю, различные рельсы или стальные полосы и провода, которые укладываются горизонтально. Стальной трос или цепь также может быть использованы в качестве ЗУ. Электрическая система состоит из трех блоков: рабочего заземления, защитного и заземления молниезащиты. Для обеспечения безопасного заземления, путем уменьшения сопротивления проводника и выравнивания распределения потенциала в области цепи, уменьшают контактное и ступенчатое напряжения [5].

Конструкция и основные размеры заземлителей должны соответствовать указанным на рисунках ниже (рис.1.1-1.3) [3].

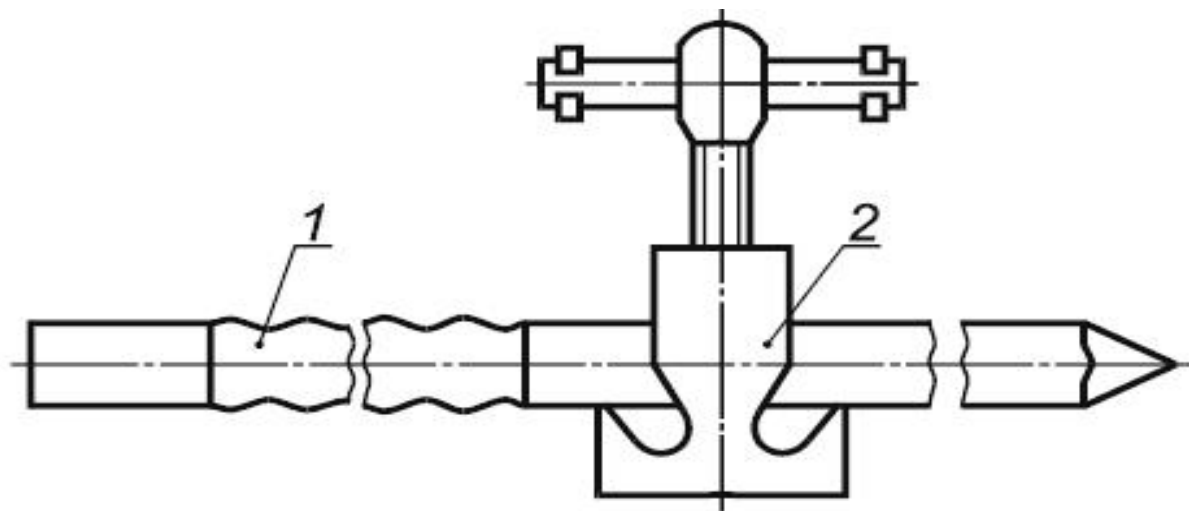


Рис.1.1. Общий вид заземлителя

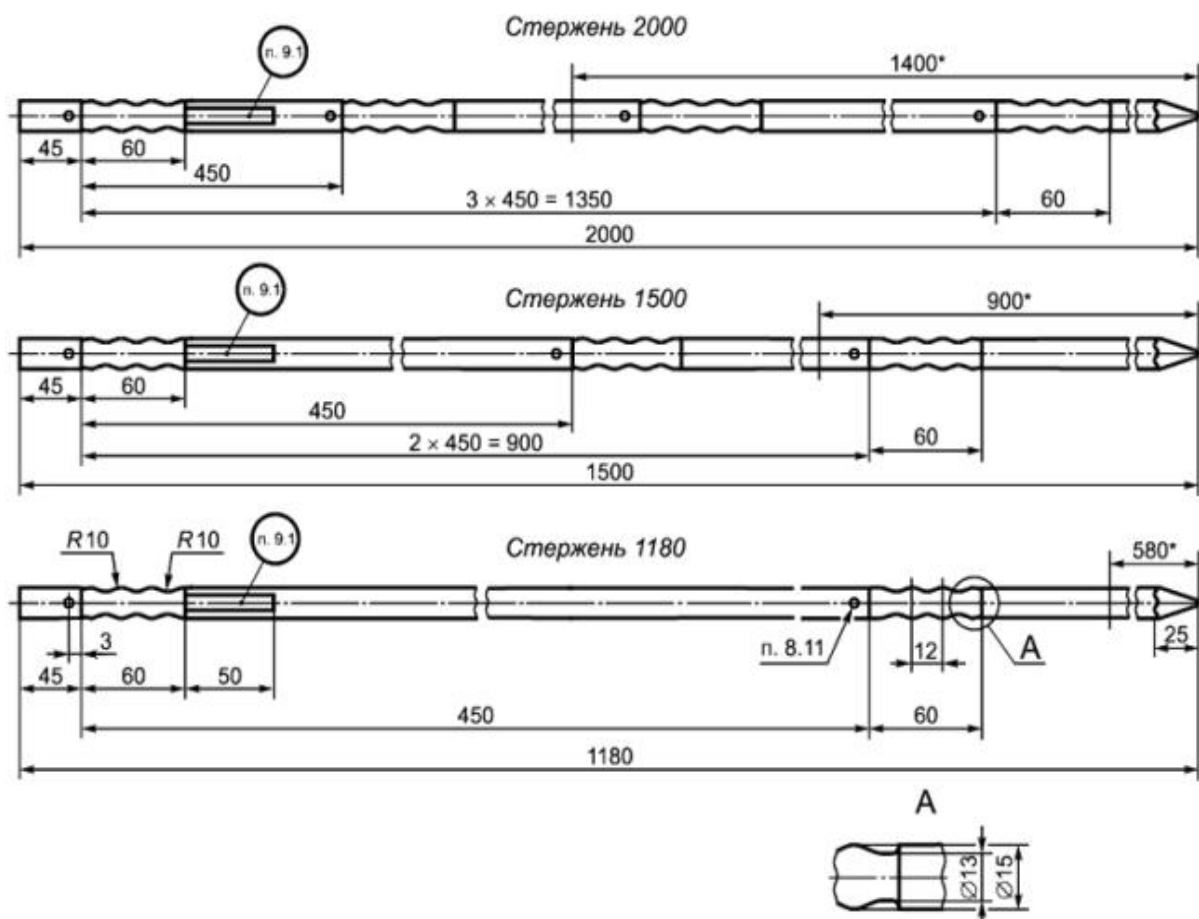


Рисунок 1.2 Стержни

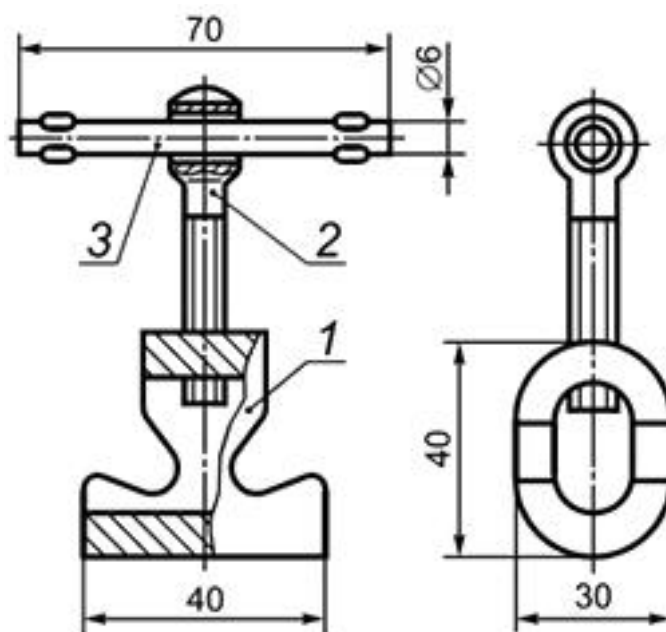


Рис. 1.3. Зажим

Для предотвращения риска, связанного с поражением электрическим током, передающимся на элементы оборудования и приборов, применяют защитное заземление. Данный вид заземления характерен намеренному заземлению непроводящих, металлических частей. Соответствующие части находятся под высоким напряжением. Задача такого заземления состоит в том, чтобы снизить напряжение относительно земли на металлических деталях, которые находятся под напряжением. Причина напряжений может быть в нарушении изоляции. Также данное заземление помогает предотвратить поражение людей током при контакте с оборудованием.

Такие элементы оборудования, как корпуса насосов, конвейеров, включателей и трансформаторов, корпуса кабельных коробок, опоры линий электропередач, осветительные устройства и другие комплектующие электрооборудования могут оказывать сильное влияние на заземление.

Защитное заземление различных электроустановок, к примеру, стационарных или передвижных достигает порядков, более, чем 1 киловатт. Общие заземляющие части машин и установок реализуется непрерывным электрическим соединением между заземляющими проводами гибкого кабеля. Через данные провода кабель соединяется с заземляющим проводником. Заземляющая цепь в автономном режиме контролирует непрерывность ее работы [6].

Конструкция общего ЗУ состоит из двух элементов: центрального и локального. Первые ЗУ базируется на главной понижающей подстанции. Конструкция, изготовленная из стальных труб, угловой и круглой стали, представляет из себя электроды, вертикально соединенные в цепь. Центральное ЗУ скрыто под землей.

Такого вида заземлители в мерзлых породах представляют собой скважину диаметров 150 – 250 миллиметров и значительно большей глубиной, которая доходит до 50 метров. Скважину наполняют мелким грунтом, таким как глина, песок, при этом перемешивая смесь с поваренной солью.

На пересечение шахтой поверхности грунта размещают отрезок трубы. К отрезку приваривают вывод заземлителя.

Верхний конец электрода, опущенный в почву, присоединяют со стальной полосой или круглой сталью, путем сваривания.

В качестве магистральных заземляющих проводов, прокладываемых на опорах воздушных линий электропередачи, рекомендуется применять для стационарных установок стальные однопроволочные и сталеалюминевые провода.

Передвижные электроустановки и пункты их электропитания, выполненные на металлическом ходу (гусеницы, колеса, лыжи, опорные базы и т.п.), имеют непосредственное соприкосновение с поверхностью грунта и представляют собой естественные заземлители, включенные параллельно искусственным заземлителям. Наибольшее сопротивление такая непрерывная сеть будет иметь в наиболее удаленной от центрального заземлителя точке, т.е. у наиболее удаленной электроустановки.

Расчет требуется для того, чтобы произвести правильный выбор параметров искусственного заземлителя, при этом ЗУ должен соответствовать требованиям электробезопасности [12].

При расчете ЗУ упор делают на значения токов замыкания на почву, либо на корпус в сетях с напряжениями порядка 6 – 10 кВ. Расчет малых токов (0,4 кВ) не учитывается в связи с тем, что такие токи замыкания на землю достаточно малы. Токи в однофазном замыкании на землю в сетях больших напряжений, рассчитываются для выбора и настройки релейной защиты однофазных замыканий. Также для определения величины допустимого сопротивления защитного заземления. Величина тока однофазного замыкания на землю в электроустановках определяется рядом факторов, из которых в качестве основных выделяются протяженность воздушных и кабельных линий, а также количество элементов подключенного электрооборудования [11].

Кроме того, ток однофазного замыкания определяется наличием заземляющего провода, высотой подвеса над землей фазных и заземляющего

проводов воздушных линий, площадью поперечного сечения и расстоянием между собой токоведущих и заземляющих проводников воздушных и кабельных линий, типом подключенных элементов электрооборудования, т.е. проводимостью относительно земли каждого из элементов электроустановки [13].

Расчет ЗУ подразумевает собой расчет заземлителя, в виду того, что заземляющие проводники принимаются по условиям механической прочности и устойчивости коррозии. Не касается это лишь конструкций с выносным ЗУ. Для них существует свой расчет. Считается последовательное сопротивление линии, сопротивление заземлителя. Результат суммарного сопротивления не должен превышать расчетное [7].

Расчет выполняется при наличие следующих характеристик:

- допустимое сопротивление распространения тока в земле;
- требования к конструкции искусственных заземлителей;
- требования к расположению вертикальных и горизонтальных заземлителей;
- величина токов замыкания.

ГЛАВА 2. ТОК В ЗАЗЕМЛИТЕЛЕ

2.1 Общие положения

2.1.1 Зависимость от времени

Гармоническая временная зависимость в электродинамике и электротехнике от времени на языке комплексных амплитуд используется в виде:

$$U(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi) = \operatorname{Re}(U_m e^{i\varphi} e^{i\omega t}) = \operatorname{Re}(\dot{U}_m e^{i\omega t}),$$

где \dot{U}_m - комплексная амплитуда;

i – мнимая единица;

$\omega = 2\pi f$ - круговая частота;

f – циклическая частота.

Это означает, что для комплексных амплитуд операция взятия производной по времени сводится просто к умножению на $i\omega$.

Для распространяющихся волн зависимость комплексных амплитуд полей расстояния R при этом выглядит таким образом:

$$\exp(-ikR),$$

мнимые части комплексной диэлектрической проницаемости и волнового числа k (характеризующие потери) должны быть меньше нуля и т.п.

Часто используют зависимость:

$$\exp(-i\omega t);$$

иногда для получения мгновенного значения берут не реальную, а мнимую часть.

Однако, при этом в электротехнике комплексное сопротивление, например, индуктивности, выглядело бы так:

$$-i\omega L.$$

Поэтому в электротехнике приходится действовать иначе. Все это создает дополнительные трудности. Для теоретиков привычен такой формат (или система Гаусса – это особенно удобно в задачах релятивистской

электродинамики). Практики в основном применяют наш формат и систему СИ.

Мы так же здесь будем применять этот подход. Для сравнения с результатами иных исследований надо в конечных формулах использовать процедуру комплексного сопряжения (т.е. везде, где встречается мнимая единица, надо менять у нее знак на противоположный)

2.1.2 Обозначения

Напряжения и ток как функции от времени будем обозначать как $u(t)$ и $j(t)$; для гармонических во времени сигналов с круговой частотой ω применяем метод комплексных амплитуд так, как отмечено ранее. Соответствующие величины обозначаем как U_m и I_m (для упрощения записи – без точек над буквами).

Постоянная распространения (волновое число) в воздухе:

$$k_0 = \frac{\omega}{c} = \frac{2\pi}{\lambda},$$

где c – скорость света в вакууме;

λ – длина волны в воздухе.

Если среда имеет относительную диэлектрическую проницаемость ε и удельную проводимость:

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0}$$

(ρ_0 – удельное сопротивление среды), то соответствующая комплексная относительная диэлектрическая проницаемость равна:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon - i\sigma}{\omega\varepsilon_0},$$

а волновое число становится комплексным и равным:

$$k = \varepsilon^{\frac{1}{2}} k_0;$$

где ε_0 – электрическая постоянная.

Заземлитель представляет собой идеально проводящий стержень – цилиндр кругового сечения длиной L радиуса a .

2.2 Задача электростатики

1) Между задачами электростатики в диэлектрике и задачами постоянных токов в полупроводящей среде (так называемыми стационарными задачами) много общего [4].

Итак, сначала электростатика. Имеем бесконечную среду с относительной диэлектрической проницаемостью ε [10].

Для точечного заряда q потенциал:

$$\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r},$$

напряженность поля:

$$E_n = -grad\varphi = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r^2}.$$

Если заряд не точечный, а равномерно распределен по поверхности сферы радиуса a , то на поверхности сферы:

$$\varphi_0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon a}, E_n^0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon a^2}.$$

Поверхностная плотность заряда:

$$\sigma = \partial_n^0 = \varepsilon\varepsilon_0 E_n^0 = \frac{q}{4\pi a^2}.$$

2) Возьмем более сложный случай – проводящий эллипсоид с зарядом q и полуосями a , b и l (рис. 2.1). Имеется проводящий стержень длиной $2L$ с зарядом q , помещенный в безграничную среду с относительной диэлектрической проницаемостью ε . Требуется определить потенциал стержня φ_0 . Точно такая задача не решается, однако в задачнике по электродинамике В.В. Батыгина и И.Н. Топтыгина под номером 194 для сильно вытянутого эллипсоида вращения с одной длинной полуосью L и двумя другими одинаковыми полуосями, равными a . Ее решение для случая $a=b=l$ приведено выше [9]. А для случая цилиндра $a=b$, $l \gg a$:

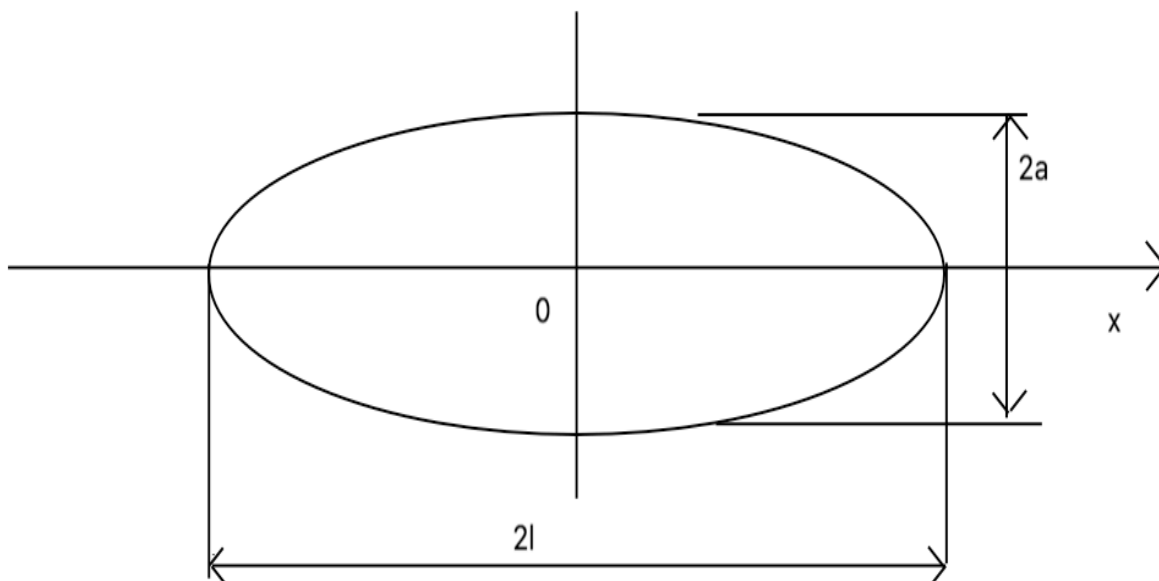


Рис. 2.1. Проводящий эллипсоид

$$\varphi_0 = \frac{q}{8\pi\varepsilon_0\varepsilon\sqrt{l^2 - a^2}} \ln \frac{l + \sqrt{l^2 - a^2}}{l - \sqrt{l^2 - a^2}} \approx \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon l} \ln \frac{2l}{a}.$$

$$\sigma(x) = \frac{q}{4\pi a^2 l \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{x^2}{l^4}}}.$$

$$\sigma(0) = \frac{q}{4\pi a l}, \sigma(l) = \frac{q}{4\pi a^2 l \sqrt{\frac{1}{a^2} + \frac{1}{l^2}}} \approx \frac{q}{4\pi a l}.$$

$$E_n^0 = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 a l}.$$

2.3 Задача постоянных токов

3) Рассмотрим такую же геометрию, но теперь среда проводящая с удельной проводимостью σ_0 (рис. 2.2), а в стержень извне по тонкому проводу втекает постоянный ток I . Предполагаем, что второй полюс источника тока подключен к бесконечно удаленной точке среды; таким образом, цепь

замкнута. С математической точки зрения эта задача аналогична предыдущей, поэтому решение описывается такой же формулой:

$$\dot{j} = \sigma_0 \vec{E}.$$

Если имеется сторонний ток I , то:

$$\varphi = \frac{I}{4\pi\sigma_0 r}, j_n = \frac{I}{4\pi r^2}.$$

Если имеем проводящую сферу радиуса a в полупроводящей среде с удельной проводимостью σ_0 , то:

$$\varphi|_{r=a} = \varphi_0 = \frac{I}{4\pi\sigma_0 a}; j_n = \frac{I}{4\pi a^2}.$$

Для вытянутого эллипсоида:

$$\varphi_0 = \frac{I}{4\pi\sigma_0 l} \ln \frac{2l}{a}; j_n = \frac{I}{4\pi a l}. \quad (2.1)$$

Из (формулы (2.1)) следует, что

$$I = \frac{4\pi\sigma_0 l}{\ln \frac{2l}{a}} \varphi_0,$$

а входное сопротивление Z :

$$Z = \frac{\varphi_0}{I} = \frac{\ln \frac{2l}{a}}{4\pi\sigma_0 l}.$$

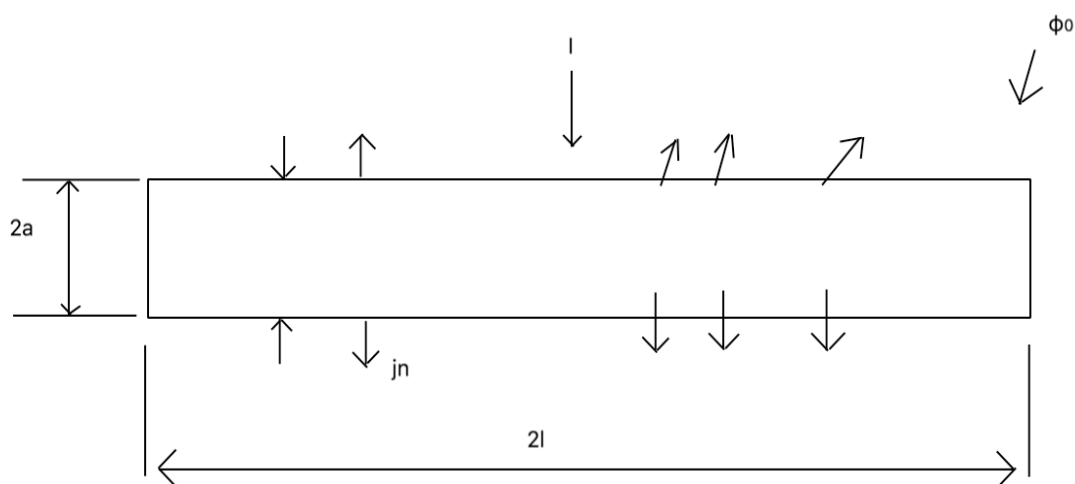


Рис. 2.2. Полупроводящая среда

Таким образом, если приложить к этому идеально проводящему стержню потенциал φ_0 (относительно бесконечно удаленной точке в полупроводящей среде с удельной проводимостью σ_0), то потечет ток I :

$$I = \frac{4\pi\sigma_0 l}{\ln \frac{2l}{a}} \varphi_0.$$

Очевидно, что если разрезать картину ровно посередине стержня перпендикулярно ему, а отрезанную часть заменить воздухом, то результат изменится ровно в два раза:

$$\varphi_0 = \frac{I}{2\pi\sigma_0 l} \ln \frac{2l}{a}.$$

Чтобы перейти к напряжениям, а не потенциалам (неизвестно, от чего отсчитанным), видоизменим задачу: над поверхностью земли параллельно ей поместим проводящую бесконечную плоскость, обладающую потенциалом, равным нулю. Тогда источник тока I , или, если угодно источник напряжения $u = \varphi_0$, будет включен между приземленным концом стержня и проводящей плоскостью.

В такой постановке сопротивление системы равно:

$$z = \frac{u}{I} = \frac{\ln \frac{2l}{a}}{2\pi\sigma_0 l}.$$

Теперь рассмотрим задачу электродинамики.

Основная проблема состоит в том, как подключить источник и что такое земля?

В статике можно говорить о потенциалах, так как эти задачи и поля потенциальные. В электродинамике основное понятие – поле.

В электродинамике и теории антенн ставится задача так: имеется проводящий стержень длиной $2l$ (рис. 2.3), радиуса a , и в середине вставляется сторонняя ЭДС:

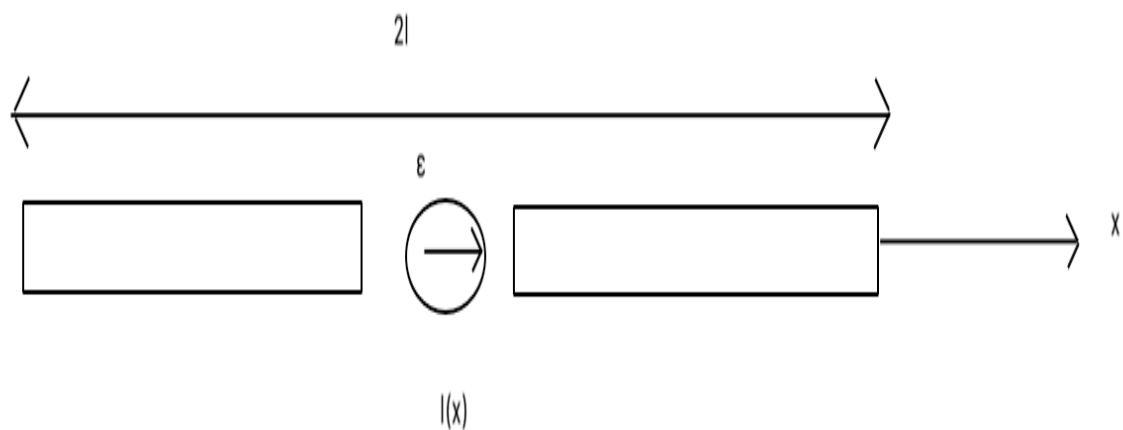


Рисунок 2.3. Проводящий стержень

Возбуждается ток $I(x)$ (текущий по поверхности), составляющего интегральное уравнение для тока из условия, что полное поле (как создаваемое ЭДС, так и возбужденным током) на поверхности стержня должно равняться нулю (граничное условие).

2.4 Эквивалентная схема

Теперь разберемся с заземлителем.

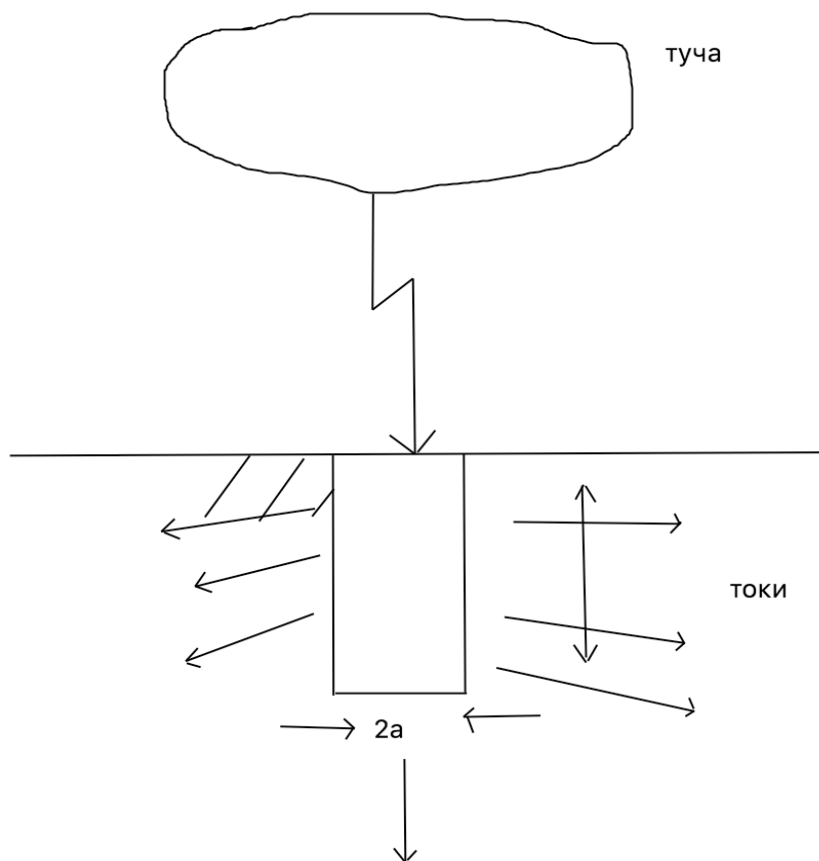


Рисунок 2.4. Заземлитель

Электротехники задают уровень и форму напряжения (потенциалы) который образуется в точке входа тока. Эквивалентная схема выглядит так:

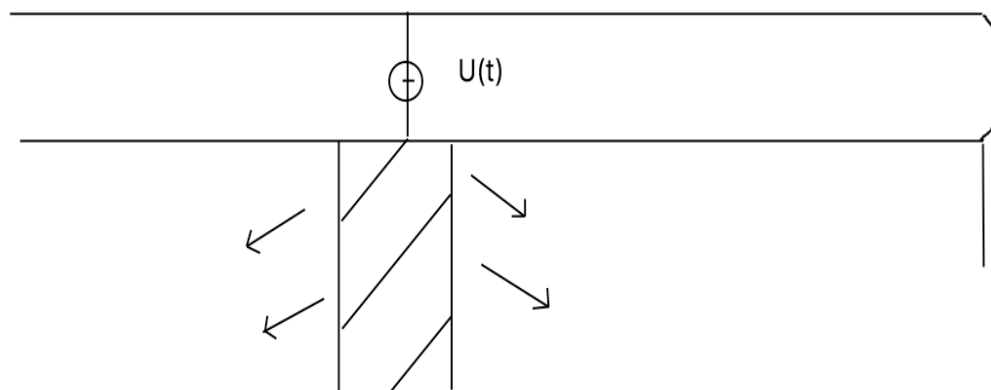


Рисунок 2.6. Эквивалентная схема

У нас получился несимметричный вибратор.

$$Z_{\text{НВ}} = \frac{\frac{\varepsilon}{2}}{I(0)} = \frac{1}{2} Z_{\text{СВ}},$$

$$Z_{\text{СВ}} = \frac{\varepsilon}{I(0)}.$$

Из симметричного вибратора, путем рассечения идеально проводящей плоскостью можно получить несимметричный. Плоскость проходит перпендикулярно оси, через точку нулевого потенциала. Любая из половин симметричного вибратора, учитывая проводящую плоскость, на практике может рассматриваться как несимметричный вибратор.

2.5 Антенная задача

Итак, рассматриваем несимметричный вибратор:

$$Z = \frac{1}{2} Z_{\text{СВ}}.$$

Из курса антенн известно (рис. 2.6) [8]:

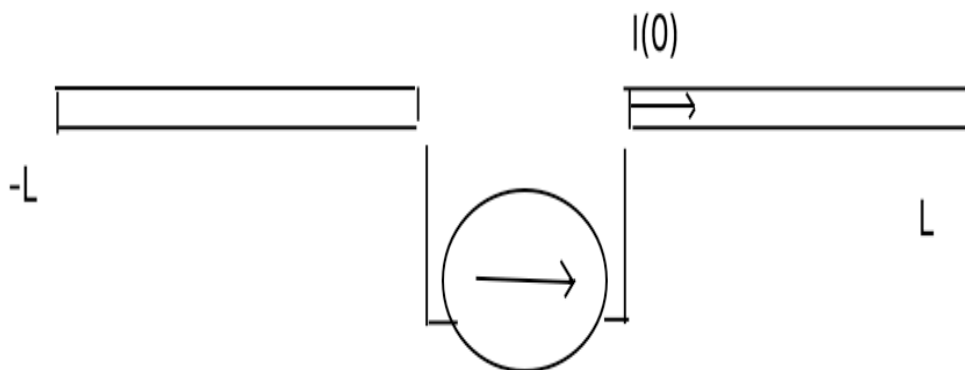


Рисунок 2.6. Вибратор

$$Z_{\text{СВ}} = R_A - iWctgkL = R_A + ix_A.$$

Для $|kL| \ll 1 \rightarrow |x_A| \gg R_A$.

Поэтому:

$$Z_{\text{СВ}} = -iWctgkL.$$

Пусть в воздухе помещен наш стержень длиной $2L$ радиуса a , в середине которого подключена гармоническая ЭДС с комплексной амплитудой U_m . Требуется определить входное сопротивление Z или входной ток

$$I = \frac{U}{Z}.$$

Строгих решений здесь нет, однако антенщики применяют здесь приближение длинной линии, тогда:

$$Z = -iWctgk_0L. \quad (2.2)$$

Такое приближение для так называемой однопроводной линии тем лучше, чем меньше электрическая длина k_0L .

Проблема, однако, состоит в том, что не очень понятно, что следует понимать под волновым сопротивлением W в этом соотношении; линия-то неоднородна по длине. В результате долгих исследований (и экспериментальных, и теоретических) принято использовать выражение (если дело происходит в воздухе):

$$W = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{\ln \frac{L}{a} - 1}{\pi} = 120 \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right).$$

Если вокруг среда с $\varepsilon \neq 1$, то:

$$W = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0 \varepsilon}} \frac{\ln \frac{L}{a} - 1}{\pi}.$$

Как видно, (в формуле (2.2)) отсутствует вещественная часть – так называемое сопротивление излучения; при малой электрической длине она существенно меньше мнимой части, а в рассматриваемой здесь задаче она тем более не будет играть никакой роли.

Если стержень окружен полупроводящей средой с комплексной относительной диэлектрической проницаемостью ε (а так же если в среде есть потери с удельной проводимостью σ), то логично ввести этот параметр (в формулу (2.2)), тогда:

$$Z = Z(\omega) = -i \frac{120}{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}} \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right) \operatorname{ctg} kL,$$

$$\text{где } k = \sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} k_0. \quad (2.3)$$

Когда имеется только половина закопанного стержня, то при подключении гармонической ЭДС точно также, как в задаче постоянных токов входное сопротивление заземлителя определится так:

$$Z(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)} = -i \frac{60}{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}} \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right) \operatorname{ctg} kL. \quad (2.4)$$

Зная $Z(\omega)$ и $U(\omega)$, можно найти ток $I(\omega)$, втекающий в заземлитель:

$$I(\omega) = \frac{U(\omega)}{Z(\omega)}. \quad (2.5)$$

Для проверки рассмотрим ситуацию, когда ω стремится к нулю (и соответственно модуль kL и $\operatorname{tg} kL$ стремятся к 0):

$$Z(\omega) = \frac{-i60}{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}} \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right) \operatorname{ctg} kL \approx \frac{-i60}{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}} \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right) \frac{c}{\omega L \sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}}.$$

Или

$$Z(\omega) = Z = \frac{U}{I} = \frac{60c\varepsilon_0}{\sigma} \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right) = \frac{\ln \frac{L}{a} - 1}{2\pi\sigma L}. \quad (2.6)$$

Сравнение с (формулой (2.3)) показывает, что здесь результат несколько меньший. Это, по-видимому, связано с тем, что в задаче постоянных токов рассматривается эллипсоид с переменным радиусом, изменяющимся от a до 0, а не цилиндр постоянного радиуса a .

2.6 Импульсный ток

2.6.1 Импульсное напряжение

Предположим, что напряжение $u(t)$ представляет собой импульс с малым фронтом по сравнению с длительностью спада.

Его формулу наиболее просто описать в виде разности двух экспонент:

$$f(t) = \exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t),$$

причем $\beta \gg \alpha$.

Так как при малых значениях аргумента $x \ll 1$ экспонента описывается следующим образом:

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6} + \dots \approx 1 - x,$$

то при $\alpha t < \beta t \ll 1$ функция будет выглядеть следующим образом:

$$f(t) = 1 - \alpha t - 1 + \beta t = (\beta - \alpha)t.$$

Это обеспечивает крутой фронт импульса в его начале. Но довольно быстро βt становится большим единицы и $e^{-\beta t}$ перестает играть какую-либо роль. Поэтому главным становится $e^{-\alpha t}$ - она и определяет медленный спад импульса (в сравнении с быстрым ростом $(\beta - \alpha)t$).

Максимум импульса в момент t_1 определяется экстремумом функции $f(t)$.

Для построения t_1 надо положить

$$f'(t) = 0, \text{ т.е. } -\alpha e^{-\alpha t} + \beta e^{-\beta t} = 0.$$

Максимальное значение импульса наступает при

$$t_1 = \ln \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)}{(\beta - \alpha)}$$

и равно

$$b = \exp\left(-\frac{\alpha \ln \frac{\beta}{\alpha}}{\beta - \alpha}\right) - \exp\left(-\frac{\alpha \ln \frac{\beta}{\alpha}}{\beta - \alpha}\right).$$

Время t_1 следует считать длительностью фронта импульса.

Понятно, что импульс тянется теоретически до бесконечности. Поэтому задается уровнем падения его от максимума в какой-то момент времени, например в 2 раза.

Т.е.:

$$f(t_2) = \frac{1}{2} f(t_1) = \frac{1}{2} b.$$

Или:

$$e^{-\alpha t_2} - e^{-\beta t_2} = \frac{1}{2} b.$$

В принципе, задавшись значением t_1 и t_2 , можно найти параметры импульса α и β . Однако, решение не простое, т.к. уравнение тригонометрическое. Поэтому будем использовать приближения.

Итак, возьмем задачи $t_1 = 10^{-5}$ сек, $t_2 = 2 \cdot 10^{-4}$ сек = $50t_1$.

Предположим, что $\beta \gg \alpha$.

Тогда:

$$t_1 = \ln \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)}{(\beta - \alpha)} \approx \ln \frac{\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)}{\beta}.$$

Величина $\ln \frac{\beta}{\alpha}$ также будет большой, поэтому при $t = t_1$:

$$e^{-\beta t_1} = e^{-\frac{\beta \ln \frac{\beta}{\alpha}}{\beta}} \approx e^{-\frac{\beta \ln \frac{\beta}{\alpha}}{\beta}} \approx e^{-\ln \frac{\beta}{\alpha}} \ll 1.$$

Поэтому:

$$b \cong e^{-\frac{\alpha \ln \frac{\beta}{\alpha}}{\beta - \alpha}} \approx e^{-\frac{\ln \frac{\beta}{\alpha}}{\frac{\beta}{\alpha}}}.$$

Т.к. $\frac{\beta}{\alpha} \gg 1$, то:

$$-\frac{\ln \frac{\beta}{\alpha}}{\frac{\beta}{\alpha}} \ll 1 \text{ и } b \cong 1 - \frac{\alpha}{\beta} \ln \frac{\beta}{\alpha} \approx 1.$$

Итак, если:

$$f(t_2) = \frac{1}{2} b \approx \frac{1}{2},$$

то:

$$e^{-\alpha t_2} - e^{-\beta t_2} \approx e^{-\alpha t_2} = \frac{1}{2},$$

$$\alpha t_2 = \ln 2 \approx 0,7.$$

Тогда:

$$\alpha t_2 = \alpha t_1 \frac{t_2}{t_1} = \alpha t_1 \cdot 50 = 0,7.$$

$$\alpha t_1 = \frac{0,7}{50} \approx 0,014;$$

$$\alpha = \frac{0,014}{t_1} = \frac{0,014}{10^{-5}} = 1400.$$

Итак:

$$\alpha t_1 = \frac{\alpha}{\beta} \ln \frac{\beta}{\alpha} = \frac{\ln \frac{\beta}{\alpha}}{\frac{\beta}{\alpha}} = 0,014.$$

Последняя запись – это граничные уравнения относительно величины $\frac{\beta}{\alpha}$.

Его решение:

$$\frac{\beta}{\alpha} \approx 400.$$

Тогда:

$$\beta = 400\alpha = 560000.$$

Итак:

$$\text{при } t_1 = 10 \text{ мксек} = 10^{-5} \text{ сек},$$

$$t_2 = 500 \text{ мксек} = 50t_1, \text{ при } f(t_2) = \frac{1}{2}f(t_1),$$

где:

$$f = f(t_1) \cong 1, f(t_2) = \frac{1}{2},$$

получаем:

$$\alpha = 1400 \text{ сек}^{-1}, \beta = 560000 \text{ сек}^{-1},$$

$$f(t) = e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}.$$

$f(t)$ - это нормированный импульс напряжения, где $f = b \approx 1$. А вообще задается максимальное значение напряжения U_{max} .

Задавшись величиной максимального значения напряжения U_{max} , получим выражение для импульсного напряжения, создающего ток в заземлителе:

$$u(t) = \frac{U_{max}}{b} \exp(-\alpha t) - \exp(-\beta t).$$

2.6.2 Спектры сигналов. Восстановление функции $i(t)$

Для получения $I(\omega)$ (по формуле (2.4)) найдем спектральную функцию $U(\omega)$ с помощью преобразования Фурье:

$$U(\omega) = \int_0^{\infty} u(t) \exp(-i\omega t) dt = \frac{U_{max}}{b} \frac{\beta - \alpha}{\alpha\beta - \omega^2 + i\omega(\alpha + \beta)}.$$

Временная функция тока:

$$j(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} I(\omega) e^{i\omega t} d\omega = \frac{1}{\pi} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \frac{U(\omega) e^{i\omega t} d\omega}{Z(\omega)}.$$

Тогда, применив обратное преобразование Фурье (к формуле (2.5)), получим:

$$j(t) = \frac{(\beta - \alpha)U_{max}}{60\pi b(\ln \frac{L}{a} - 1)} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} \operatorname{tg} \left(\sqrt{\varepsilon - \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} \frac{\omega}{c} L \right) d\omega}{[\alpha\beta - \omega^2 + i\omega(\alpha + \beta)]}.$$

Т.к.

$$\operatorname{tg} x = \frac{\sin x}{\cos x} = \frac{\frac{e^{ix} - e^{-ix}}{2i}}{\frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}} = -i \frac{e^{ix} - e^{-ix}}{e^{ix} + e^{-ix}} = -i \frac{1 - e^{-i2x}}{1 + e^{-i2x}},$$

то получаем следующую формулу:

$$j(t) = \frac{(\beta - \alpha)U_{max}}{120\pi b(\ln \frac{L}{a} - 1)} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} [1 - \exp(-i2kL)] \exp(i\omega t) d\omega}{[\alpha\beta - \omega^2 + i\omega(\alpha + \beta)][1 + \exp(-i2kL)]}.$$

Или:

$$j(t) = \frac{(\beta - \alpha)U_{max}}{60\pi b(\ln \frac{L}{a} - 1)} \operatorname{Re} \int_0^{\infty} \frac{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}} [1 - \exp(-i2kL)] \exp(i\omega t) d\omega}{[\alpha\beta - \omega^2 + i\omega(\alpha + \beta)][1 + \exp(-i2kL)]}.$$

Этот интеграл считается приближенно численно.

2.7 Колебательные процессы

Когда возможны колебательные процессы в рассматриваемой системе? Вся физика определяется особенностями подинтегральной функции в выражении для тока:

$$j(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{U(\omega)d\omega}{Z(\omega)}$$

Предположим, что спектр напряжения $U(\omega)$ содержит достаточно высокие частоты, позволяющие возбудить эти колебания. Для этого фронты напряжения $u(t)$ должны быть достаточно малыми. Итак, особенности в – это частоты, при которых $Z(\omega)$ обращается в 0. К сожалению, здесь нет чистых полюсов подинтегральной функции; тогда можно было бы получить относительно простые выражения для тока. Приходится иметь дело с квадратными корнями, где есть точки ветвления и т.д.

Будем искать значения ω , пусть и комплексные, из уравнения

$$Z(\omega) = -i \frac{60}{\sqrt{\varepsilon - i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0}}} \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right) ctgkL = 0.$$

Или

$$-ictgkL = \frac{1 + \exp(-i2kL)}{1 - \exp(-i2kL)} = 0.$$

Один из корней (для наименьших по модулю значений комплексной частоты) – это: $2kL = \pi$. Подставляя сюда выражения для k_0 , ε и оставляя в стороне несложные математические преобразования, найдем значение для корня:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} + i\alpha,$$

где $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{\pi c}{2\sqrt{\varepsilon}L}$, $\alpha = \frac{\sigma}{2\varepsilon\varepsilon_0}$.

Форма колебаний во времени:

$$i(t) = \exp(-\alpha t) \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} t),$$

очень похожая на свободные колебания в последовательном контуре. Очевидно, что при $\omega_0 < \alpha$ режим будет апериодическим. Возвращаясь к нашей

задаче, заметим, что в колебательном режиме (при $\sigma \ll \frac{\sqrt{\varepsilon}}{120L}$) для $L=15$ м и $\varepsilon=3$ частота колебаний f_0 составляет примерно 3 МГц, а период $T=1/f_0=0.3$ мксек; при этом $s \ll 0.001$ См/м, а удельное сопротивление грунта должно быть существенно больше 1000 Ом*м.

Очевидно, что фронт импульса напряжения должен составлять доли мкс.

ГЛАВА 3. ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

3.1 Программа

Для построения графиков в среде fortran была разработана программа, приведенная ниже:

```

j=cmplx(0.,1.)
t1=dalog(beta/alfa)
t1=t1/(beta-alfa)
b=dexp(-alfa*t1)-dexp(-beta*t1)
delt=tmaximp/nt
do 10 mt=1,nt
print *,m
t=delt*mt
f=dexp(-alfa*t)-dexp(-beta*t)
f=f/b
tt=t*1000.
write(2,1)tt,f
10  continue
1  format(2(1x,e11.4))
aa=60.*pi*b*(dalog(L/a)-1.)
bb=(beta-alfa)*umax/aa
ommax=10.*dsqrt(alfa*beta)
delt=tmax/nt
do 20 mt=1,nt
t=mt*delt
tt=t*1000.
delom=.1/t
n=int(ommax/delom)
e1=cmplx(0.,0.)

```

```

do 30 m=1,n
omega=delom*(m-.5)
eps=eps1-j*sigma*1.e12/(omega*8.85)
k=omega*eps/3.e8
e2=cdexp(-j*2.*k*L)
e3=cdexp(j*omega*t)
e4=alfa*beta-omega**2+j*omega*(alfa+beta)
e5=e4*(1.+e2)
e5=eps*(1.-e2)*e3/e5
e1=e1+e5
30  continue
e1=e1*bb*delom
cc=real(e1)
write(3,1)tt,cc
20  continue
stop
end

```

3.2 Построение графиков

3.2.1 График импульса напряжения

Для параметров земли, геометрии и т.п., характеристики которых приведены ниже, построен график импульса напряжения (рис. 3.1):

- 500 - nt - число отсчетов по времени;
- 15000. - alfa (1/сек) - первый параметр импульса напряжения;
- 6.e6 - beta (1/сек) - второй параметр импульса напряжения;
- 2.e-4 - tmax (сек) - максимальное время просмотра тока;
- 1.e-3 - tmaximp (сек) - конец отсчета времени для просмотра импульса напряжения;
- 2.e5 - umax (В) - максимальное значение напряжения;
- 3. - eps1 - относительная диэлектрическая проницаемость земли;

$1 \cdot 10^{-3}$ - σ (См/м) - удельная проводимость земли;

.05 - a (м) - радиус заземлителя;

15.- L (м) - длина заземлителя.

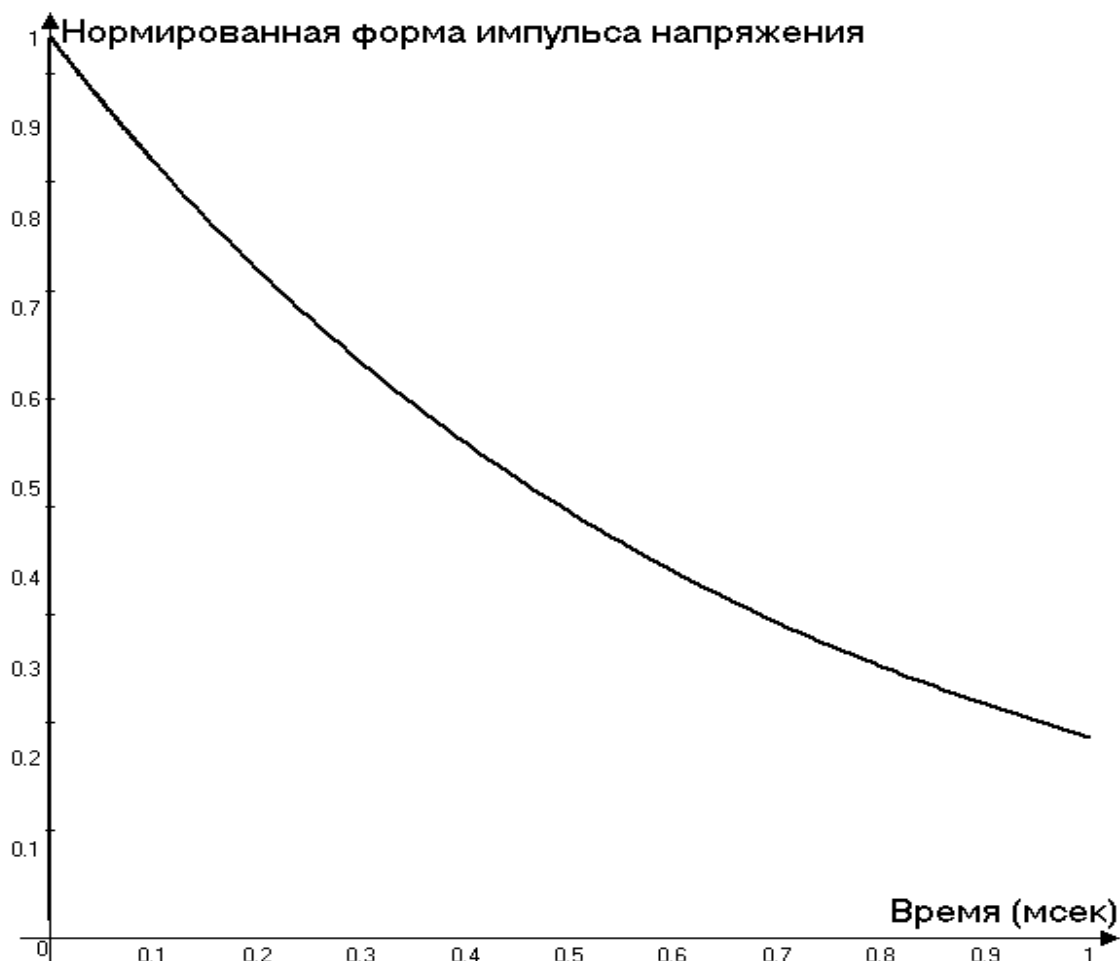


Рисунок 3.1. Импульс напряжения

3.2.2 Графики тока

Для импульса напряжения (рис. 3.1) и параметров земли, геометрии и т.п., характеристики которых приведены ниже, построен график тока (рис. 3.2):

500 - nt - число отсчетов по времени;

15000. - α (1/сек) - первый параметр импульса напряжения;

$6 \cdot 10^{-6}$ - β (1/сек) - второй параметр импульса напряжения;

$2 \cdot 10^{-4}$ - t_{\max} (сек) - максимальное время просмотра тока;

1.e-3 - t_{maximp} (сек) - конец отсчета времени для просмотра импульса напряжения;

2.e5 - u_{max} (В) - максимальное значение напряжения;

3. - ϵ_{ps1} - относительная диэлектрическая проницаемость земли;

1.e-3 - σ (См/м) - удельная проводимость земли;

.05 - a (м) - радиус заземлителя;

15.- L (м) - длина заземлителя.

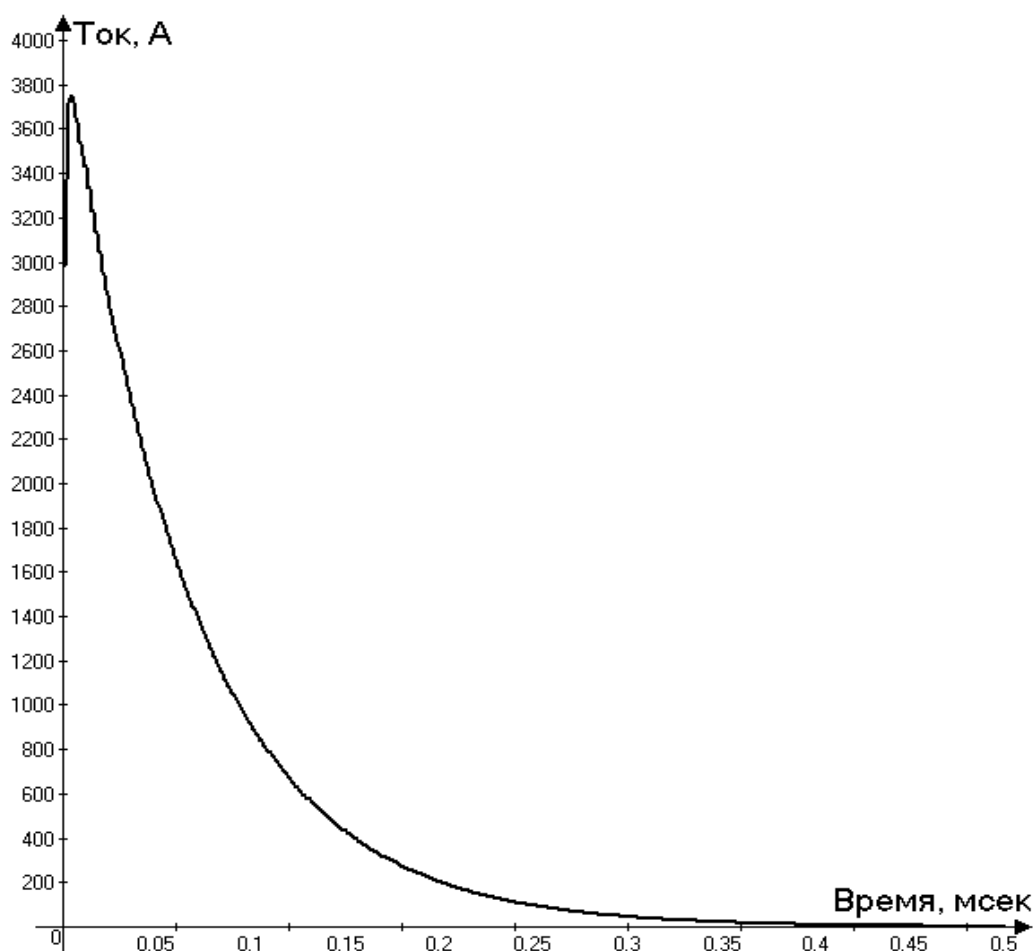


Рисунок 3.2. График тока

Параметры системы остались следующие $L=15$ м, $a=5$ см, ϵ грунта равно 3. Представлен график тока (рис. 3.3) для $s=0.001$ См/м и длительности фронта импульса напряжения, равной 1 мсек. При таких параметрах альфа и бета – импульс тока аperiodический. Параметры построения графика следующие:

- 500 - nt - число отсчетов по времени;
15000. - α (1/сек) - первый параметр импульса напряжения;
- 6.e6 - β (1/сек) - второй параметр импульса напряжения;
- 5.e-4 - t_{\max} (сек) - максимальное время просмотра тока;
- 1.e-5 - $t_{\max imp}$ (сек) - конец отсчета времени для просмотра импульса напряжения;
- 2.e5 - u_{\max} (В) - максимальное значение напряжения;
3. - ϵ_{s1} - относительная диэлектрическая проницаемость земли;
- 1.e-3 - σ (См/м) - удельная проводимость земли;
- .05 - a (м) - радиус заземлителя;
- 15.- L (м) - длина заземлителя.

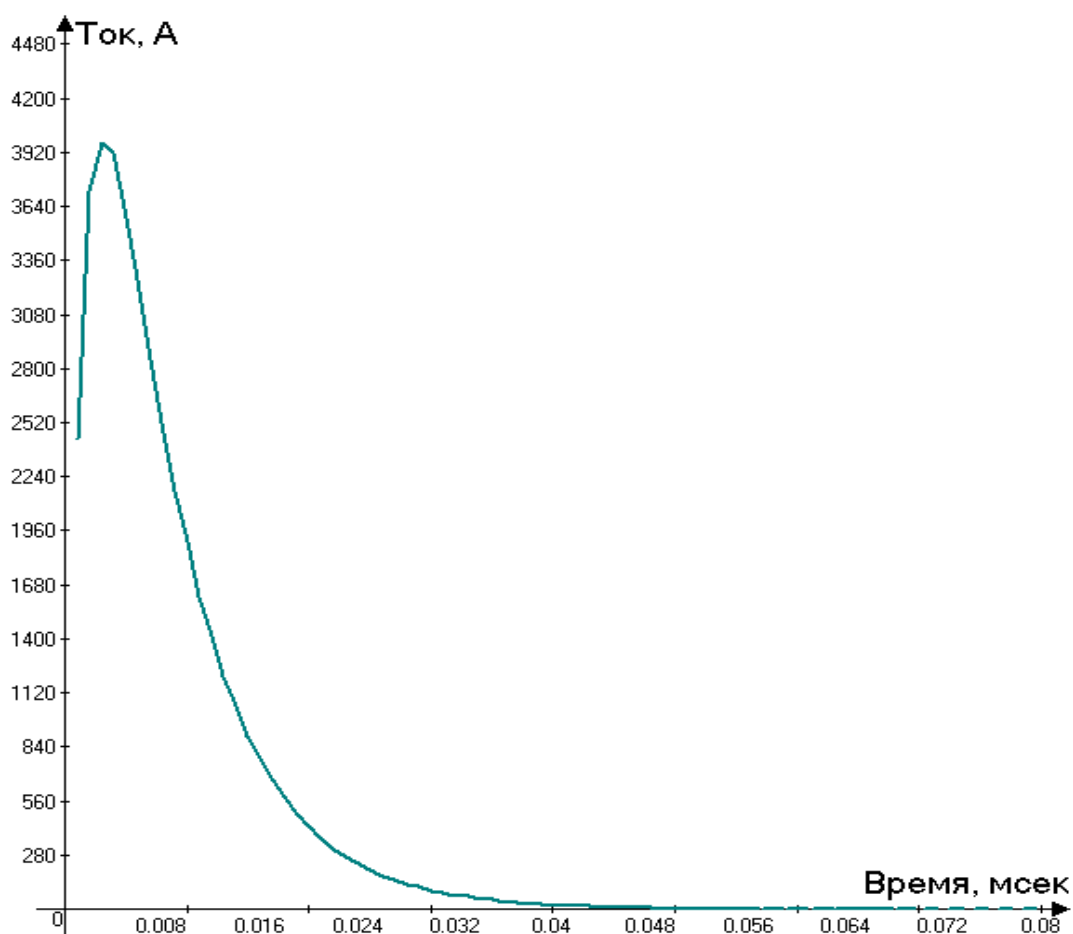


Рисунок 3.3. График тока

Отличие данных для графика тока ниже (рис. 3.4) (приведены ниже) по сравнению с предыдущим вариантом заключается в том, что удельная проводимость грунта снижена. Здесь заметны затухающие колебания с квазипериодом, примерно равным 0.3 мксек, что соответствует теории.

500 - n_t - число отсчетов по времени;

150000. - α (1/сек) - первый параметр импульса напряжения;

6.e7 - β (1/сек) - второй параметр импульса напряжения;

3.e-6 - t_{\max} (сек) - максимальное время просмотра тока;

2.e-6 - $t_{\max \text{imp}}$ (сек) - конец отсчета времени для просмотра импульса напряжения;

2.e5 - u_{\max} (В) - максимальное значение напряжения;

3. - ϵ_{s1} - относительная диэлектрическая проницаемость земли;

1.e-4 - σ (См/м) - удельная проводимость земли;

.05 - a (м) - радиус заземлителя;

15.- L (м) - длина заземлителя.

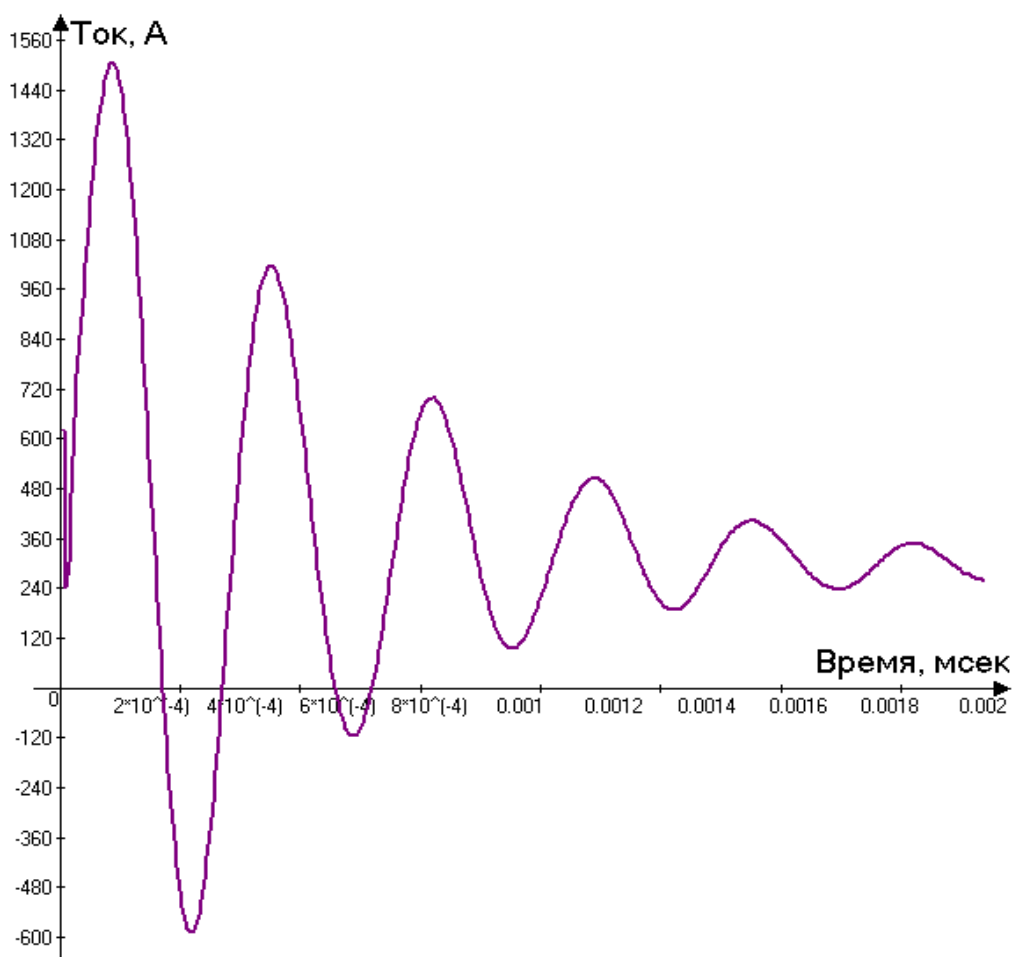


Рисунок 3.4. График тока

Для графика тока (рис. 3.5) параметры следующие:

- 500 - n_t - число отсчетов по времени;
- 150000. - α (1/сек) - первый параметр импульса напряжения;
- 6.e7 - β (1/сек) - второй параметр импульса напряжения;
- 3.e-6 - t_{max} (сек) - максимальное время просмотра тока;
- 1.e-3 - t_{maximp} (сек) - конец отсчета времени для просмотра импульса напряжения;
- 2.e5 - u_{max} (В) - максимальное значение напряжения;
- 3. - ϵ_{ps1} - относительная диэлектрическая проницаемость земли;
- 5.e-5 - σ (См/м) - удельная проводимость земли;
- .05 - a (м) - радиус заземлителя;
- 15.- L (м) - длина заземлителя.

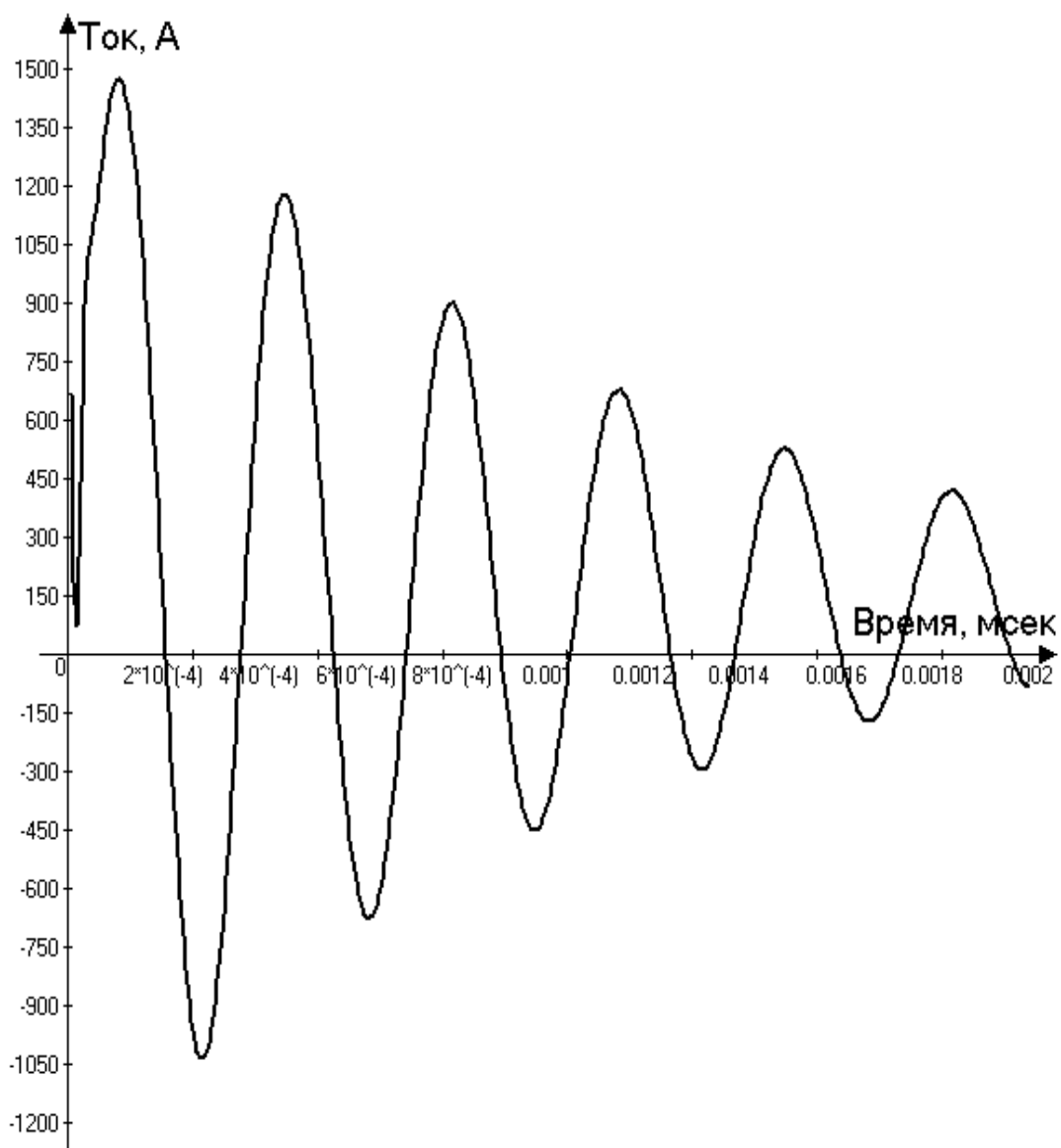


Рисунок 3.5. График тока

Наконец, ниже (рис. 3.6) представлен график при тех же условиях, однако при длительности фронта импульса напряжения, увеличенном в 10 раз – до 15 мксек:

500 - nt - число отсчетов по времени;

1500000. - α (1/сек) - первый параметр импульса напряжения;

6.e8 - β (1/сек) - второй параметр импульса напряжения;

3.e-6 - tmax (сек) - максимальное время просмотра тока;

1.e-3 - tmaximp (сек) - конец отсчета времени для просмотра импульса напряжения;

- 2.e5 - U_{max} (В) - максимальное значение напряжения;
- 3. - ϵ_{ps1} - относительная диэлектрическая проницаемость земли;
- 5.e-5 - σ (См/м) - удельная проводимость земли;
- .05 - a (м) - радиус заземлителя;
- 15.- L (м) - длина заземлителя.

При этом на резонансной частоте системы уровень задающего сигнала существенно уменьшился. Это привело к уменьшению размаха тока в несколько раз.

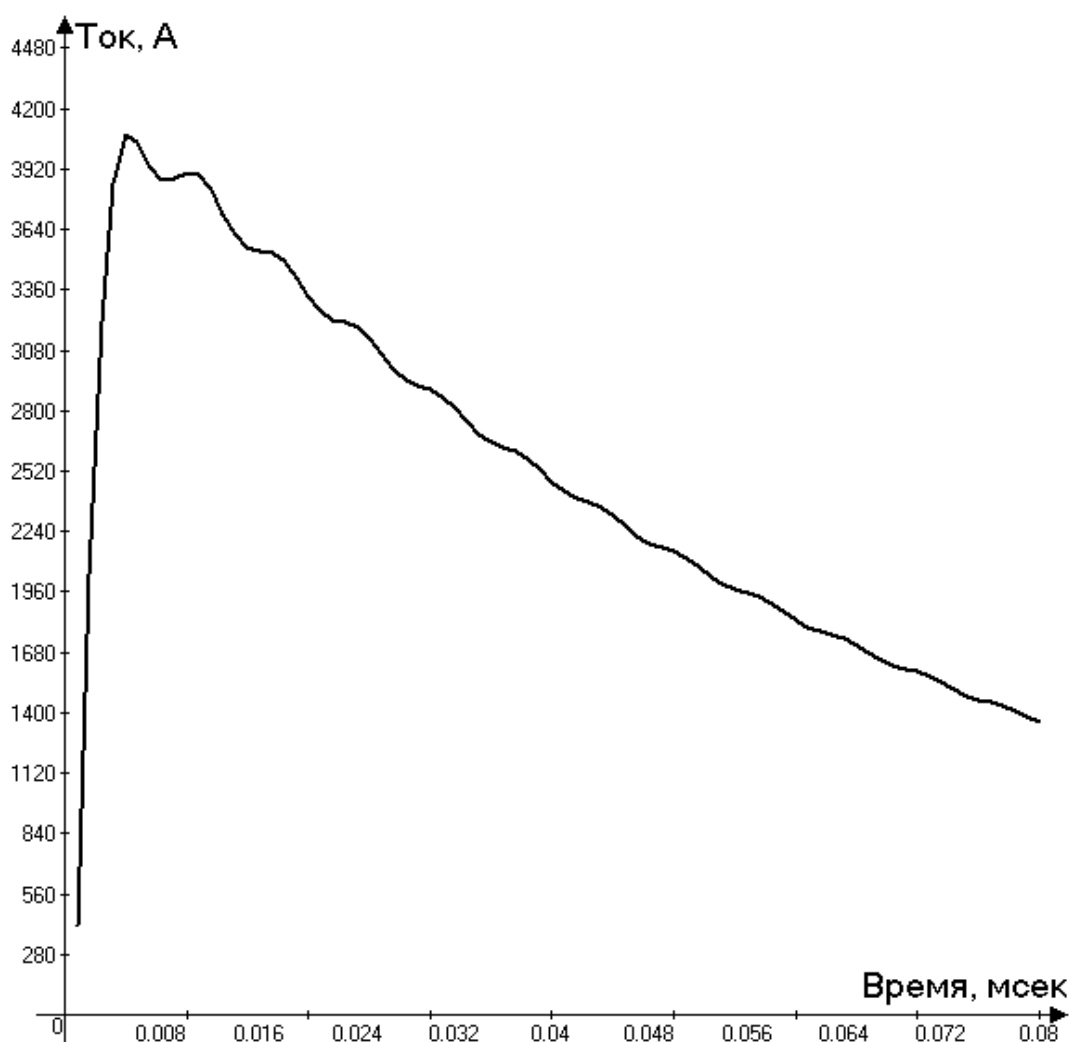


Рисунок 3.6. График тока

Если фронт импульса напряжения еще уменьшить, то форма колебаний может отличаться от синусоидальной.

3.3 О характере $Z(\omega)$

При $\omega=0$ сопротивление чисто активное и определяется соотношением (в формуле (2.6)). Если частоты невелики (или длина L небольшая), когда модуль kL существенно меньше единицы, величина Z имеет емкостной характер и представляет собой параллельное соединение емкости и активного сопротивления:

$$\frac{1}{Z(\omega)} = Y(\omega) = g + ib = \frac{2\pi L \sigma}{\ln \frac{L}{a}} + i\omega \frac{2\pi L \epsilon \epsilon_0}{\ln \frac{L}{a}}.$$

Напротив, если модуль мнимой части kL значительно больше единицы, т.е. $\text{ctg}kL$ стремится к единице, величина Z определяется выражением:

$$Z(\omega) = \frac{120 \left(\ln \frac{L}{a} - 1 \right)}{\sqrt{\epsilon - i \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0}}}.$$

Действительно, мнимая часть этого выражения больше 0, однако зависимость ее от частоты (как, впрочем, и вещественная часть) имеет странный характер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе объектом исследования были процессы тока в заземлителе. Мы применили радиофизический подход. Мы использовали аппарат антенн и исследовали при каких параметрах почвы, размерах возникает колебательный процесс.

Все это полезно для тех, кто разрабатывает заземлители и занимается созданием молниеотводов. Это дает возможность воспользоваться результатом формул для исследования тока для любых импульсов, параметров заземлителей, земли и т.д.

В ходе работы по поставленной задаче, были рассмотрены современных методы расчета заземлителей.

Была получена модель цилиндрического заземлителя, погруженного в полупроводящую среду.

Исследован процесс распространения волн тока в заземлителе как в несимметричном вибраторе. Разработана электродинамическая модель и алгоритм расчета.

Рассмотрены переходные процессы при импульсном воздействии. Рассчитаны уровни и формы токов.

Были получены аналитически формулы тока, на основе представления заземлителя как электрического вибратора, погруженного в среду.

Показано, что колебательные процессы можно представить как аналог колебательного контура.

Данные, полученные в этой работе можно использовать в следующих случаях:

1. Когда система очень сложная – много горизонтальных проводящих проводов стоят в разных местах и т.д. Может быть не 1 заземлитель, а 2 и более.

2. Когда спадающий импульс тока, то все понятно. Электротехники часто для ограничения тока ставят ограничительные диоды, которые не позволяют

каким-то токам переключаться. У них сложные системы, силовые. Когда возникают немонотонные системы, не просто снижается, а ходит «туда-сюда», они хотят узнать при каких условиях это происходит и что в данном случае нужно делать.

3. С помощью формул можно определить какие проводимости когда возникают, на какой длине и каких частотах.

4. Так же это вызывает большой интерес. Как можно было ожидать, что молния будет такой непериодической. Связано это с заземлителем, с его длиной в первую очередь. Мы эквивалентную схему представляем в виде резонансного контура.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Боронин В.Н., Коровкин Н.В., Кривошеев С.И., Шишигин С.Л., Миневиц Т.Г. Нетреба К.И. Математическое моделирование заземляющих устройств при действии импульсных токов // Изв. Рос. акад. наук. Энергетика. 2013. № 6. С. 8089.
2. Бургсдорф В.В., Якобе А.И. Заземляющие устройства электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
3. ГОСТ 16556-2016 Заземлители для передвижных электроустановок. Общие технические условия.
4. Демирчян, К.С. Теоретические основы электротехники. Учебник для вузов. 5-е изд. Том 2 / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин. - Санкт-Петербург: Питер, 2009. – 432 с.
5. Заземляющие устройства электроустановок (требования нормативных документов, расчет, проектирование, конструкции, сооружение): справочник / Р.К. Борисов и др. — М.: Издательский дом МЭИ, 2013. - 360 а
6. Карякин Р.Н. Заземляющие устройства электроустановок: справочник / Р.Н. Карякин. – М.: Энергосервис, 2002. – 218 с.
7. Коровкин, Н.В. Расчетные методы в теории заземления. Научно-технические ведомости СПбГПУ / Н.В. Коровкин, С.Л. Шишигин // Изд-во СПбГПУ. Вып. 1(166). - 2013. - С.74-79.
8. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ – Москва – 1988 – 434 с.
9. Топтыгин И.Н. Современная электродинамика – Москва-Ижевск – 2002 – 763 с.
10. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнение математической физики – 1963 – 742 с.
11. Черепанов, А.В. Расчет заземлителей с учетом частотной зависимости удельного сопротивления грунта / А.В. Черепанов, С.Л. Шишигин // Труды 4 всерос. науч. техн. конф. «Техно-ЭМС 2017»., М. – 2017. – С.110 – 112.

12. Шишигин, С.Л. Математические модели и методы расчета заземляющих устройств / С.Л. Шишигин // *Электричество*. - 2010. - №1. - С.16-23.
13. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А.Ф. Дьяков, И.П. Кужекин, Б.К. Максимов, А.Г. Темников; под ред. А.Ф. Дьякова. - Москва: Изд. дом МЭИ, 2009. - 455 с.
14. Якушева, Ю. С. Грозозащита и заземление. Молниеотводы, грозозащитные тросы и разрядники // *Актуальные проблемы энергетики : материалы 70-й научно-технической конференции студентов и аспирантов / Белорусский национальный технический университет, Энергетический факультет. Секция 2: Электрические системы*. – Минск : БНТУ. — 2014. — С. 104 – 105.
15. Akbari M., Sheshyekani K., Alemi M. R. The effect of frequency dependence of soil electrical parameters on the lightning performance of grounding systems. // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. — 2013. — vol. 55, N 4. — P. 739-746.
16. Cavka D., Mora N., Rachidi F. A comparison of frequency-dependent soil models: application to the analysis of grounding systems. // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. — 2014. — vol. 56, N 2. — P. 177-187.
17. Kherif O., Chiheb S., Teguar M., Mekhaldi A. Time-Domain modeling of grounding systems impulse response incorporating nonlinear and frequency-dependent aspects. // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. — 2018. — vol.60, N 4 — P. 907-916.
18. Sekioka S. Frequency and current-dependent grounding resistance model for lightning surge analysis. // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. — 2018. — vol.60, N 4. — P.907-916.
19. Visacro S., Rosado G. Response of Grounding Electrodes to Impulsive Currents: An Experimental Evaluation. // *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*. — 2009. — vol. 51, N 1. — P.161-164.
20. Visacro, S. HEM: A Model for Simulation of Lightning-Related

Engineering Problems / S. Visacro, A. Soares // IEEE Transactions On Power Delivery. - Vol. 20, No. 2. - April 2005. - P.1206-1208.

21. Zhou W., Liu Y., Li G., Yan G., Yang S., Li H., Su C. Q. Power Frequency Interference and Suppression in Measurement of Power Transmission Tower Grounding Resistance. IEEE Trans. Power Delivery, 2015, Vol.30, No.2, P.1016-1023.