

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого»

На правах рукописи

ПЕТРОВ Николай Николаевич

**Электромагнитные переходные процессы на линиях электропередачи,
вызванные близкими ударами молнии**

Направление подготовки 13.00.00 Электро- и теплотехника
Направленность 2.4.3 Электроэнергетика

Научный доклад
об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

Автор работы: аспирант
Петров Николай Николаевич
Научный руководитель: доктор
технических наук, профессор
Евдокунин Георгий Анатольевич

Санкт-Петербург – 2022

Научно-квалификационная работа выполнена в Высшей школе электроэнергетических систем Института энергетики федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Директор ВШ: Зверев Сергей Геннадьевич
кандидат технических наук, доцент
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Научный руководитель: Евдокунин Георгий Анатольевич
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

Рецензент: Коровкин Николай Владимирович
доктор технических наук, профессор
Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте библиотеки по адресу: <https://elib.spbstu.ru/>

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Молния представляет собой кратковременный и интенсивный электрический разряд, длина пути которого превышает несколько километров. Разряды молнии создают опасные электромагнитные поля, которые наводят токи и напряжения на проводящих объектах. Большие пиковые значения и высокие скорости изменения наведенного напряжения могут вызывать неисправность или даже разрушение чувствительного электрического и электронного оборудования, используемого в области электроэнергетики, сфере информационных технологий и других отраслях. Молниезащита чувствительного силового и телекоммуникационного оборудования считается важной темой электромагнитной совместимости (ЭМС). Поэтому инженерам по ЭМС необходимо иметь детальное представление о молнии и ее электромагнитных полях, чтобы разрабатывать надежные системы защиты от потенциальных угроз.

Наиболее распространенным типом разрядов молнии с облаков на землю являются нисходящие отрицательные вспышки молнии. Они также являются основной причиной повреждения силовых и коммуникационных аппаратов и электрических систем. Восходящий ток молнии с поверхности земли или ток обратного разряда в основном вызывают большую часть повреждений, причиняемых молнией.

Соответствующие схемы защиты, основанные на методах экранирования и заземления, широко применяются для снижения риска отказа оборудования из-за ударов молнии. В обоих случаях эффективная схема защиты требует точной оценки электромагнитных полей, которые возникают в случае удара молнии вблизи защищаемого оборудования. Это требует реализации математической модели с минимальным количеством настраиваемых параметров, что позволит инженеру по ЭМС определить подходящие схемы защиты.

Актуальность. Удары молнии наносят серьезный технический и экономический ущерб объектам электроэнергетики. Вопросы защиты высоковольтных воздушных линий от прямых ударов молнии хорошо изучены, также разработано и внедрено защитное оборудование от перенапряжений в электрических сетях. Однако силовое оборудование низких и средних классов напряжений редко повреждается прямыми ударами, так как оно защищено более высокими объектами, но оно может быть в опасности из-за наведенного напряжения при не прямых ударах молнии. Вопросы защиты этого оборудования от не прямых ударов молнии в настоящее время решаются на очень низком уровне. Причина заключается в значительной сложности моделирования электромагнитных процессов при воздействия электромагнитного поля молнии на силовое оборудование (в частности, на воздушные линии электропередачи). Имеет место также дефицит исчерпывающих экспериментальных данных. Эти обстоятельства делают актуальным и значимым исследование переходных процессов, возникающих на оборудовании энергосистем при воздействии наведенного напряжения. Эти обстоятельства делают актуальным и значимым исследование явлений наведенного напряжения.

Степень разработанности. Теоретической основой диссертационного исследования являются научные исследования и труды российских и зарубежных ученых, посвященные проблемам расчета наведенного напряжения, а также работы по перенапряжениям в электрических сетях, по теоретическим основам электротехники и по волновым переходным процессам в линиях электропередачи.

Проблема расчета наведенного напряжения исследуется рядом зарубежных и отечественных авторов. Различные модели, описывающие взаимодействие воздушной линии и электромагнитного поля молнии, представлены в работах Г. Александрова [13], Э. Базеляна [12], Д. Разевига [1], А. Andreotti, D. Assante, F. Mottola и L. Verolino [2], M. J. Master и M. A. Uman [4] [10], C.A. Nucci [6] [7] [20], S. Rusk [15], H.K. Hoidalen [16].

Объект исследования: воздушные линии электропередачи.

Предмет исследования: волновые процессы в линиях электропередачи при близких ударах молнии.

Целью выполнения данной работы является создание расчетной математической модели, позволяющей получить распределение напряжения, которое индуцируется при разряде молнии возле линии при различных параметрах воздушной линии электропередачи и молнии.

В работе содержатся решения следующих **задач**:

1) Обосновать параметры тока молнии при обратном разряде с учетом запаздывания по времени волны тока.

2) Решить уравнения Максвелла, используя понятия векторного и скалярного полей. Затем найти компоненты электромагнитного поля молнии в заданной точке вокруг источника молнии с учетом взаимной ориентации линии и молнии.

3) Обосновать вид телеграфных уравнений, содержащих правую часть, которая учитывает электромагнитное влияние источника молнии. Выразить уравнения через компоненты электрического поля. Решить полученные выражения для напряжения линии.

4) Создать математическую модель для расчета напряжения при прямом ударе молнии.

5) Реализовать алгоритм в вычислительном комплексе Mathcad для оценки уровня напряжения. Провести расчеты волновых процессов на линии для различных характеристик молнии.

6) Провести сравнение результатов, которые получены с помощью методики из данного исследования, и с методиками, используемым в других работах.

Методология и методы исследования. Решение поставленных задач осуществлялось при помощи совокупности общенаучных методов познания, таких как анализ и синтез, метод абстракции, моделирование, сравнение. Также использовались методы математического и компьютерного моделирования, основанные на теории матриц, теории дифференциальных уравнений,

теории электромагнитных полей, уравнениях Максвелла, теории длинных линий электропередачи, а также численных методах интегрирования, реализованных в виде численно-аналитического решения на ЭВМ.

Научная новизна работы:

1) разработана математическая модель воздушной линии электропередачи и канала молнии, предназначенная для проведения расчёта электромагнитного переходного процесса с учетом изменения параметров линии электропередачи и канала молнии.

2) Определены границы применения разработанной математической модели и требования к допустимым параметрам линии электропередачи и канала молнии, используемым при оценке уровня наведенного напряжения.

3) Определены электрические параметры и геометрические характеристики линии электропередачи и физические параметры канала молнии при которых возникают опасные перенапряжения при близких ударах молнии.

4) Выполнены расчеты наведенного напряжения на объекте ограниченных размеров (в рамке) для разных методик, показаны границы применимости методик. Показаны достоинства разработанной математической модели для расчета напряжения в рамке по сравнению с существующей методикой.

Теоретическая значимость результатов работы.

Предложенные в работе научно-технические решения вносят вклад в развитие области электромагнитной совместимости и молниезащиты. Результаты проведенной работы позволяют сделать выбор оптимальных параметров линии электропередачи и мест реализации защитных устройств и корректно оценить уровень опасного воздействия от ударов молнии.

Практическая значимость результатов работы:

1. Разработана теория, создан математический аппарат для анализа перенапряжений, что необходимо для решения вопросов, связанных с молниезащитой силового оборудования и для оценки надежности работы изоляции электрических сетей при воздействии атмосферных явлений.

2. Продление срока службы силового оборудования электрических сетей и подстанций и повышение надежности работы энергосистемы из-за уменьшения числа отказов оборудования при грозовых явлениях.

3. Снижение экономического ущерба при снижении числа поврежденных электроэнергетических объектов подстанций и электрических сетей.

Соответствие паспорту специальности. Настоящая работа отвечает требованиям научной специальности 2.4.3 «Электроэнергетика».

Достоверность полученных результатов обосновывается теоретическими исследованиями в области электромагнитных полей и проведенными расчетами с применением современного программного обеспечения. В основе разработанных математических моделей, описывающих взаимодействие линии электропередачи и канала молнии, использованы дифференциальные уравнения. Их решение получено путем использования известных и хорошо изученных способов численного интегрирования.

Защищаемые научные положения:

1) Алгоритм расчета электромагнитного переходного процесса с учетом изменения параметров линии электропередачи и канала молнии с целью решения задачи расчета напряжения, который положен в основу разработанной математической модели воздушной линии электропередачи и канала молнии.

2) Определены границы применения разработанной математической модели и требования к допустимым параметрам линии электропередачи и канала молнии, используемым при оценке уровня наведенного напряжения.

3) Определены электрические параметры и геометрические характеристики линии электропередачи и физические параметры канала молнии при которых возникают опасные перенапряжения при близких ударах молнии.

Апробация результатов. Материалы научной работы докладывались и обсуждались на следующих всероссийских и международных научно-технических конференциях:

1) 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 2-3 февраля 2016 года)

2) 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, (г. Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), 1-3 февраля 2017 года).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** приведено описание атмосферных явлений и их влияние на повышение напряжений на объектах электроэнергетики. Указано, что как прямые попадания молнии в линию, так и индукция от косвенных разрядов молнии приводят к появлению опасных перенапряжений. Дана характеристика длительности электромагнитного переходного процесса при атмосферных перенапряжениях и указана величина токов. Так разряды молнии имеют большие максимальные токи (обычно токи молнии достигают 50 кА, а максимальные зарегистрированные токи молнии превышают 200 кА). Показано, что наличие коротких по длительности фронтов у токов молнии способствует повреждению изоляционных оболочек оборудования без применения защитных мероприятий.

Наиболее опасными являются прямые попадания молнии в объекты энергетики вследствие возникновения обратных перекрытий от заземленных участков. Косвенные удары молнии представляют опасность для объектов энергетики низких и средних классов напряжений. Механизм образования наводки напряжения обусловлен наличием емкостных и индуктивных связей между каналом молнии и сетевыми объектами.

Правила устройства электроустановок в части атмосферных явлений и воздействий молнии на электрооборудование приведены в [11].

В главе показано, чем определяется электрическое поле атмосферы, ее характеристики и приведена средняя величина напряженности E около земной поверхности. Указана величина электрической проводимости атмосферы и главные ионизаторы атмосферы (космические лучи, радиоактивные вещества Земли и воздуха, ультрафиолетовое излучение Солнца).

Далее дано описание процесса происхождения и развития грозового разряда и указаны стадии развития обратного разряда молнии. Приведены главные характеристики токов молнии, которые необходимы при расчетах опасных перенапряжений, такие как время полуспада импульса тока, дли-

тельность времени фронта, производная тока по времени (крутизна), амплитуда тока, скорость развития главного (обратного) разряда.

Приведена статистическая оценка интенсивности грозовой деятельности и указана вероятность отключений линий вследствие индуцированных перенапряжений при ударах молнии вблизи линии.

Вторая глава посвящена получению выражений для электромагнитного (ЭМ) поля, которое создается каналом молнии.

Для модели “линия-поле”, в которую входят уравнения для описания процессов происходящих между воздушной линией электропередачи и ЭМ полем, необходимо определить составляющие ЭМ поля. Составляющие поля и источник определяются в цилиндрической системе координат (рисунок 1). Затем путем преобразования координат они будут записаны в декартовой системе координат

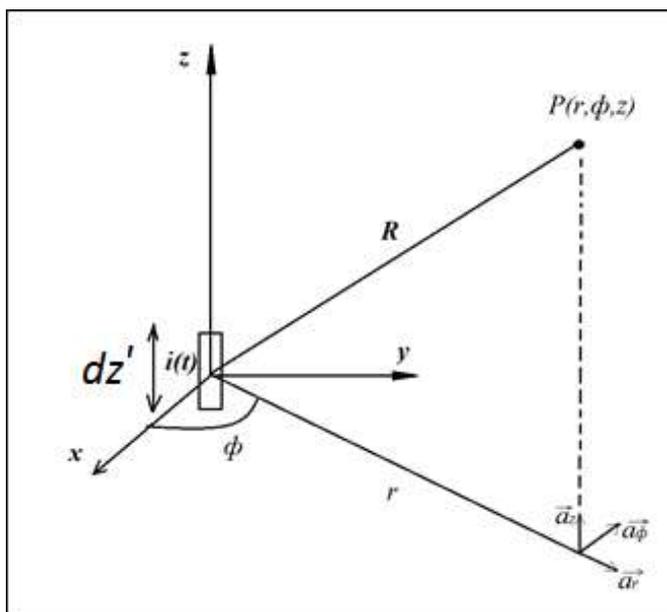


Рисунок 1 – Система координат для определения электрического и магнитного полей от элемента тока

На рисунке 1 изображена система координат, элемент тока $i(t)$ размером dz' , точка расчета $P(r, \phi, z)$, расстояние от элемента тока до точки расчета R , и r – проекция расстояния R на плоскость xy .

Для поиска ЭМ поля, излучаемого источником молнии, необходимо решить систему уравнений Максвелла, используя понятия векторного и скалярного потенциала [5] [8] [14]:

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \oint_{(V)} \frac{\rho\left(t - \frac{R}{c}\right)}{R} dV \quad (2.1)$$

$$\bar{A} = \frac{\mu}{4\pi} \oint_{(V)} \frac{\bar{\delta}(t - R/c)}{R} dV \quad (2.2)$$

Для получения выражений скалярного φ и векторного \bar{A} потенциалов нужно проинтегрировать равенства по объему V . В данном объеме содержатся заряды и токи. Их характеристики - плотность ρ и плотностью $\bar{\delta}$ соответственно. Расстоянию R соответствует дистанция между местом расчета потенциалов и объемом с заряженными частицами и токами. Запаздывание по времени определяется тем, что для преодоления расстояния R между местом, где расположены объемный заряд источника с плотностью ρ и токи источника с плотностью $\bar{\delta}$ и искомой расчетной точкой в которой ищутся потенциалы необходимо время R/c (c – скорость света).

Итак, при известных распределениях в пространстве и изменении во времени зарядов ρ и токов $\bar{\delta}$ можно определить скалярный и векторный потенциалы.

Движение обратного разряда молнии определяет изменение зарядов и токов в пространстве и времени. Так как в пространстве за пределами канала нет других зарядов и токов, то объемные интегралы становятся линейными.

При известных потенциалах напряженность электрического поля находится как [8] [14]:

$$\bar{E} = -grad\varphi - \frac{\partial\bar{A}}{\partial t} \quad (2.3)$$

Так как задача имеет симметрию, то используется цилиндрическая система координат для определения компонент ЭМ поля.

В результате решения уравнений составляющие поля в точке $P(r, \varphi, z, t)$ [6] [9] имеют вид:

$$dB_{\varphi}(r, \varphi, z, t) = \frac{\mu_0 dz'}{4\pi} \cdot \left[\frac{r}{R^3} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r}{cR^2} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (2.4)$$

$$dE_r(r, \varphi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) + \frac{r(z-z')}{c^2R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \right] \quad (2.5)$$

$$dE_z(r, \varphi, z, t) = \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i\left(z', \tau - \frac{R}{c}\right) d\tau + \frac{2(z-z')^2 - r^2}{cR^4} i\left(z', t - \frac{R}{c}\right) - \frac{r^2}{c^2R^3} \frac{\partial i\left(z', t - \frac{R}{c}\right)}{\partial t} \quad (2.6)$$

Доказательство выражений (2.4-2.6) для составляющих электрического и магнитного полей получено в работе [10].

В полученных выражениях присутствуют три компоненты поля: электростатическая (пропорциональная заряду или интегралу тока), индукционная (пропорциональная току) и компонента излучения (пропорциональная производной тока).

Электромагнитное поле излучается малым элементом с током с длиной dz' (рисунок 1) для которого изменения тока во времени и пространстве можно описать при помощи модели Transmission Line [10] [10].

Различные модели обратного разряда тока молнии рассмотрены в работах [10] [10] [6] [17] [18] [19]. В данном исследовании для тока главного раз-

ряда (ток у поверхности земли) используется двухэкспоненциальная формула:

$$i_0(t) = I_{max} * (exp^{-\alpha*t} - exp^{-\beta*t}), \quad (2.7)$$

где I_{max} – амплитуда тока главного разряда, $\alpha = 1/t_{фронт}$, $\beta = 1/t_{спада}$, $t_{фронт}$ – время фронта, $t_{спада}$ – время полуспада.

Ток в любой точке канала определяется согласно модели - Transmission Line:

$$i(z', t) = \begin{cases} i_0(t - z'/v), & z' \leq vt \\ 0, & z' > vt \end{cases}, \quad (2.8)$$

В формуле (2.8) v – скорость движения обратного разряда, z' – координата, для которой рассчитывается значение тока молнии.

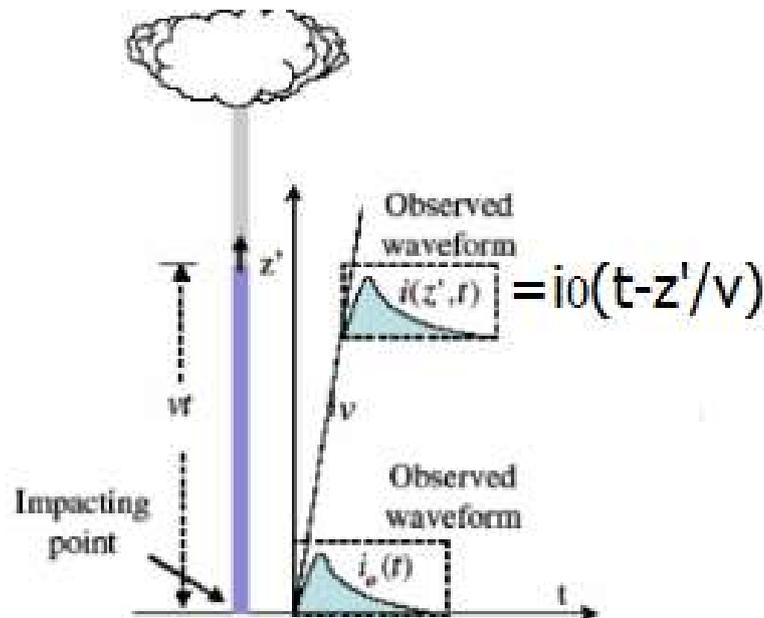


Рисунок 2 – Иллюстрация запаздывания тока во времени на разных высотах, которое определяется движением элемента тока от земли со скоростью – v

На рисунке 2 изображен канал молнии с током. При движении обратного разряда тока вверх по каналу происходит заполнение канала зарядами. За время t ток от поверхности земли пройдет расстояние $v*t$ и достигнет высоты $z=z'$. Форма тока главного разряда $i_0(t)$ у поверхности земли показана для схеме на высоте $z=0$, а ток в вершине канала показан на высоте $z=z'$. Ток на высоте z' запаздывает от тока главного разряда на время z'/v .

Далее рассмотрен вывод телеграфных уравнений с учетом внешнего источника поля. Полученные выражения для ЭМП затем используются для записи и решения телеграфных уравнений длинной линии. Они учитывают характеристики поля молнии и параметры линии. Получение телеграфных уравнений с правой частью (с учетом воздействия электромагнитного поля молнии) описано в работе [3].

Телеграфные уравнения записаны для однопроводной линии:

$$-\frac{\partial U(x)}{\partial x} - L' * \frac{\partial I(x)}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B_y^i(z, x) dz \quad (2.9)$$

$$-\frac{\partial I(x)}{\partial x} - C' \frac{\partial U(x)}{\partial t} = C' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_z^i(z, x) dz \quad (2.10)$$

В левой части уравнения содержат ток, напряжение, погонные емкость и индуктивность, в правой части содержат ЭМП молнии.

Таким образом, полученные уравнения позволяют связать параметры линии и ЭМП молнии. Далее эти уравнения сведены к одному дифференциальному уравнению 2-ого порядка и решены относительно переменной напряжения с помощью операторного метода.

Полученные телеграфные уравнения длинной линии с внешним источником электромагнитного поля (поле молнии) отличаются от традиционной записи телеграфных уравнений присутствием в них правой части, которая учитывает влияние поля молнии.

$$-\frac{\partial U(x)}{\partial x} - L' * \frac{\partial I(x)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial t} \int_0^h B_y^i(z, x) dz \quad (2.11)$$

$$-\frac{\partial I(x)}{\partial x} - C' \frac{\partial U(x)}{\partial t} = C' \frac{\partial}{\partial t} \int_0^h E_z^i(z, x) dz \quad (2.12)$$

Итоговое дифференциальное уравнение 2-ого порядка, записанное относительно переменной напряжения:

$$-\frac{d^2 U(t, x)}{dx^2} + \frac{\partial^2 U(t, x)}{\partial t^2} L' * C' =$$

$$\begin{aligned}
& -\frac{\partial^2}{\partial t^2} L' * C' \int_0^h E_z^i(x, z, t) dz - \frac{d^2}{dx^2} \int_0^h E_z^i(x, z, t) dz \\
& - \frac{d}{dx} \left(E_x^i(x, h, t) - E_x^i(x, 0, t) \right)
\end{aligned} \tag{2.13}$$

Это же уравнение записано в операторной области.

$$\begin{aligned}
& -\frac{d^2 U(p, x)}{dx^2} + p^2 L' * C' * U(p, x) = \\
& = -p^2 L' * C' \int_0^h E_z^i(x, z, p) dz - \frac{d^2}{dx^2} \int_0^h E_z^i(x, z, p) dz \\
& - \frac{d}{dx} \left(E_x^i(x, h, p) - E_x^i(x, 0, p) \right)
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Как известно, его решение представляется в виде двух решений: решения однородного ДУ и неоднородного ДУ при подстановке частного решения. (L – длина линии, L' и C' – погонные параметры, $\gamma = p\sqrt{L'C'} = p/c$ – постоянная распространения).

$$U(p, x) = U'(p, x) + U''(p, x) \tag{2.15}$$

$$U'(p, x) = e^{-\gamma * x} * V(p) + e^{-\gamma * (L-x)} W(p) \tag{2.16}$$

$$U''(p, x) = e^{-\gamma x} * V(p, x) + e^{-\gamma(L-x)} W(p, x) \tag{2.17}$$

Для частного решения неоднородного ДУ необходимо найти $V(p, x)$ и $W(p, x)$.

Итоговое выражение для наведенного напряжения:

$$\begin{aligned}
& u(x, t) = u'(t, x) + u''(t, x) \\
& = v\left(t - \frac{x}{c}\right) + w\left(t - \frac{L-x}{c}\right) + v\left(t - \frac{x}{c}, x\right) \\
& + w\left(t - \frac{L-x}{c}, x\right)
\end{aligned} \tag{2.18}$$

$$\begin{aligned}
u(x, t) = & v\left(t - \frac{x}{c}\right) + w\left(t - \frac{s-x}{c}\right) + 2 \\
& \cdot \int_0^h E_z(x, z, t) dz \\
& + \int_0^L \left[E_x(x, h, t) - E_x(x, 0, t) \right] dx \quad (2.19)
\end{aligned}$$

Задание граничных условий позволяет рассчитать волны $v(t)$ и $w(t)$.

В **третьей главе** приведено описание модели распространения волн по линии для случая «прямого удара молнии». Целью является расчет волнового процесса в линии при прямом ударе молнии. Необходимо получить токи, напряжения и волны, возникающие в линии. В данной главе выполнено:

1. Описание параметров линии и уравнения для временных и пространственных характеристик волн, бегущих по линии.

2. Расчеты волновых процессов для короткой линии длиной $L=1\ 000$ м, и точкой удара $s=333$ м. В приложении даны расчеты показывающие – почему для короткой линии напряжение повышается и достигает большой величины, а при постепенном увеличении длины линии – напряжение уменьшается. Также показаны расчеты процессов при разных параметрах импульса тока молнии.

3. Расчеты для длинной линии с длиной $L=100$ км и координатой точки удара $s=33,3$ км.

1. Параметры линии, молнии и форма импульса тока, а также основные формулы для расчета.

Линия расположена вдоль оси x , начало линии в точке $x=0$, конец линии в точке $x=L$, где L – длина линии. Волновое сопротивление линии $Z_c = 400$ Ом. Прямой удар молнии в точку линии с координатой $x=s$.



Рисунок 3 – Схема линии с волнами

На рисунке 3 изображена линия и характерные точки на линии (начало линии $x=0$, точка прямого удара молнии $x=s$, конец линии $x=L$). Точка удара молнии разделяет линию на две части: первый участок линии от $x=0$ до $x=s$ и второй участок линии от $x=s$ до $x=L$.

В ходе волнового процесса на линии возникают 4 волны:

Волны на 1-ом участке линии:

Волна $w_1(t)$ начинается от $x=s$ и распространяется до $x=0$.

Волна $v(t)$ начинается от $x=0$ и распространяется до $x=s$.

Волны на 2-ом участке линии:

Волна $v_2(t)$ начинается от $x=s$ и распространяется до $x=L$.

Волна $w(t)$ начинается от $x=L$ и распространяется до $x=s$.

Рассматривается прямой удар молнии в линию. Линия считается разомкнутой на концах. В точке прямого удара молнии появляются волна w_1 , которая движется в начало линии в $x=0$ и волна v_2 , которая направляется в конец линии $x=L$.

После прихода волны w_1 в начало линии там, согласно граничному условию, появляется волна v , которая идет по направлению к месту удара $x=s$. Также после прихода волны v_2 в конец линии там, согласно граничному условию, появляется волна w , которая идет по направлению к месту удара. Совокупность волн позволяет рассчитать токи и напряжения в первой (i_1 и u_1) и во второй (i_2 и u_2) частях линии по формулам:

$$Z_c * i_1(x,t) = v(t-x/c) - w_1(t - (s-x)/c) \quad (3.1)$$

$$Z_c * i_2(x,t) = w(t - (L-x)/c) - v_2(t - (x-s)/c) \quad (3.2)$$

$$u_1(x,t) = v(t-x/c) + w_1(t - (s-x)/c) \quad (3.3)$$

$$u_2(x,t) = w(t - (L-x)/c) + v_2(t - (x-s)/c) \quad (3.4)$$

Для решения поставленной задачи по нахождению токов и напряжений линии необходимо записать волновые уравнения с учетом граничных условий.

Для точки удара молнии $x=s$ должно выполняться условие, что сумма токов i_1 и i_2 равно току молнии $i(t)$.

$i_1(x=s, t) + i_2(x=s, t) = i(t)$ (СУММА токов в точке удара равна току молнии)

Также для двух участков линии напряжения на 1-ом и 2-ом участке равны в точке удара $x=s$.

$$u_1(x=s, t) = u_2(x=s, t) \text{ (напряжения в точке удара равны)}$$

Так как линия разомкнута по концам и ток по концам равен нулю $i_1(x=0, t) = 0$ и $i_2(x=L, t) = 0$, то это позволяет записать связь между волнами в точке $x=0$ и в точке $x=L$.

$$v(t) = w_1(t-s/c) \text{ (ток в начале равен нулю)}$$

$$w(t) = v_2(t - (L-s)/c) \text{ (ток в конце равен нулю)}$$

Совокупности данных 4-х уравнений достаточно чтобы найти необходимые волны, токи и напряжения.

Итак, в ходе решения волновых уравнений получены формулы для расчета волн:

$$v_2(t) = v_2(t-2*L/c) - Z_c/2 * i(t - 2 * s/c) - Z_c/2 * i(t) \quad (3.5)$$

$$w_1(t) = w_1(t-2*L/c) - Z_c/2 * i(t - 2 * (L-s)/c) - Z_c/2 * i(t) \quad (3.6)$$

$$w(t) = v_2(t - (L-s)/c) \quad (3.7)$$

$$v(t) = w_1(t - s/c) \quad (3.8)$$

Итак, зная волны v , w , v_2 и w_1 можно найти токи i_1 и i_2 и напряжения u_1 и u_2 . Полученные формулы используются для расчета токов и напряжений при прямом ударе молнии в линию электропередачи.

$$Z_c * i_1(x,t) = v(t-x/c) - w_1(t - (s-x)/c) \quad (3.9)$$

$$Zc * i_2(x,t) = w(t - (L-x)/c) - v_2(t - (x-s)/c) \quad (3.10)$$

$$u_1(x,t) = v(t-x/c) + w_1(t - (s-x)/c) \quad (3.11)$$

$$u_2(x,t) = w(t - (L-x)/c) + v_2(t - (x-s)/c) \quad (3.12)$$

Из формул для v_2 и w_1 видно, что они содержат ток с обратным знаком. Поэтому, если ток положителен, эти волны будут с минусом. Соответственно, согласно формуле напряжения u_1 и u_2 , напряжение будет с минусом, если ток с плюсом. А для формулы тока – знак тока i_1 и i_2 будет обратен волнам w_1 и v_2 . То есть если ток молнии с +, волны v_2 и w_1 с –, а токи i_1 и i_2 опять с + как и ток молнии i .

Для задания тока молнии используется форма импульса тока с двумя экспонентами (короткая по длительности по сравнению с другой формой используемой для других задач и расчетов).

$$\text{Параметры импульса тока молнии} - i(t) = I_0 * (e^{-\alpha*t_1} - e^{-\beta*t_2})$$

$$t_1 = 25 \text{ мкс}$$

$$t_2 = 0,1 \text{ мкс}$$

$$\alpha = \frac{1}{t_1} = 4 * 10^4 \text{ с}^{-1}$$

$$\beta = \frac{1}{t_2} = 10^7 \text{ с}^{-1}$$

$$I_0 = 12 \text{ кА}$$

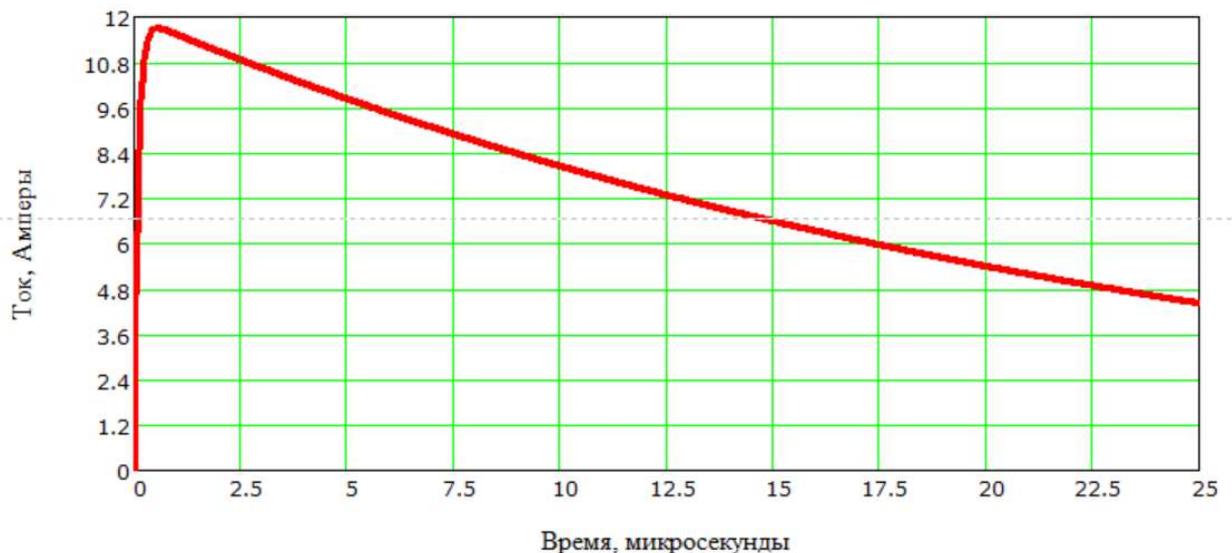


Рис 4 – Форма импульса тока с двумя экспонентами, с коротким временем фронта, равного 0,4 мкс и временем полуспада 18 мкс.

На рисунке 4 показана форма импульса тока, рассчитанная по формуле. Из рисунка следует, что импульс имеет время $t_{\text{фронта}} = 0,4$ мкс и время $t_{\text{полуспада}} = 18$ мкс.

1-ый расчет. Длина линии 1000 метров, точка удара $s=L/3=333$ метров.

В первом расчетном случае используется короткая линия длиной $L=1000$ метров и точкой удара молнии с координатой расположенной на расстоянии $1/3$ длины линии от начала линии $s=L/3=333$ метра. На графиках приводятся токи, напряжения и волны. Токи показаны в кА, напряжения в кВ, время в мкс. Один пробег волны рассчитывается как L/c , где c – скорость движения электромагнитных волн по линии. Один пробег волны равен 3,3 мкс, треть пробега равна 1,1 мкс.

Токи линии

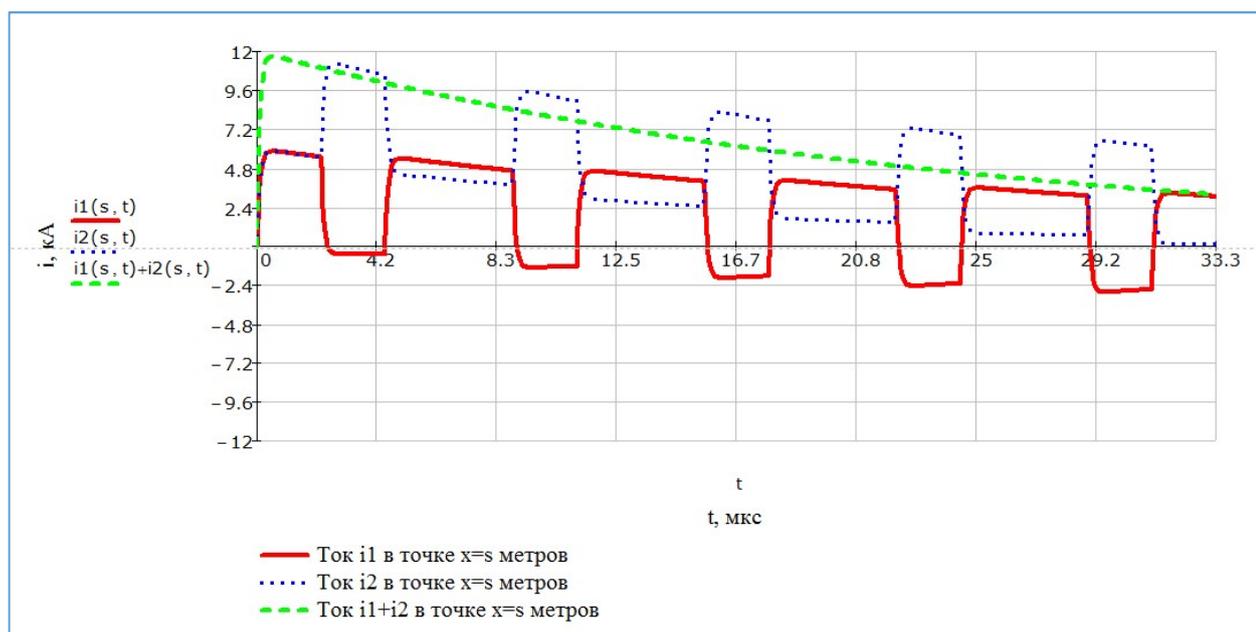


Рисунок 5 – Ток i_1 в $x=333$ метров и ток i_2 в $x=333$ метров, а также их сумма в точке 333 метров. 8 пробегов волны. Длина линии $L=1000$ метров.

На рисунке 5 показаны токи в точке $x=333$ метра. Ток молнии появляется в момент времени $t=0$. В промежутке от $t=0$ до $t=2,2$ мкс токи i_1 и i_2 равны между собой и составляют половину тока молнии.

За время 1,1 мкс волна $w_1(t)$ дойдет до начала линии, отразится в виде волны $v(t)$ и уже волна $v(t)$ достигнет точку $x=333$ метра за 1,1 мкс. Таким образом, в 2,2 мкс придет волна с начала линии и согласно граничным условиям в точке удара молнии наблюдается скачок на кривых тока i_1 и i_2 .

За время 2,2 мкс волна $v_2(t)$ дойдет до конца линии, отразится в виде волны $w(t)$ и уже волна $w(t)$ достигнет точку $x=333$ метра за 2,2 мкс. Таким образом, в 4,4 мкс придет волна с конца линии и согласно граничным условиям в точке удара молнии наблюдается очередной скачок на кривых тока i_1 и i_2 . Процесс отражений волны от концов линии повторяется, что влияет на формы кривых токов i_1 и i_2 .

С течением времени токи i_1 и i_2 затухают до нуля согласно затухающему импульсу тока молнии.

На рисунке 6 показаны те же токи, но для масштаба времени равного одному пробегу волны (3,3 мкс). Этот рисунок позволяет детально рассмотреть кривые тока.

Если умножить величину волнового сопротивления линии $Z_c=400$ Ом на амплитуду тока молнии, то получится величина $400 \text{ Ом} * 12 \text{ кА} = 4800 \text{ кВ}$. Эта величина является важной с точки зрения оценки нормального уровня напряжения на линии, которое должно быть сопоставимо с этим значением.

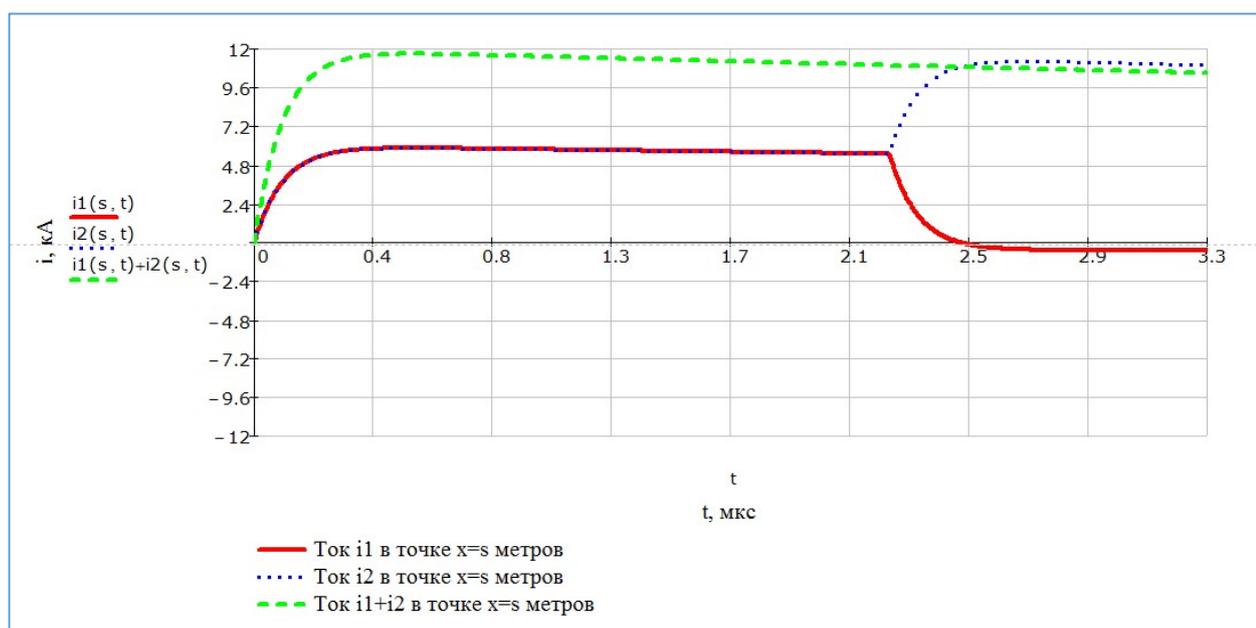


Рисунок 6 - Ток i_1 в $x=333$ метров и ток i_2 в $x=333$ метров, а также их сумма в точке 333 метров. 1 пробег волны. Длина линии $L=1\ 000$ метров.

Напряжение линии

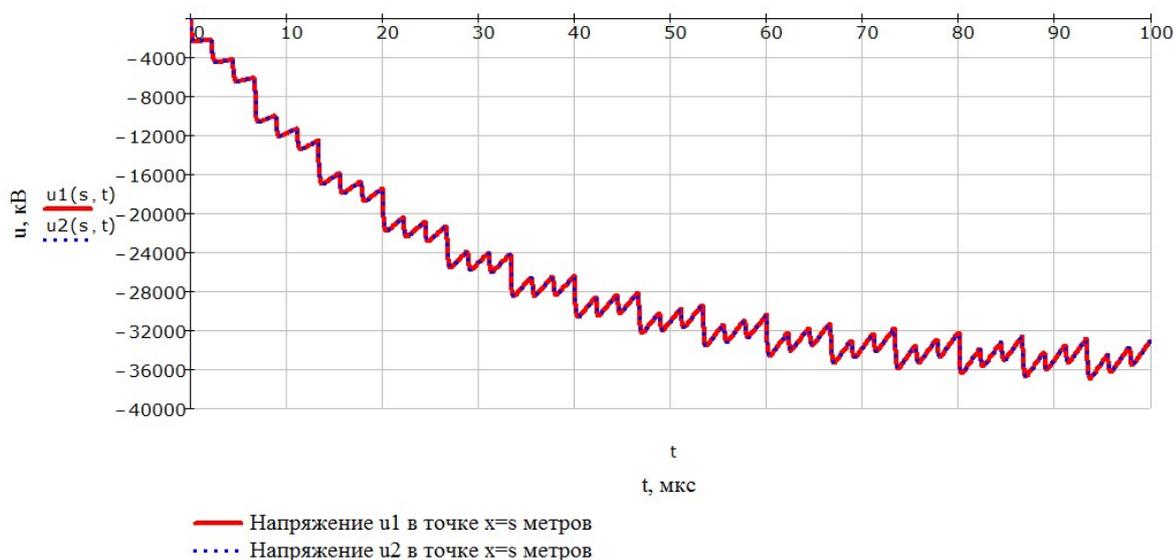


Рисунок 7 – Напряжение u_1 в $x=s$ метров и Напряжение u_2 в $x=s$ метров. 30 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

На рисунке 7 показано напряжение u_1 и u_2 в точке удара молнии 333 метра. На форму кривых напряжения также оказывают влияние отраженные от концов линии волны.

Параметры линии (короткая длина L), место удара молнии (точка $s=333$ метра) и импульс тока молнии (фронт и время полуспада) влияют на напряжение и волны таким образом, что форма кривой напряжения приобретает форму аperiodической составляющей с установившимся значением 36 000 кВ, которое достигается к 100 мкс (что составляет около 4х времен $t_{\text{полуспада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии).

За счет многократных отражений волн от концов линии, напряжение превышает величину $Z_{\text{волн}} * i_{\text{max}} = 200 \text{ Ом} * 12 \text{ кА} * 2 = 4\ 800 \text{ кВ}$.

Влияние длины линии и параметров тока молнии на величину и форму напряжения будет рассмотрено ниже.

На рисунке 8 показано напряжение в коротком интервале времени равном 3,3 мкс.

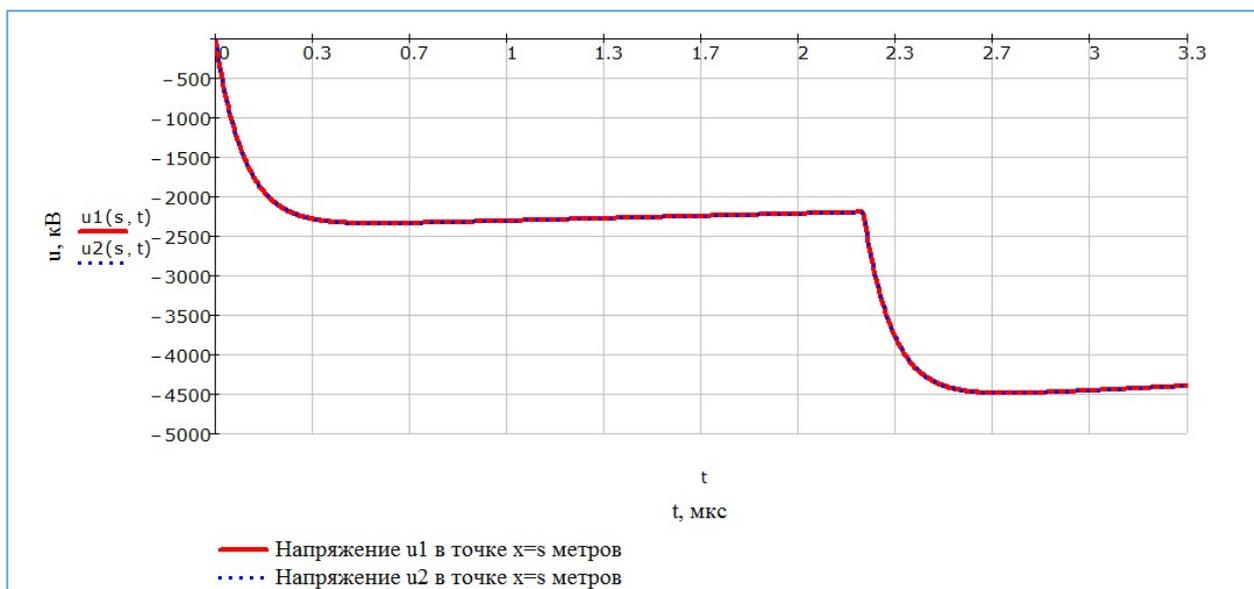


Рисунок 8 - Напряжение u_1 в $x=333$ метров и напряжение u_2 в $x=333$ метров. 1 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

Примечание про знаки: Из формул для v_2 и w_1 видно (они даны под картинкой с линией и волнами со стрелками), что там ток с обратным знаком. Поэтому, если ток положителен, эти волны с минусом будут. Соответственно, согласно формуле напряжения u_1 и u_2 , напряжение будет с минусом, если ток с плюсом. А для формулы тока – знак тока i_1 и i_2 будет обратен волнам w_1 и v_2 . То есть если ток молнии с +, волны v_2 и w_1 с –, а токи i_1 и i_2 опять с + как и ток молнии.

Начальное напряжение равно 2400 кВ в промежутке от 0 до 2,2 мкс, что составляет $Z_c/2 * i(t)$.

Напряжения u_1 и u_2 в точке $x=s=333$ м совпадают. Напряжение растет, так как влияют отраженные волны. Расчет волнового процесса для длинной линии при точке удара $s=300$ метров и длине $L=100$ километров показывает, что напряжение повторяет форму импульса тока молнии, имеет сопоставимую с импульсом величину и длительность. Таким образом, когда вторая часть линии имеет большую длину по сравнению с первой частью линии, то отраженные волны от конца линии не успевают приходить в точку удара и это не приводит к аperiodической форме кривой напряжения с огромным значением напряжения в установившемся режиме.

В данных расчетах для короткой линии напряжение велико и выходит на постоянную величину, а в расчетах для длинной линии величина напряжения и величина произведения тока и волнового сопротивления сопоставимы по величине.

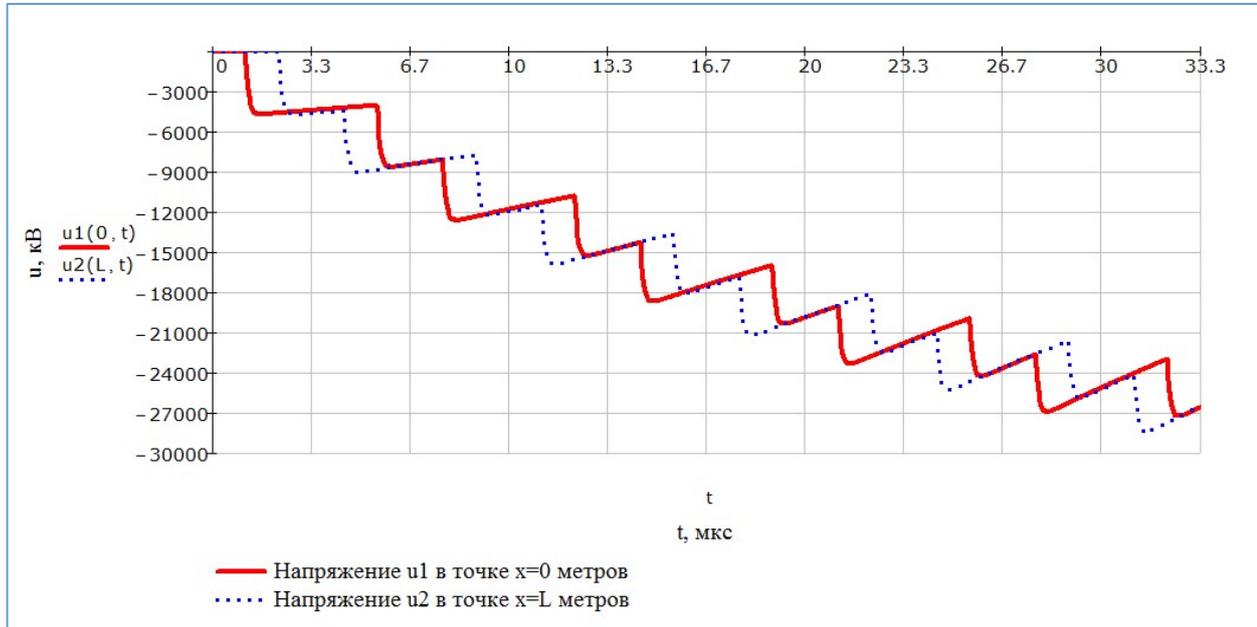


Рисунок 9 - Напряжение u_1 в $x=0$ метров и напряжение u_2 в $x=1\ 000$ метров. 10 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

На рисунке 9 показано напряжение в начале и конце линии, где линия разомкнута.

Волны $v(t)$ и $w(t)$ линии

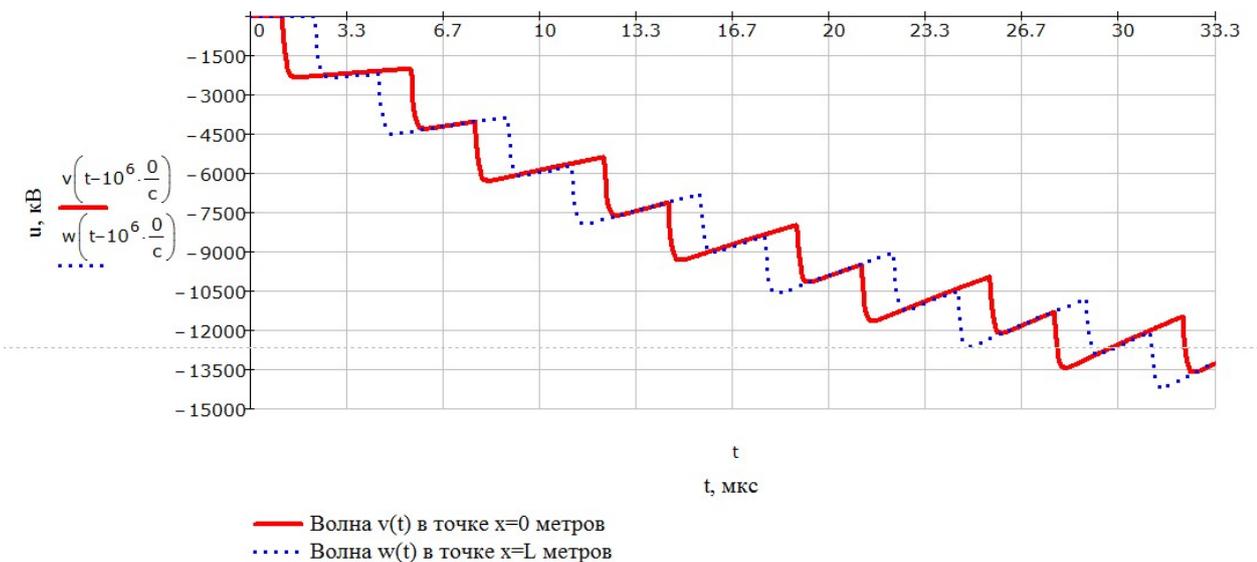


Рисунок 10 – Волна v в $x=0$ метров и волна w в $x=1\ 000$ метров. 10 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

На рисунке 10 показаны волны v и w в начале и конце линии. Их форма представляет наложение друг на друга приходящих волн из точки удара молнии, что приводит к постоянному росту кривых волн.

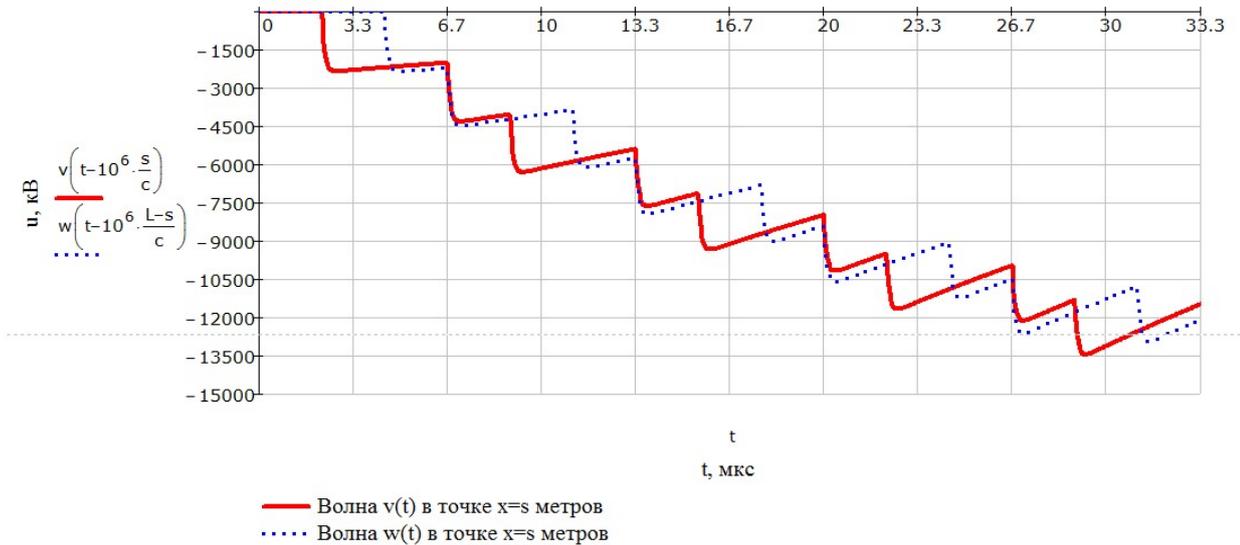


Рисунок 11 – Волна v в $x=333$ метров и волна w в $x=333$ метров. 10 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

Рисунок 11 показывает волны v и w в точке удара молнии для разного временного интервала. Данные кривые повторяют форму кривых в начале и конце линии, но сдвинуты по времени на величину пробега волны от концов линии до точки удара.

Волны $w1(t)$ и $v2(t)$

На рисунке 12 показаны волны $w1$ и $v2$ в точке удара молнии. Их форма аналогична формам кривых рассмотренных ранее. Форма кривых волн $w1$, $v2$, v и w определяет как будут выглядеть напряжения и токи.

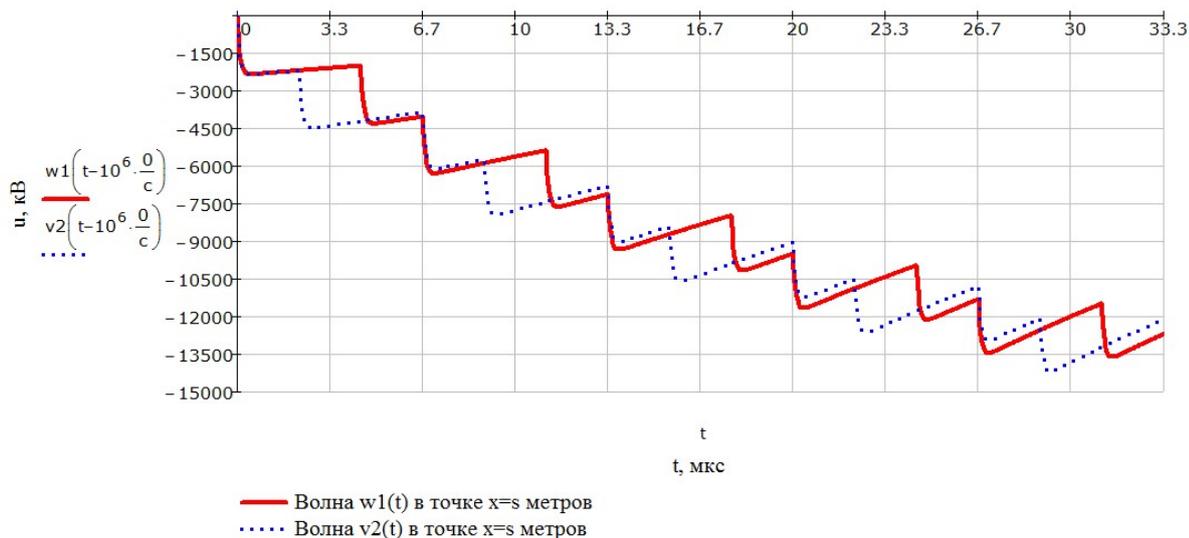


Рисунок 12 – Волна $w1$ в $x=333$ метров и волна $v2$ в $x=333$ метров. Число пробегов волны - 10. Длина линии 1 000 метров.

Расчеты, показывающие влияние длины линии на форму и величину кривой напряжения.

Цель: Проварьировать исходную длину линии ($L=2000\text{м}$, 5000м , 10000м), а первый участок оставить длиной в треть от полного $s=L/3$. И показать влияние длины участка на форму кривой напряжения.

Исходным пунктом для сравнения является расчет для линии длиной $L=1\ 000$ метров и точкой удара молнии $s=333$ метра. В ходе расчета было получено, что форма кривой напряжения приобретает форму апериодической составляющей с установившимся значением $36\ 000$ кВ, которое достигается к 100 мкс (что составляет 5 времен $t_{\text{полуспада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии).

1 расчет) Длина линии $L=2\ 000$ м, точка удара молнии $s=666$ м.

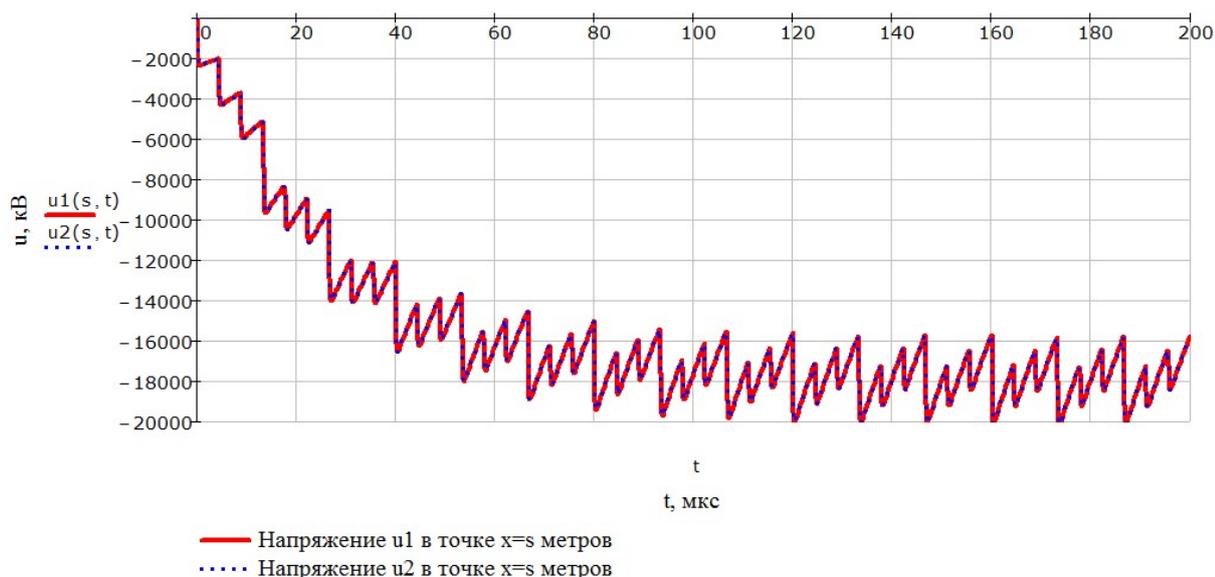


Рисунок 13 - Напряжение u_1 в $x=666$ метров и напряжение u_2 в $x=666$ метров. 30 пробегов волны. Длина линии 2 000 метров, $s=666$ м.

На рисунке 13 показано напряжение в точке удара молнии. Форма кривой напряжения приобретает форму аperiodической составляющей с установившимся значением 18 000 кВ, которое достигается к 100 мкс (что составляет 5 времен $t_{\text{полуспада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии).

2 расчет) Длина линии $L=5000$ м, точка удара молнии $s=1666$ м.

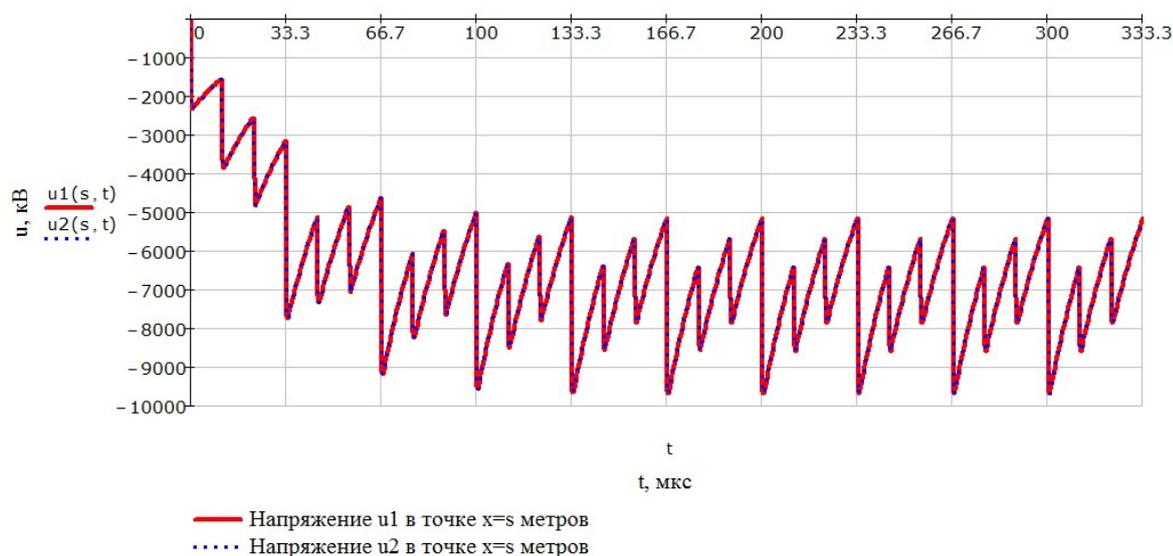


Рисунок 14 - Напряжение u_1 в $x=1666$ метров и напряжение u_2 в $x=1666$ метров. 20 пробегов волны. Длина линии 5000 метров, $s=1666$ м.

На рисунке 14 показано напряжение в точке удара молнии. Форма кривой напряжения приобретает форму апериодической составляющей с установившимся значением 10 000 кВ, которое достигается к 100 мкс (что составляет 5 времен $t_{\text{полупада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии).

3 расчет) Длина линии $L=10\,000$ м, точка удара молнии $s=3\,333$ м.

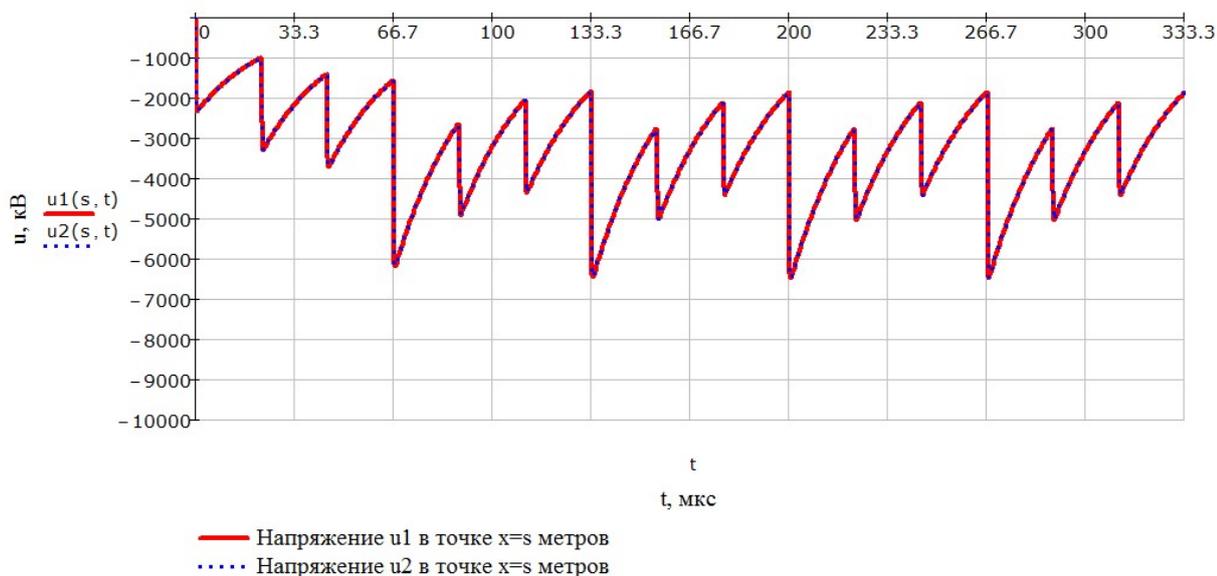


Рисунок 15 - Напряжение u_1 в $x=3\,333$ метров и Напряжение u_2 в $x=3\,333$ метров. 15 пробегов волны. Длина линии 10 000 метров, $s=3\,333$ м.

На рисунке 15 показано напряжение в точке удара молнии. Форма кривой напряжения приобретает форму апериодической составляющей с установившимся значением 6 000 кВ, которое достигается к 100 мкс (что составляет 5 времен $t_{\text{полупада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии).

Резюме: Расчеты показали, что при увеличении длины линии от $L=1\,000$ метров до $L=10\,000$ метров напряжение имеет апериодический характер, достигает установившегося значения за 100 мкс (что составляет 5 времен $t_{\text{полупада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии). Установившееся значение напряжение с увеличением длины линии падает от 36 000 кВ до 6 000 кВ.

Таким образом, короткая длина линии приводит к многократным отражениям волн, которые возникают в точке удара молнии и отражаются от концов линии. Так как расстояние между точкой удара молнии и концами линии мало, а также мало время пробега этого расстояния, то волны накла-

дываются друг на друга и создают аperiodический характер напряжения. Соответственно при увеличении длины линии время пробега волн возрастает и волны, создающие напряжение, суммируются друг с другом с большим интервалом времени. Но так как ток молнии с течением времени затухает, то и увеличением промежутков пробега волн приводит к суммированию меньших значений волн по сравнению со случаем большой длины линии.

Таким образом, на величину напряжения влияет длина линии. Но длительность достижения напряжением установившегося значения равна 100 мкс (5 времен $t_{\text{полуспада}}$ (18 мкс) импульса тока молнии) и не зависит от длины. Эта величина времени для напряжения зависит от времени полуспада импульса тока молнии.

Расчеты, показывающие влияние параметров импульса тока молнии на форму и величину кривой напряжения.

Цель: выяснить почему напряжение достигает такой большой величины и от каких параметров импульса тока молнии оно зависит. Длина линии постоянна и равна 1 000 метров.

1) Импульс тока 12 кА, 0,4/18 мкс

На графике тока - время фронта $t_{\text{фронта}} = 0,4$ мкс, $t_{\text{времени полуспада}} = 18$ мкс.

Данная форма импульса была использована в предыдущих расчетах.

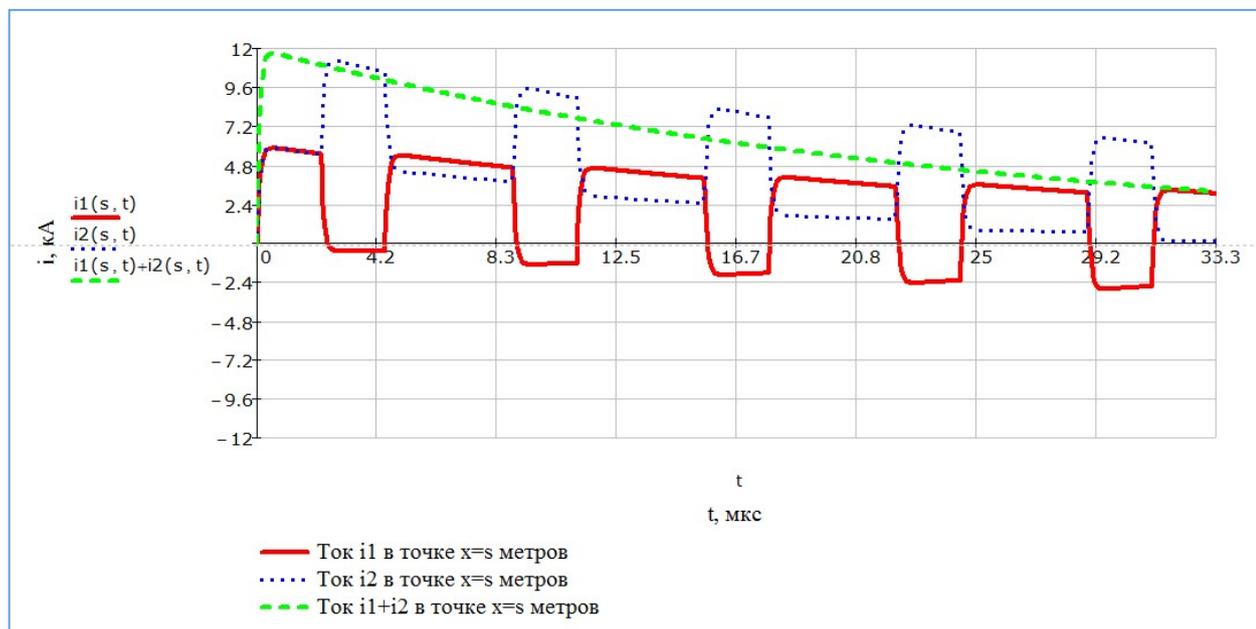


Рисунок 16 - Ток i_1 в $x=333$ метров и Ток i_2 в $x=333$ метров, а также их сумма в точке s метра. 8 пробегов волны. Длина линии $L=1000$ метров.

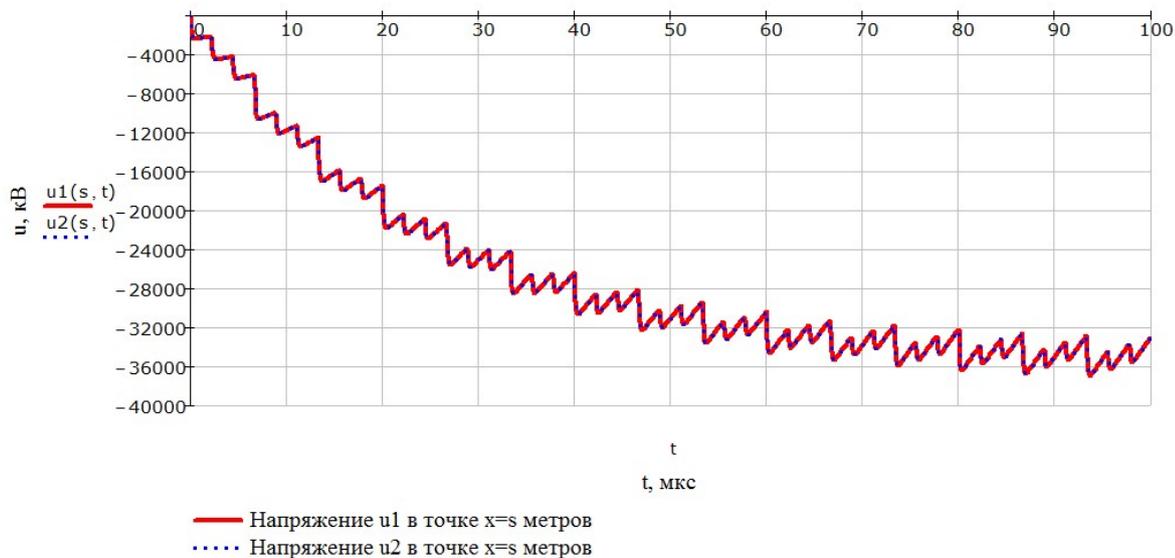


Рисунок 17 - Напряжение u_1 в $x=333$ метров и напряжение u_2 в $x=333$ метров. 30 пробегов волны. Длина линии 1000 метров.

Время фронта тока = 0,4 мкс

Время полуспада тока = 18 мкс.

Напряжение установилось к 100 мкс (5 времени полуспада).

Значение напряжение в установившемся режиме 36 000 кВ.

2) Импульс тока 9 кА, 3/25 мкс с увеличенным временем фронта

На графике тока - время фронта $t_{\text{фронта}} = 3$ мкс, $t_{\text{время полуспада}} = 25$ мкс.

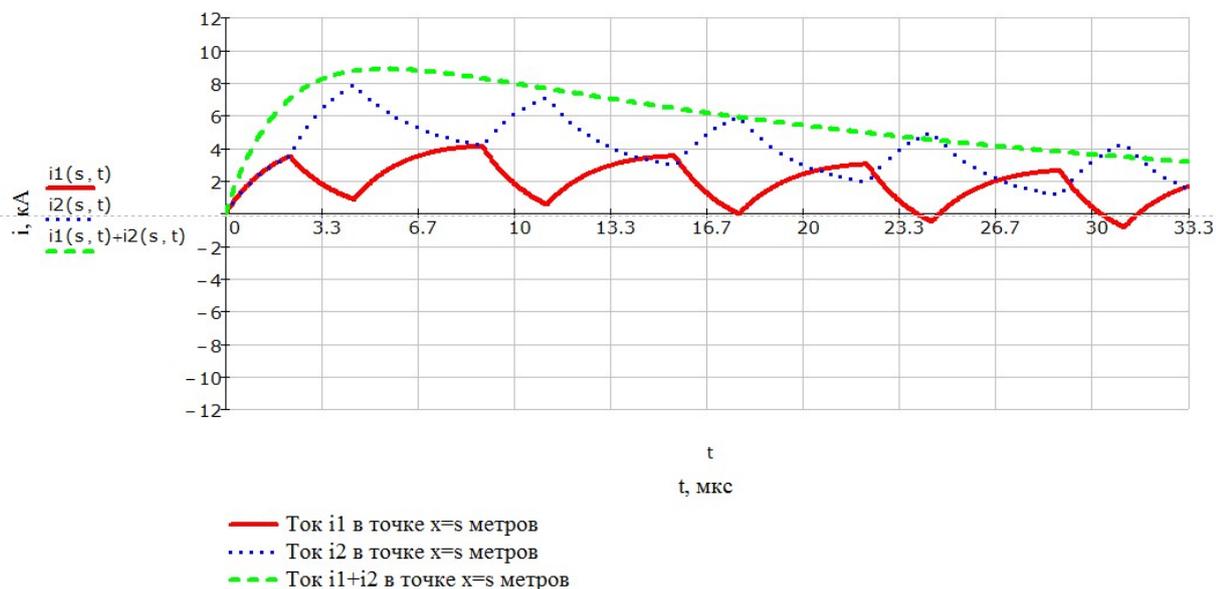


Рисунок 18 - Ток i_1 в $x=333$ метров и Ток i_2 в $x=333$ метров, а также их сумма в точке 333 метра. 10 пробегов волны. Длина линии $L=1\ 000$ метров.

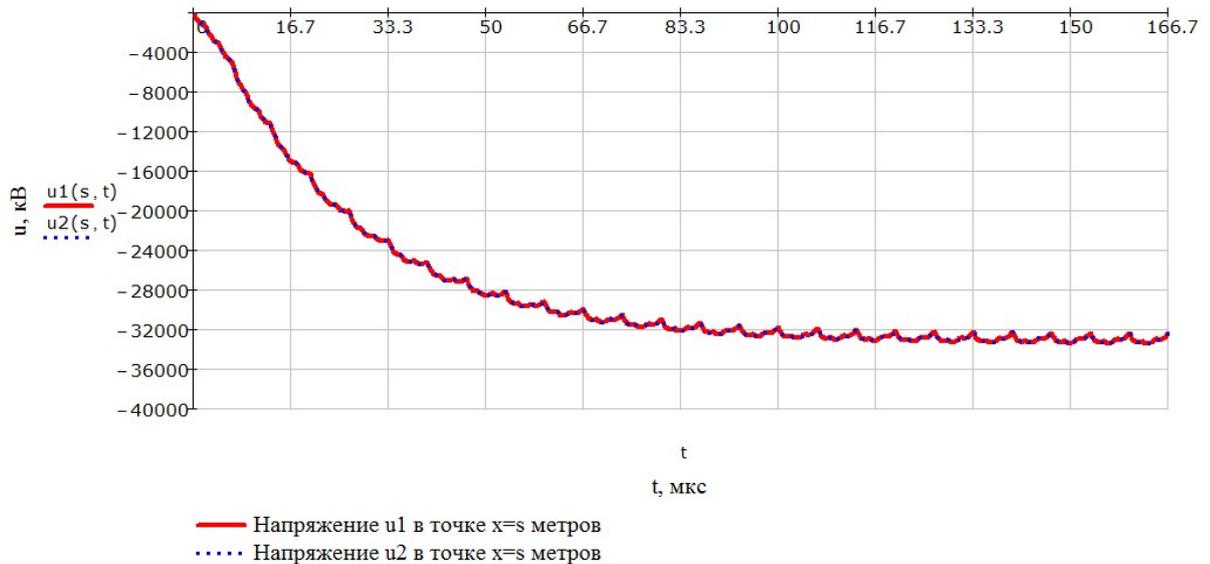


Рисунок 19 - Напряжение u_1 в $x=333$ метров и Напряжение u_2 в $x=333$ метров. 50 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

Время фронта тока = 3 мкс

Время полуспада тока = 25 мкс.

Напряжение установилось к 100 мкс (4 времени полуспада).

Значение напряжение в установившемся режиме 32 000 кВ.

По сравнению с исходной формой тока (0,4/18 мкс) время фронта было увеличено с 0,4 мкс до 3 мкс при этом время полуспада было несущественно изменено. При этом установившееся значение напряжения незначительно уменьшилось с 36 000 кВ до 32 000 кВ. Следовательно время фронта не влияет на величину напряжения. Длительность времени достижения установившегося напряжения осталось равной 100 мкс.

3) Импульс тока 11 кА, 4/66 мкс с увеличенным временем полуспада

На графике тока - время фронта $t_{\text{фронта}} = 4$ мкс, $t_{\text{время полуспада}} = 66$ мкс.

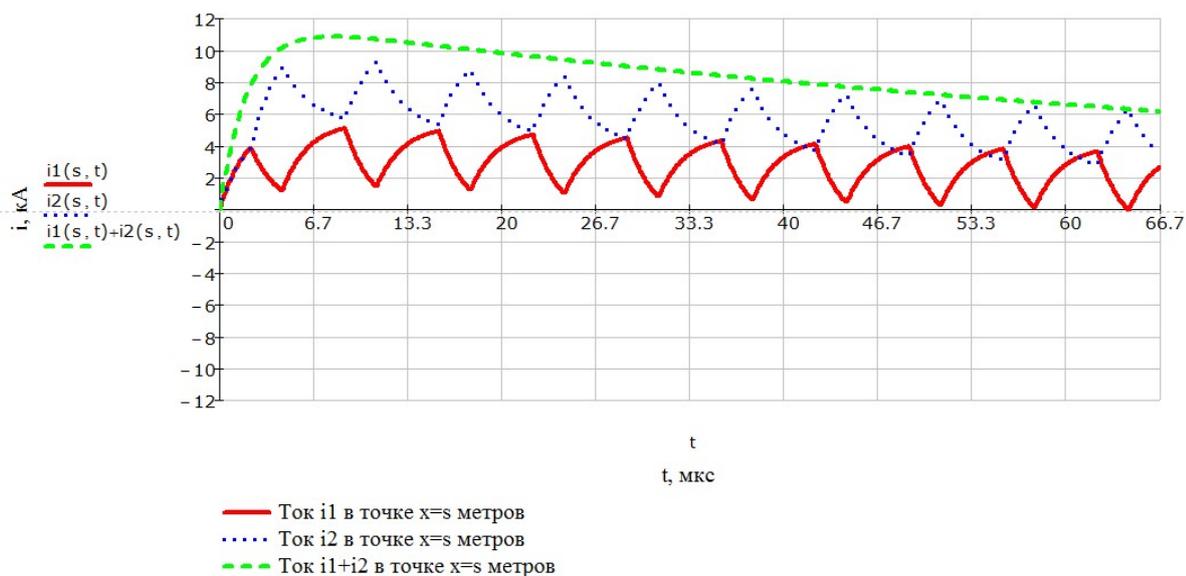


Рисунок 20 - Ток i_1 в $x=333$ метров и Ток i_2 в $x=333$ метров, а также их сумма в точке 333 метра. 20 пробегов волны. Длина линии $L=1\ 000$ метров.

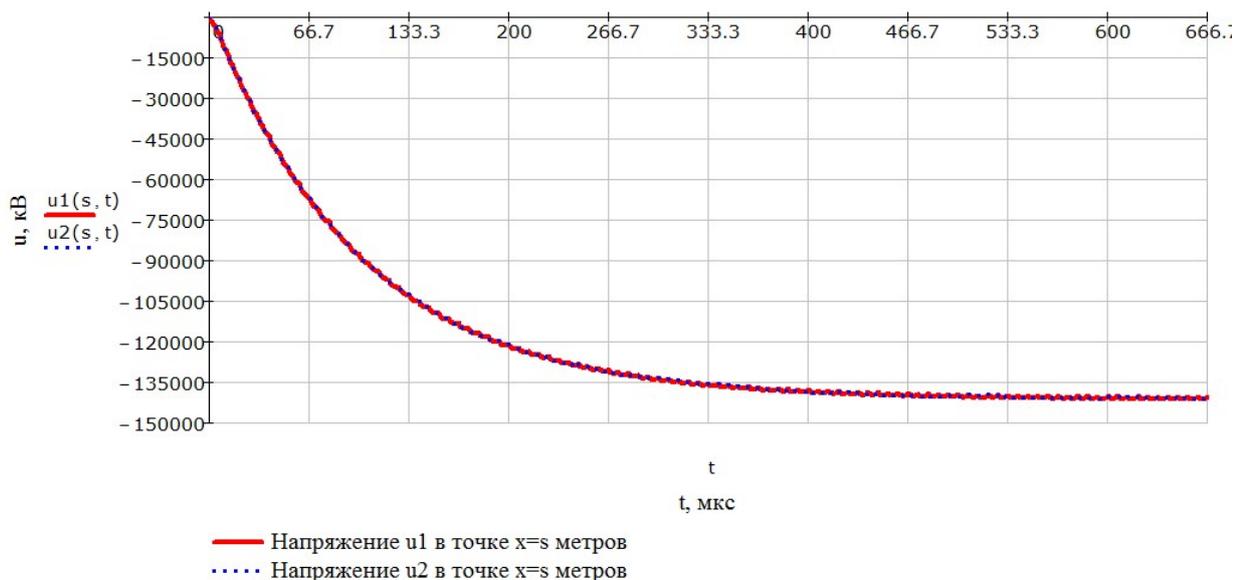


Рисунок 21 - Напряжение u_1 в $x=333$ метров и Напряжение u_2 в $x=333$ метров. 200 пробегов волны. Длина линии 1 000 метров.

Время фронта тока = 4 мкс

Время полуспада тока = 66 мкс.

Напряжение установилось к 260 мкс (4 времени полуспада).

Значение напряжение в установившемся режиме 150 000 кВ.

По сравнению с формой тока в предыдущем расчете (3/25 мкс) время фронта было немного изменено с 4 мкс до 5 мкс при этом время полуспада

было увеличено с 25 мкс до 66 мкс. При этом установившееся значение напряжения значительно увеличилось с 32 000 кВ до 150 000 кВ. Следовательно время полуспада сильно влияет на величину напряжения. Длительность времени достижения установившегося напряжения осталось также равной 4-5 значениям времени полуспада импульса тока.

Резюме:

Было изучено влияние времени фронта импульса тока на величину напряжения. Оказалось, что время фронта не влияет на величину напряжения.

Также рассматривалось влияние времени полуспада импульса тока на величину напряжения и выяснилось, что увеличение времени полуспада приводит к увеличению значения установившегося напряжения. Время нарастания напряжения до установившейся величины везде оказалось равно 4-5 временам полуспада.

1. Если для двух разных импульсов тока их времена полуспада равны, а время $t_{\text{фронта}}$ разные, то напряжение по максимальному значению и времени нарастания получается одинаковым.

2. Если для двух разных импульсов тока их времена фронта равны, а время $t_{\text{полуспада}}$ разные, то напряжение в установившемся режиме получается больше в случае более длинного импульса тока, а время нарастания пропорционально получается больше для более длинного импульса тока и всегда составляет 4-5 времени $t_{\text{полуспада}}$.

Даже, если время $t_{\text{фронта}}$ будет очень малым (очень быстрое нарастание тока), то напряжение не достигнет больших величин – если время полуспада будет не большим.

Итак, величина напряжения в установившемся режиме определяется временем $t_{\text{полуспада}}$ импульса тока.

2 Расчет – Длинная линия. Длина линии 100 километров, точка удара молнии $s=33,3$ километра.

Длина линии $L=100$ км, точка удара молнии $s=L/3=33,3$ км.

Цель: Рассчитать волновой процесс для длинной линии 100 км и определить характер кривой напряжения.

Токи

На рисунке 22 показаны токи в точке $s=33,3$ км. Токи i_1 и i_2 имеют форму одиночных импульсов и повторяют форму импульса тока молнии. Форма токов в случае длинной линии отличается от формы токов для случая короткой линии. В случае короткой линии форма токов обусловлена коротким временем пробега волн от концов, что приводит к скачкообразному изменению формы токов i_1 и i_2 . Для длинной линии время пробега велико и поэтому форма токов не подвержена влиянию многократных отражений волн.

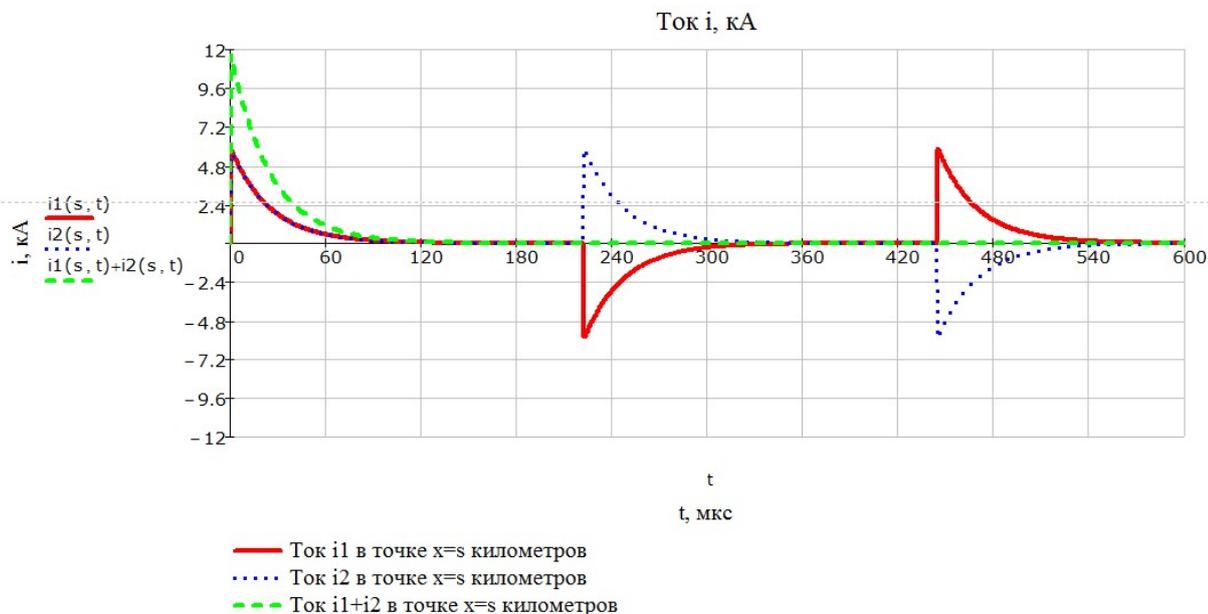


Рисунок 22 - Ток i_1 в $x=33,3$ километров и ток i_2 в $x=33,3$ километров, а также их сумма в точке 33,3 километров. Число пробегов волны – 1,8. Длина линии $L=100$ километров.

Напряжение

На рисунке 23 показаны волны напряжения в точке $x=s$. Они имеют форму одиночных импульсов, более подробно их форма показана на рисунке 3(2). Их величина достигает 4800 кВ, что равно значению $Z_c \cdot I_{\max} = 400 \text{ Ом} \cdot 12 \text{ кА}$. То есть для длинной линии величина напряжений соизмерима с током. Для короткой линии напряжение имеет аperiодический характер и его

величина превышает значение $Z_c \cdot I_{max}$, что обусловлено короткой длиной линии и многократными отражениями волн от концов линии.

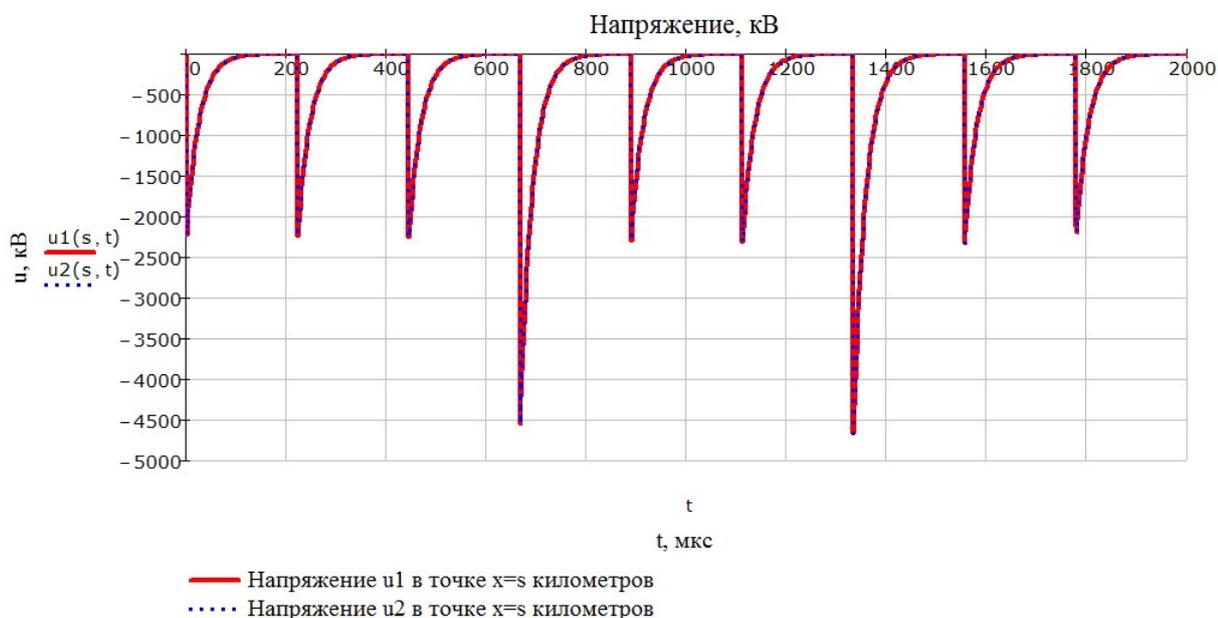


Рисунок 23 - Напряжение u_1 в $x=s$ километров и Напряжение u_2 в $x=s$ километров. Число пробегов волны – 6. Длина линии 100 километров.

Ниже на рисунке 24 показан один импульс напряжения. Время фронта равно 0,3 мкс, время полуспада равно 18 мкс. Эти значения полностью совпадают с импульсом тока молнии. В случае короткой линии время полуспада кривой напряжения апериодической формы составляло 100 мкс и было равно 5 временам полуспада импульса тока.

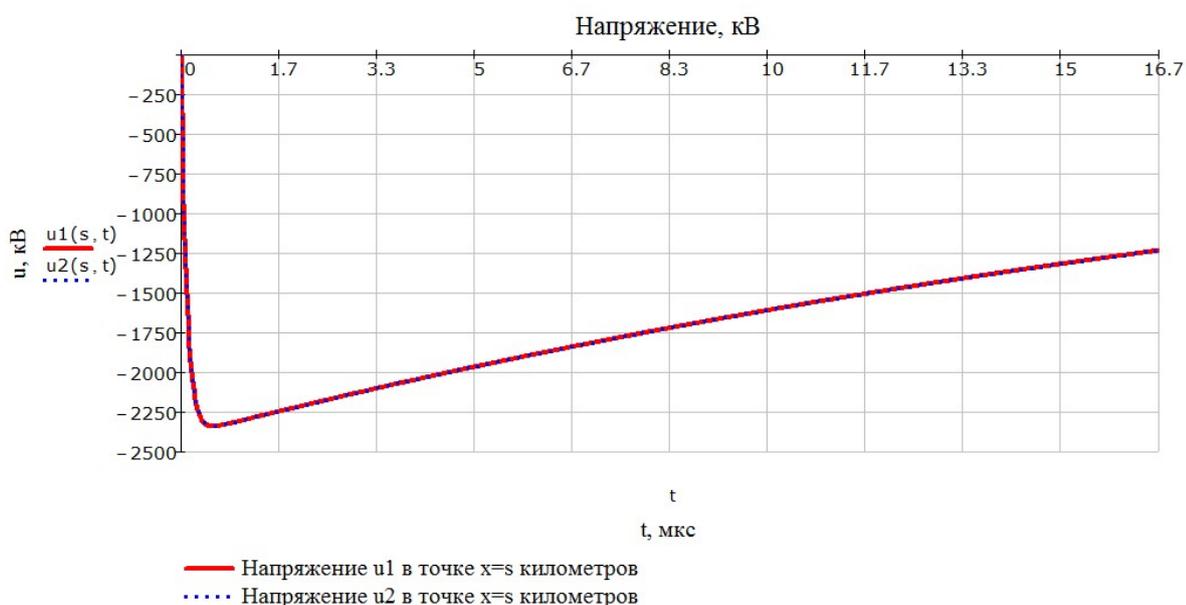


Рисунок 24 - Напряжение u_1 в $x=33,3$ километров и напряжение u_2 в $x=33,3$ километров. Число пробегов волны – 0,05. Длина линии 100 километров.

Напряжения по концам линии показаны на рисунке 25, где все волны напряжения имеют одинаковую форму и величину 4800 кВ. А в точке удара молнии форма импульсов напряжения имела разную величину – 2 из 3 импульсов достигали 2400 кВ, а 1 из 3 достигал 4800 кВ.

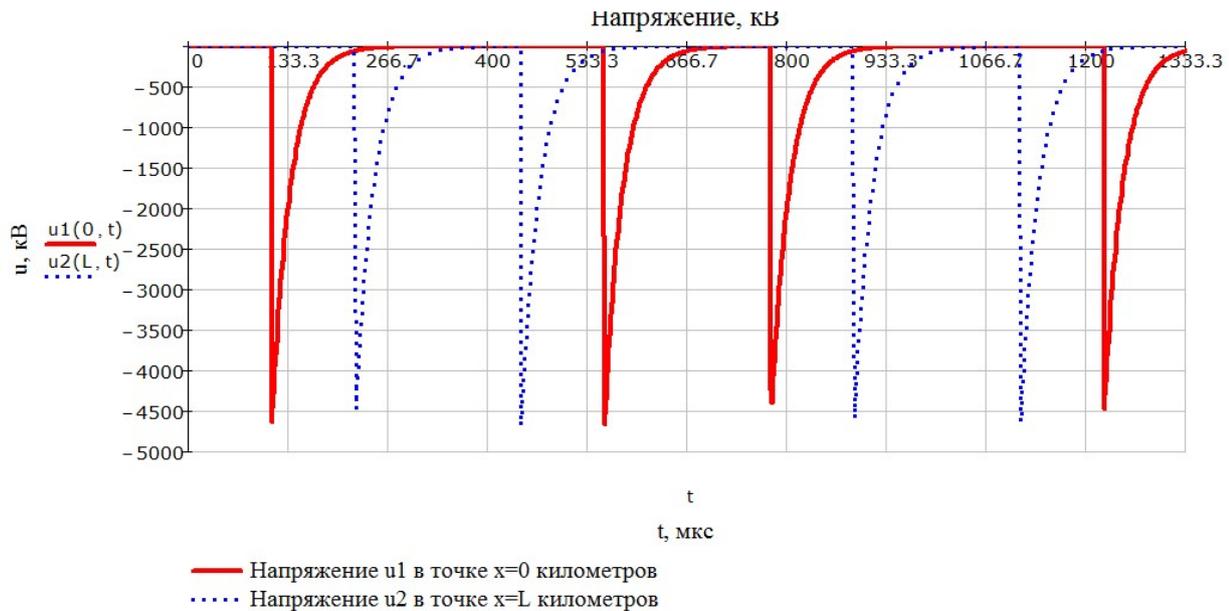


Рисунок 25 - Напряжение u_1 в $x=0$ километров и напряжение u_2 в $x=100$ километров. Число пробегов волны - 4. Длина линии 100 километров.

Волны v и w .

На рисунке 26 показаны волна v в начале и волна w в конце линии.

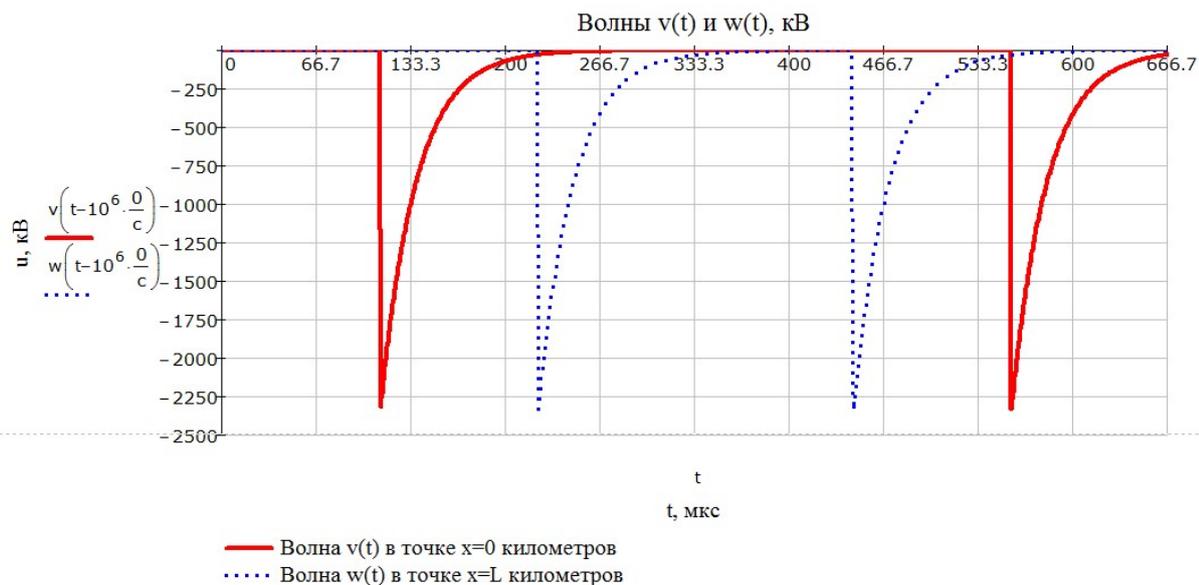


Рисунок 26 – Волна v в $x=0$ километров и волна w в $x=100$ километров.

Число пробегов волны - 4. Длина линии 100 километров.

Волны $w1$ и $v2$

На рисунке 27 показаны волны $w1$ и $v2$ в точке $x=33,3$ км.

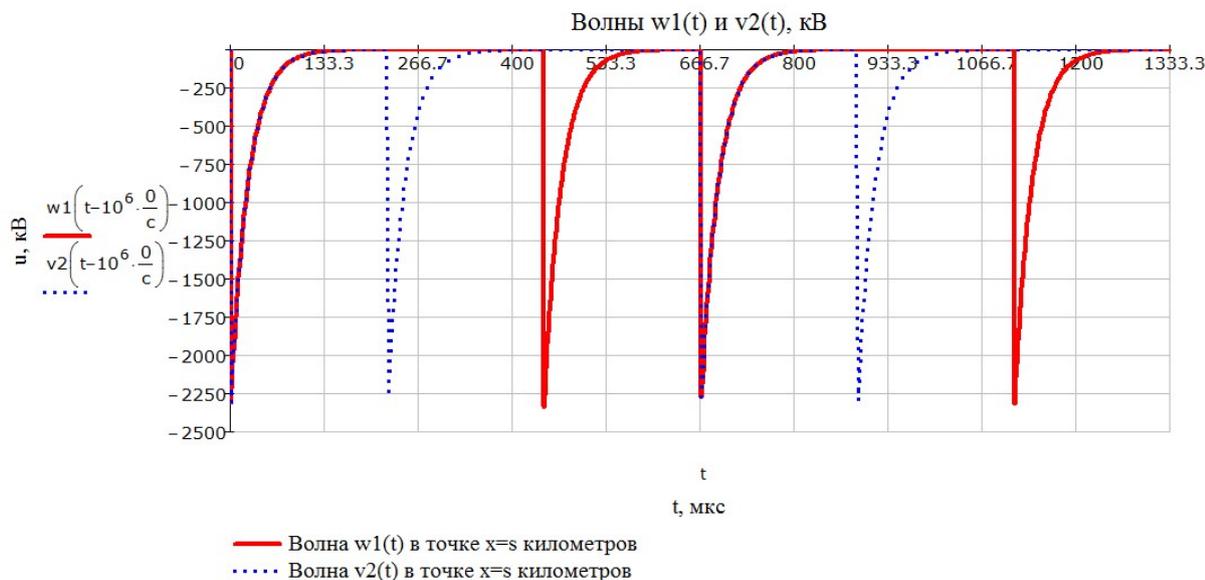


Рисунок 27 – Волна $w1$ в $x=33,3$ километров и волна $v2$ в $x=33,3$ километров. Число пробегов волны - 4. Длина линии 100 километров.

Резюме по двум расчетным случаям для короткой и длинной линии.

1. Для короткой линии (длина $L=1000$ м) напряжение имеет апериодический характер, своего установившегося значения достигает за время равное 4-5 временам полуспада импульса тока. Значение напряжения в установив-

шемся режиме превышает величину $Z_c * I_{max}$, I_{max} – амплитуда импульса тока молнии.

2. Для длинной линии (длина $L=100$ километров) напряжение имеет форму, которая повторяет форму импульса тока молнии по длительности и имеет амплитуду равную $Z_c * I_{max}$. То есть напряжение имеет вид совокупности импульсов периодически повторяющихся во времени.

3. В случае короткой линии было выяснено, что увеличение длины линии приводит к уменьшению значения напряжения, которого оно достигает в установившемся режиме.

4. Было исследовано влияние параметров импульса тока молнии, таких как длительность фронта и время полуспада. На величину напряжения не оказывает влияние изменение длительности фронта тока. Но увеличение длительности времени полуспада приводит к увеличению амплитуды напряжения.

В **четвертой главе** приведено описание цифровой модели для расчета наведенного напряжения при непрямом ударе.

На рисунке 29 схематически показаны линия и источник молнии (наблюдатель смотрит на плоскость XOY сверху (вдоль оси z). Линия расположена в плоскости параллельной плоскости xOy и параллельно оси X (координаты линии: $x=0$ и $x=L$, $y = d$, высота подвеса провода линии $z=h$).

Источник расположен в плоскости xOy (координаты источника $x=s$, $y=0$, $z=0$) расстояние между линией и источником равно d (по оси y).

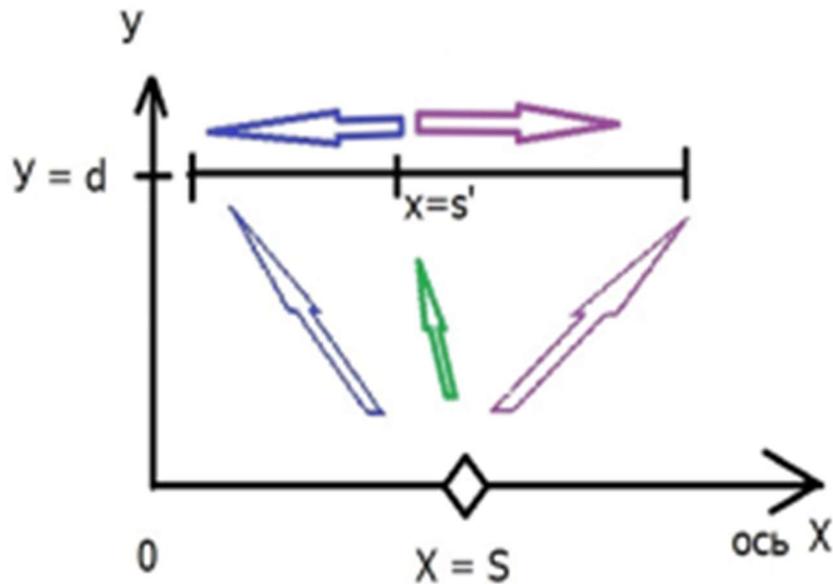


Рисунок 29 – Схема с проекцией линии на плоскость $X0Y$. Ось z перпендикулярна плоскости $X0Y$

Пути распространения электромагнитного поля молнии и пути направления волн по линии:

– 1. Электромагнитное поле молнии распространяется от источника до точки $x=0$ в начале линии за время t_1 (см. рисунок 29) и после этого там возникает волна v .

– 2. ЭМП от места удара молнии распространяется – до точки $x=s'$ на линии за время t_2 (см. рисунок 29). На линии появляется волна w_1 и идет в начало линии.

– 3. Когда волна w_1 достигнет начала линии (от $x=s'$ до $x=0$ за время t_3 (см. рисунок)) – она согласно граничному условию в начале линии ($i=0$) изменит волну v .

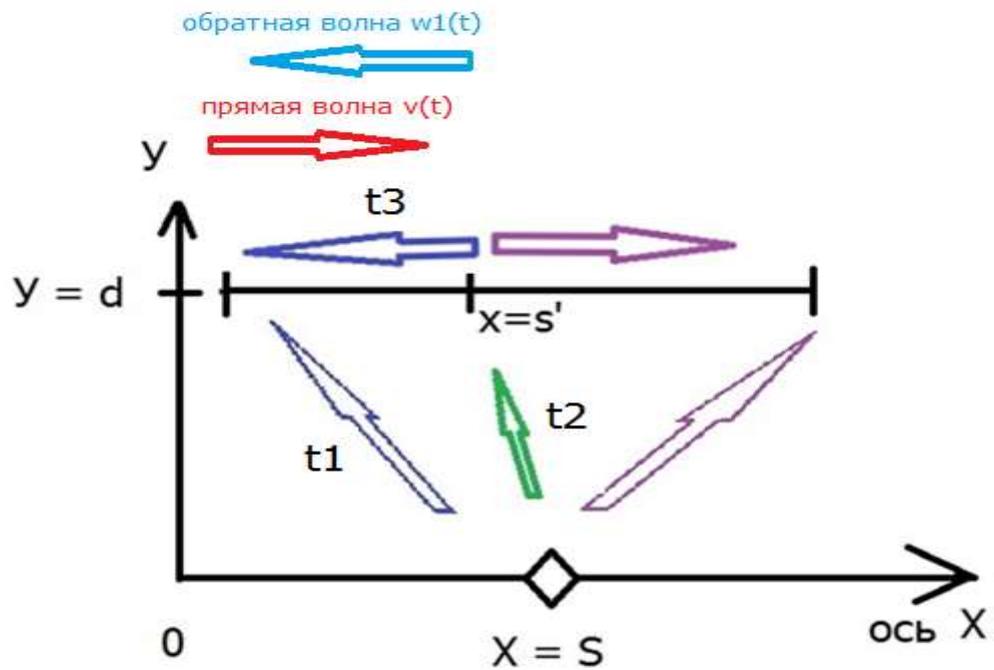


Рисунок 30 – Пути распространения ЭМП молнии (воздух, линия)

Пояснения к алгоритму:

- 1) От $t = 0$ до t_1 волна $v = 0$
- 2) В $t = t_1$ появится волна v
- 3) От $t = t_1$ до $t_2 + t_3$ волна v будет изменяться
- 4) В момент $t = t_2 + t_3$ будет скачок волны v
(из-за пришедшей волны w_1)
- 5) От $t = t_2 + t_3$ и до момента пока снова не придет волна w_1 – волна v будет изменяться.

Резюме: Алгоритм прямого удара отличается от близкого удара молнии тем, что во 2-ом случае ЭМ поле распространяется не только по линии (направление t_3 на рисунке), но и по воздуху (направления t_1 и t_2). И поле молнии наводит напряжение в каждой точке линии сразу, а в случае прямого удара волны создаются только в точке удара.

Уравнения линии для тока:

$$Zc * i1(x, t) = v \left(t - \frac{x}{c} \right) - w1 \left(t - \frac{s-x}{c} \right) + 2 \cdot \int_0^h e_z(x, z, t) dz + \int_0^L \left[e_x(x, h, t) - e_x(x, 0, t) \right] dx \quad (4.1)$$

Уравнения линии для напряжения:

$$u1(x, t) = v \left(t - \frac{x}{c} \right) + w1 \left(t - \frac{s-x}{c} \right) + 2 \cdot \int_0^h e_z(x, z, t) dz + \int_0^L \left[e_x(x, h, t) - e_x(x, 0, t) \right] dx \quad (4.2)$$

Формула для напряжения $u1$ на первом участке записывается через волны v и $w1$. Аналогично для $u2$ используются волны со 2-ого участка ($v2$ и w).

Граничные условия:

$$\begin{aligned} i1(x=0, t) &= 0 & i2(x=L, t) &= 0 \\ u1(x=s, t) &= u2(x=s, t) & i1(x=s, t) + i2(x=s, t) &= 0 \end{aligned}$$

Уравнения для близкого удара молнии содержат интегралы поля, которых нет в уравнениях для прямого удара. И это учитывается при расчете волн $v(t)$ и $w(t)$ – которые рассчитываются исходя из граничных условий линии, но к ним также добавляются интегралы поля. После расчета волн $v(t)$ и $w(t)$ – пересчитываются волны $w1(t)$ и $v2(t)$.

Итак, в ходе решения волновых уравнений получены формулы для расчета волн:

$$v2(t) = v2(t-2*L/c) - Zc/2 * i(t-2*s/c) - Zc/2 * i(t) - F(0,t-s/c)/2 - F(L,t-(L-s)/c)/2 - F(0,t-3*s/c)/2 - F(L,t-(L+s)/c)/2 + F(s,t) + F(s,t-2*s/c) \quad (4.3)$$

$$w1(t) = w1(t-2*L/c) - Zc/2 * i(t-2*(L-s)/c) - Zc/2 * i(t) - F(0,t-s/c)/2 - F(L,t-(L-s)/c)/2 - F(0,t-(2*L-s)/c)/2 - F(L,t-3(L-s)/c)/2 + F(s,t) + F(s,t-2*s/c) \quad (4.4)$$

$$w(t) = v2(t - (L-s)/c) \quad (4.5)$$

$$v(t) = w1(t - s/c) \tag{4.6}$$

Параметры линии: длина 10 км, высота 10 метров, $Z_{волн} = 400 \text{ Ом}$

Параметры молнии: $t_{фронта} = 0,4 \text{ мкс}$, $t_{спада} = 18 \text{ мкс}$, $I_{max} = 12 \text{ кА}$,
 $v = c/2$ – скорость движения тока молнии.

$s=5 \text{ км}$ – точка на линии, напротив канала с молнией, $d = 20 \text{ метров}$ – дистанция между линией и молнией.

Рисунок 31 показывает напряжение в точке $x=5 \text{ км}$. Рисунок 32 показывает напряжение в начале и в конце линии.

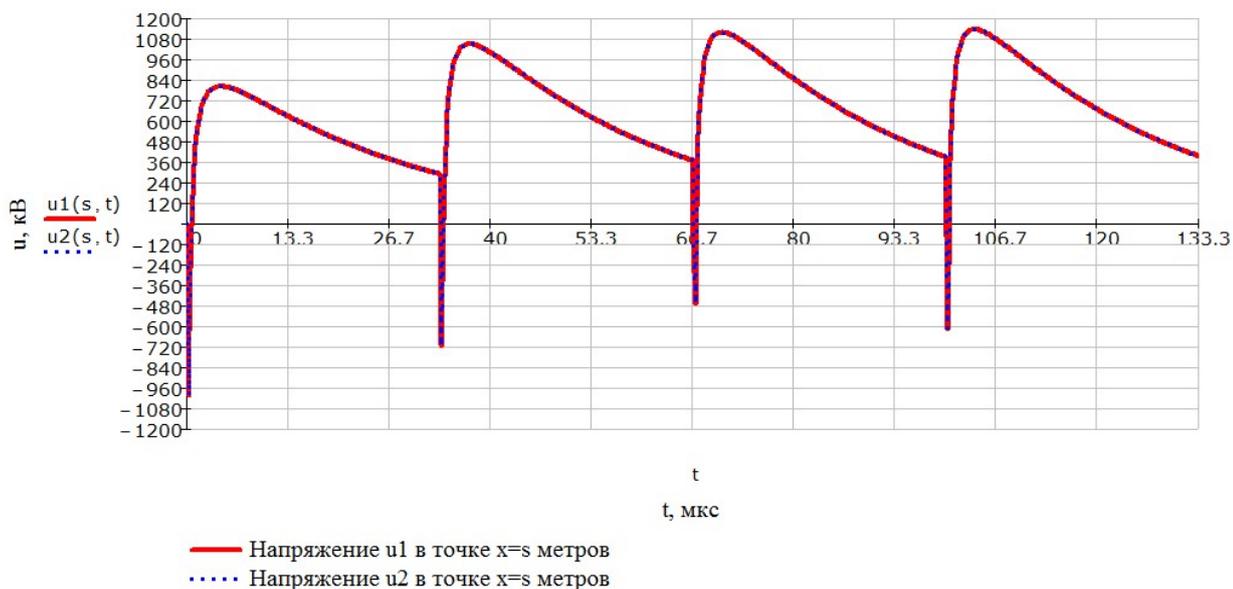


Рисунок 31 – Напряжение $u1$ и $u2$ в $x=5 \text{ 000}$ метров. Длина линии $L=10$ километров.

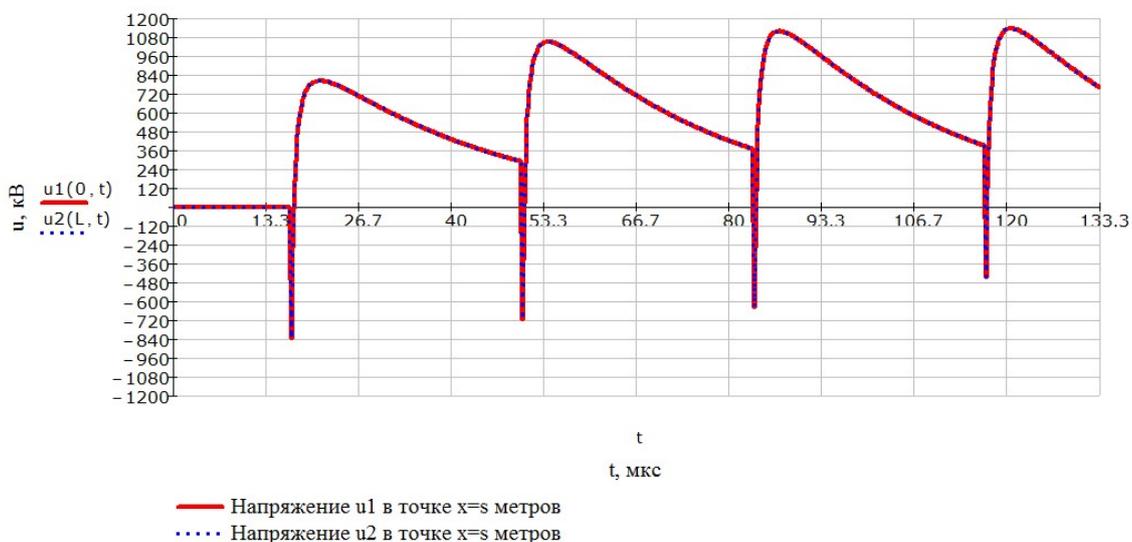


Рисунок 32 – Напряжение u_1 в начале линии и u_2 в конце линии. Длина линии $L=10$ километров.

Рисунок 33 показывает волны v и w в точке $x=5$ км. Рисунок 34 показывает волны v и w в начале и в конце линии.

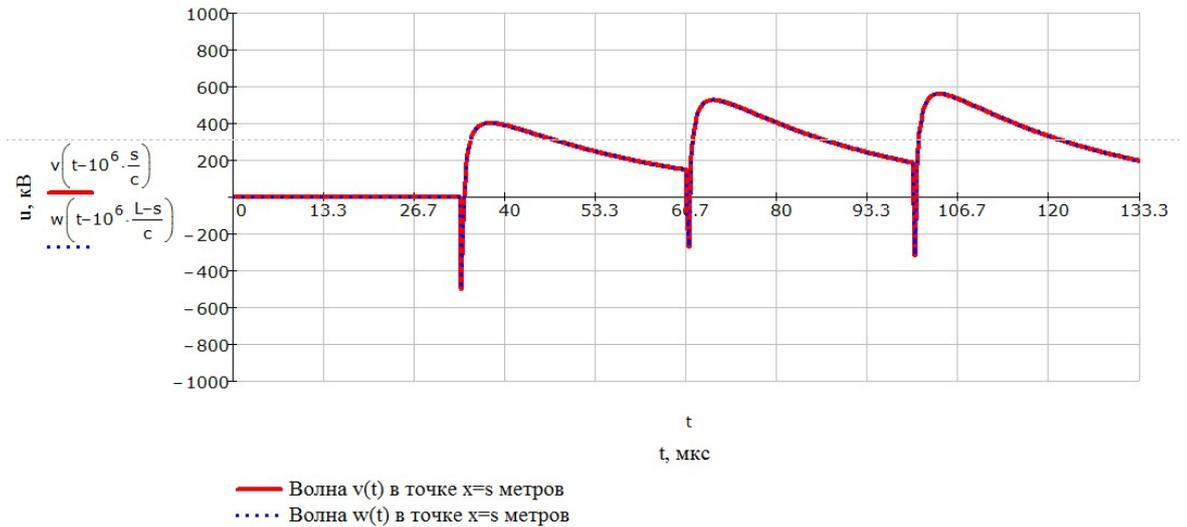


Рисунок 33 – Волны v и w в $x=5$ 000 метров. Длина линии $L=10$ километров.

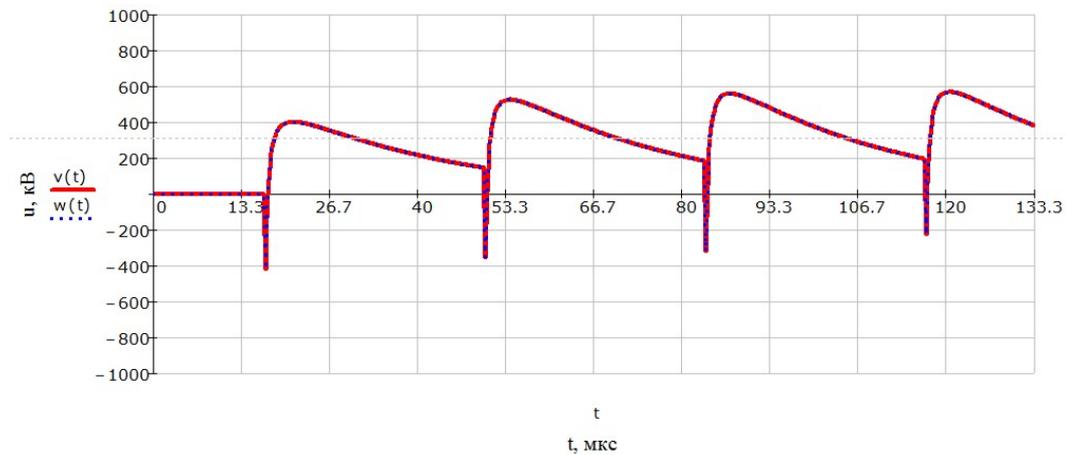


Рисунок 34 – Волны v и w в начале и в конце линии. Длина линии $L=10$ километров.

Рисунок 35 показывает волны v_2 и w_1 в точке $x=5$ км. Рисунок 36 показывает волны v_2 и w_1 в начале и в конце линии.

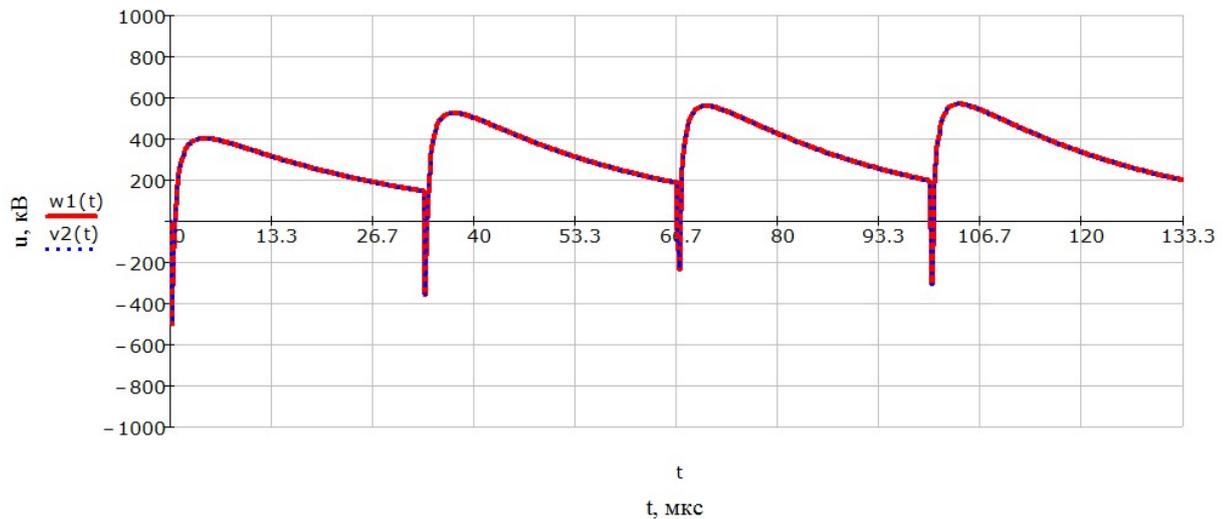


Рисунок 35 – Волны $v2$ и $w1$ в $x=5\ 000$ метров. Длина линии $L=10$ километров.

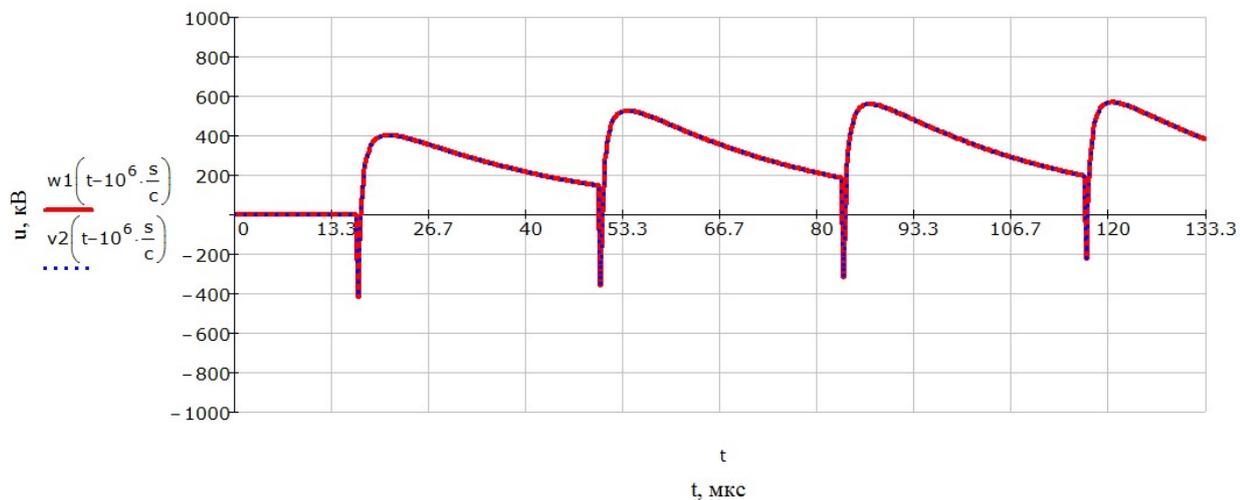


Рисунок 36 – Волны $v2$ и $w1$ в начале и в конце линии. Длина линии $L=10$ километров.

Заключения полученные при описании волновых процессов происходящих при прямом ударе молнии в линию и описанные в главе три также соответствуют и расчетам выполненным в модели для оценки наведенного напряжения. Выводы касаются влияния длительности фронта импульса тока и длительности времени полуспада на величину напряжения, влияния длины линии на характер кривой напряжения. Также процесс наложения волн при их многократном отражении от концов линии приводит к нарастанию напряжения.

В пятой главе представлен расчет наведенного напряжения на объекте ограниченных размеров – на металлической рамке. Выполнено сравнение результатов расчетов наведенного напряжения в рамке по двум упрощенным методикам. Первая методика не учитывает распределение индукции B внутри рамки, а вторая учитывает неравномерность индукции. Во второй методике также предусмотрен учет изменения тока молнии по координате z , т.к. без него результаты по двум методикам были бы практически одинаковыми.

Также в главе приведены расчеты по наиболее точному методу определения наведенного напряжения, при котором одновременно используется волновой метод и изменение тока молнии по координате z .

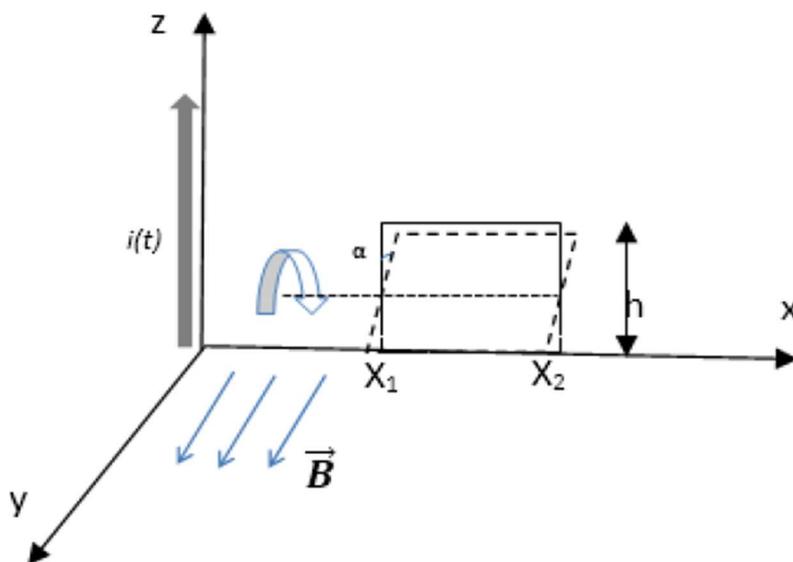


Рисунок 37 – Схема расположения рамки и системы координат

На рисунке 37 канал с молнией и током $i(t)$ и рамка расположены в одной плоскости. Расстояние от канала до ближайшей стороны рамки (по оси x) равно x_1 , до дальней стороны рамки равно x_2 . Высота рамки h , ширина рамки x_2-x_1 .

Ниже в расчетах используются и сравниваются две формулы.

Первая формула – упрощенная формула, которая не учитывает распределение магнитной индукции внутри рамки

$$u = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{di}{dt} \cdot h \cdot \ln\left(\frac{x_2}{x_1}\right) \quad (5.1)$$

Упрощенная формула (5.1) получена с помощью закона электромагнитной индукции (ЭМИ). С ее использованием для бесконечно длинного проводника и заданного тока $i(t)$ путем простейших преобразований получим:

$$u(t) = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (5.2)$$

$$u(t) = - \frac{d \int B dS}{dt} \quad (5.3)$$

$$B(x, t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i(t)}{x} \quad (5.4)$$

$$u(t) = - \frac{d \int_{x_1}^{x_2} \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{i}{x} \cdot h \cdot dx}{dt} \quad (5.5)$$

$$u(t) = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{di}{dt} \cdot h \cdot \ln \left(\frac{x_2}{x_1} \right) \quad (5.6)$$

Вторая формула, учитывающая распределение индукции по рамке и изменение тока молнии по координате z (индукция вычисляется непосредственно в каждой точке внутри рамки):

$$u = \frac{d}{dt} \cdot \int_{z_1}^{z_2} \int_{x_1}^{x_2} B(z, x) dx dz \cdot \cos(\vec{B}, \vec{n}) \quad (5.7)$$

Расчет напряжения по формуле (5.7) выполнялся с помощью численно-аналитического алгоритма, который кратко можно описать следующим образом:

Задается выражение для магнитной индукции B , которое рассчитывается с учетом точечных элементов тока:

$$B(x, z, y, t, z') = \frac{\mu_0 \cdot dz'}{4 \cdot \pi} \cdot \left[\frac{r}{c \cdot R^2} \frac{\partial i \left(t - \frac{R}{c} \right)}{\partial t} + \frac{r}{R^3} i \left(t - \frac{R}{c} \right) \right] \quad (5.8)$$

где z' – положение заряда в канале с током.

В расчетах используется модель канала молнии с током, он моделируется совокупностью точечных элементов тока. Для учета всей совокупности этих элементов необходимо проинтегрировать магнитную индукции B (со-

здаваемую одним элементом) по всему каналу с током (от $z=0$ до $z=v*t$). Верхний предел интегрирования зависит от t , так как верхняя координата канала постепенно увеличивается за счет движения элемента тока.

Требуемое значение индукции от всей совокупности элементов тока в канале вычисляется следующим образом:

$$B(x, y, z, t) = \int_0^{v*t} B(x, z, y, t, z') dz' \quad (5.9)$$

Далее численно определяется магнитный поток и напряжение согласно (5.7).

При вычислении индукции $B(x, y, z, t)$ используется формула, в качестве которой используется модель тока молнии $i(t)$ в виде канала, который постепенно заполняется зарядами.

Ток $i(t)$ задается в виде двухэкспоненциальной формы.

$$t_1 = 0,1 \text{ мкс}; \quad t_2 = 25 \text{ мкс}; \quad I_{max} = 12 \text{ кА}$$

$$i(t) = I_{max} * (e^{-\alpha*t_1} - e^{-\beta*t_2}) \quad (5.10)$$

Ниже приведены расчеты наведенного напряжения на рамке по двум методикам.

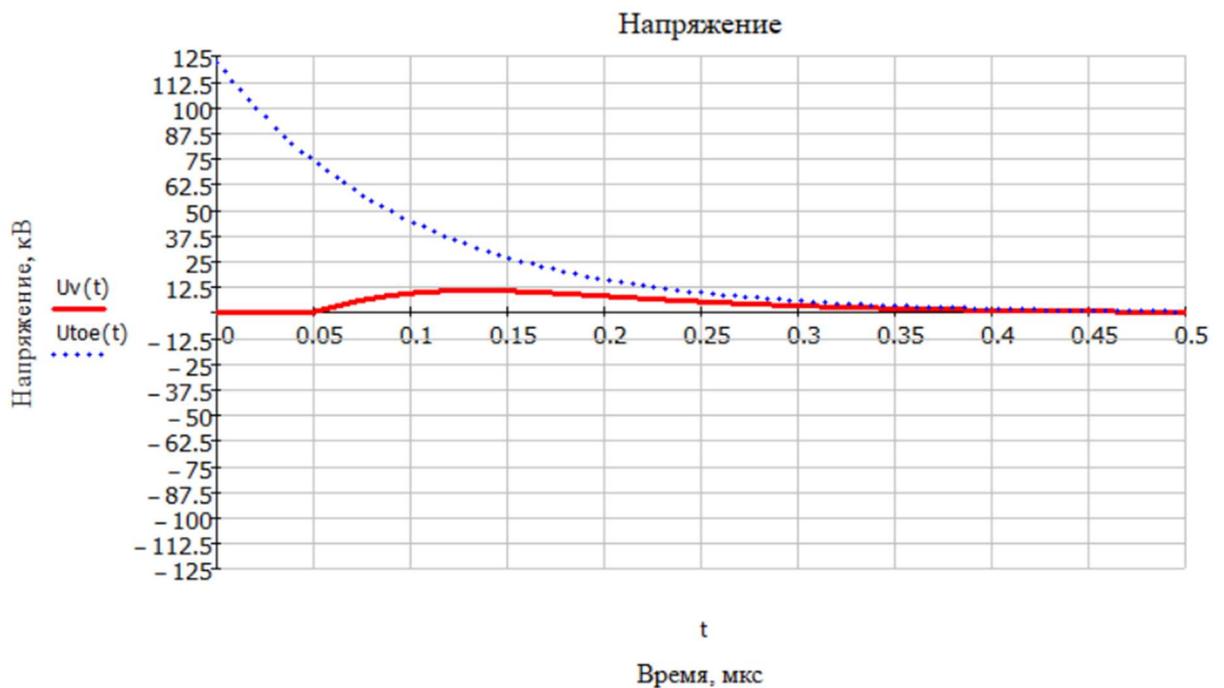


Рисунок 38 – Сравнение наведенного напряжения для формулы (5.7) (красный цвет) и методики (5.1) (точечный рисунок). От канала молнии до середины рамки 20 метров, высота и ширина рамки 10 метров. Скорость изменения тока в канале $v=c/2$.

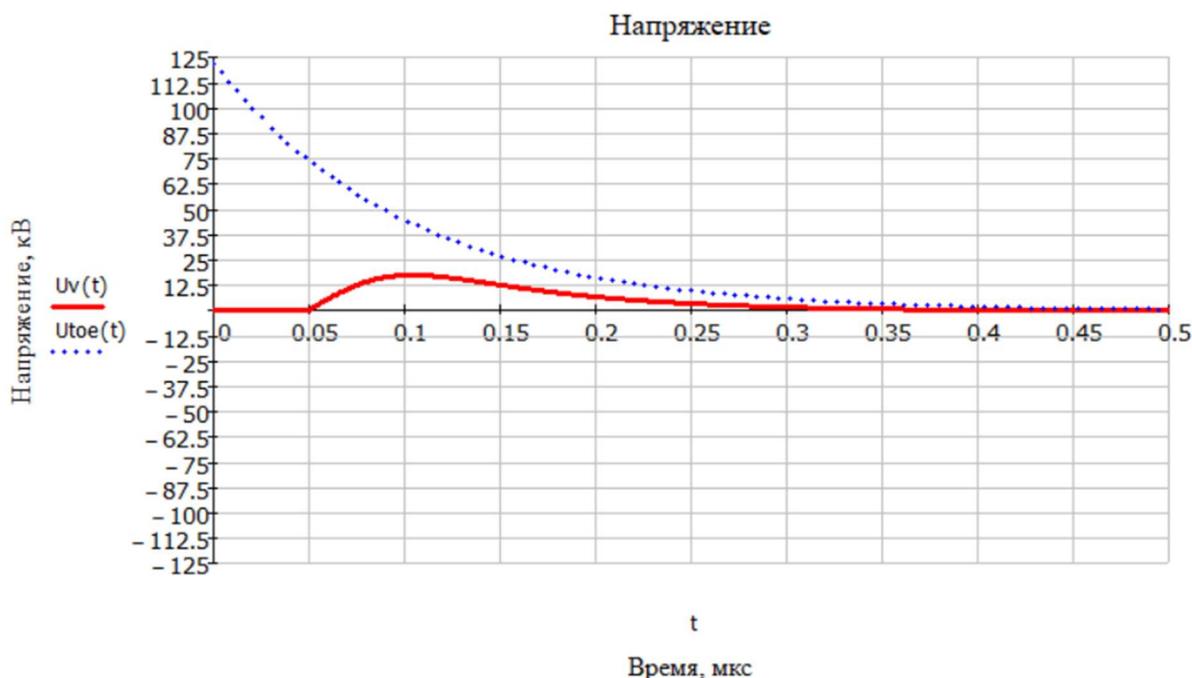


Рисунок 39 – Сравнение наведенного напряжения для формулы (5.7) (красный цвет) и методики (5.1) (точечный рисунок). От канала молнии до середины рамки 20 метров, высота и ширина рамки 10 метров. Скорость изменения тока в канале $v=c$.

Видно, что правильный учет скорости движения разряда приводит к изменению величины напряжения - чего не наблюдается при использовании упрощенной формулы.

1. Кривая на графике (рисунки 38 и 39, точечный рисунок) рассчитана по методике (5.1), которая не учитывает распределение магнитной индукции внутри рамки. Кривая на графике (рисунки 38 и 39, сплошная линия) рассчитана по методике (5.7), учитывающей распределение индукции по рамке и скорость изменения тока молнии во времени и координаты z.

2. Кривые для методики (5.1), в которой нет учета скорости v изменения тока вдоль координаты совпадают между собой.

3. Кривые напряжения, построенные по формуле с учетом движения канала молнии, отличаются друг от друга. Учет различия в скорости приводит к изменению наведенного напряжения: для скорости $v=c/2$: $u=12,5$ кВ, а для скорости $v=c$: $u=20$ кВ.

4. Кривые напряжений по двум методикам затухают до нуля за одинаковое время. Время составляет $0,35$ мкс.

5. Кривая напряжения, полученная с учетом конечной скорости v начинается с нулевого значения и появляется с запаздыванием. Это время необходимо, чтобы полю преодолеть расстояние от молнии до рамки. Напряжение на рамке растет постепенно ввиду конечной скорости изменения тока молнии во времени вдоль координаты z (происходит постепенное заполнение канала молнии зарядами (заполнение увеличивается с течением времени)).

6. Кривая напряжения по упрощенной методике (5.1) начинается скачкообразно в $t=0$ со значения 125 кВ. Это обусловлено тем, что в данной модели вместо постепенно возрастающей длины канала с током молнии используется модель бесконечно длинного канала, который мгновенно с бесконечно большой скоростью заполнился заданным током (зарядами) и, который навел напряжение на рамке. Кроме того, существенную ошибку привносит и неучет конечной скорости распространения электромагнитного поля от канала молнии до рамки. Подобный метод определения наведенного напряжения дает весьма грубое приближение к реальной картине явления как по форме, так и по величине и, к сожалению, такой подход можно встретить даже у таких известных авторов как Г. Александров [13] и Э. Базелян [12].

7. Однако и в методике (5.7) изменение потенциала u вдоль координаты x происходит с бесконечно большой скоростью, что при малых фронтах импульса тока молнии также приводит к существенной ошибке в параметрах наведенного напряжения.

Далее выполнен расчет наведенного напряжения в рамке (в пролете ВЛ), выполненного по методике, в которой одновременно используется волновой метод и изменение тока молнии по координате z .

Расчет напряжения осуществляется по методике, описанной в главе четыре. Напряжение на рамке вычисляется как разность напряжений в двух соседних точках. Длина линии по обе стороны рамки предполагается бесконечно длинной (в расчетах по 5000м слева и справа от рамки, ширина рамки 10м).



Рисунок 40 – Схема расположения канала с молнией и рамки

На рисунке 40 источник молнии находится в точке $x = 5000$ метров, $y=0$ метров и расположен напротив середины линии. Координаты линии: начало в $x=0$ метров, конец в $x=L=10\ 000$ метров, высота линии $h=10$ метров, дистанция между молнией и линией равна 20 метрам.

Рамка расположена в середине линии (крайние точки рамки берутся как 2 точки на линии). Координаты рамки $x_1 = 5000$ метров, $x_2 = 5010$ метров (ширина 10 метров), высота $h=10$ м. Расстояние от рамки до канала молнии: $d = 20$ метров.

В расчетах отражения волн от концов линии за время расчета наведенного напряжения не учитываются независимо от граничных условий по концам линии.

Ток $i(t)$ задается в виде двухэкспоненциальной формы.

$$i(t) = I_{max} * (e^{-\alpha*t1} - e^{-\beta*t2}) \quad (5.11)$$

Для расчета наведенного напряжения используется метод бегущих волн с расчетом прямой и обратной волны вдоль линии, обусловленного каналом молнии.

Первый расчет выполнен для скорости изменения тока молнии по координате z со скоростью $v=c/2$.

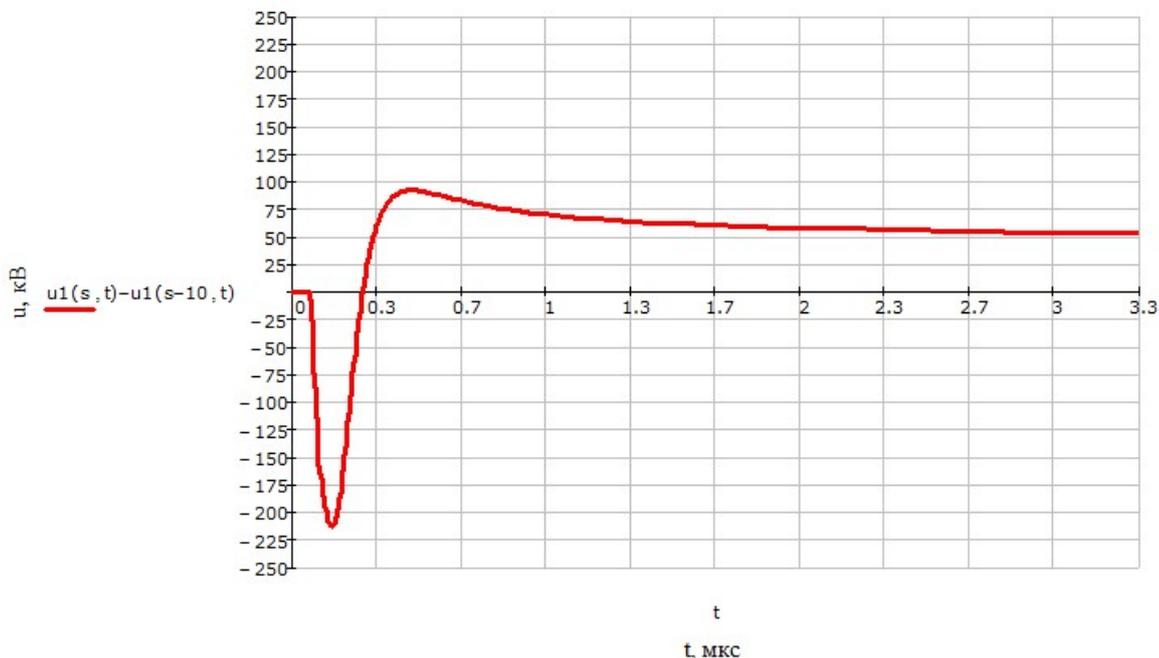


Рисунок 41 – Расчет напряжения методом бегущих волн. Напряжение на рамке. Дистанция между молнией и линией равна 20 метрам, высота и ширина 10 метров. Скорость изменения тока молнии по координате z : $v=c/2$. Время фронта тока 0,4 мкс.

На рисунке 41 показана разность напряжений в 2-х точках линии, расположенных на расстоянии 10 метров, для скорости $v=c/2$. Амплитуда тока 12 кА, времени фронта тока 0,4 мкс, время полуспада 18 мкс. Максимальное напряжение достигает величины -210 кВ.

На рисунке 42 увеличение времени фронта до 2 мкс приводит к уменьшению величины напряжения. В данной расчете амплитуда тока 12 кА, времени фронта тока 2 мкс, время полуспада 18 мкс.

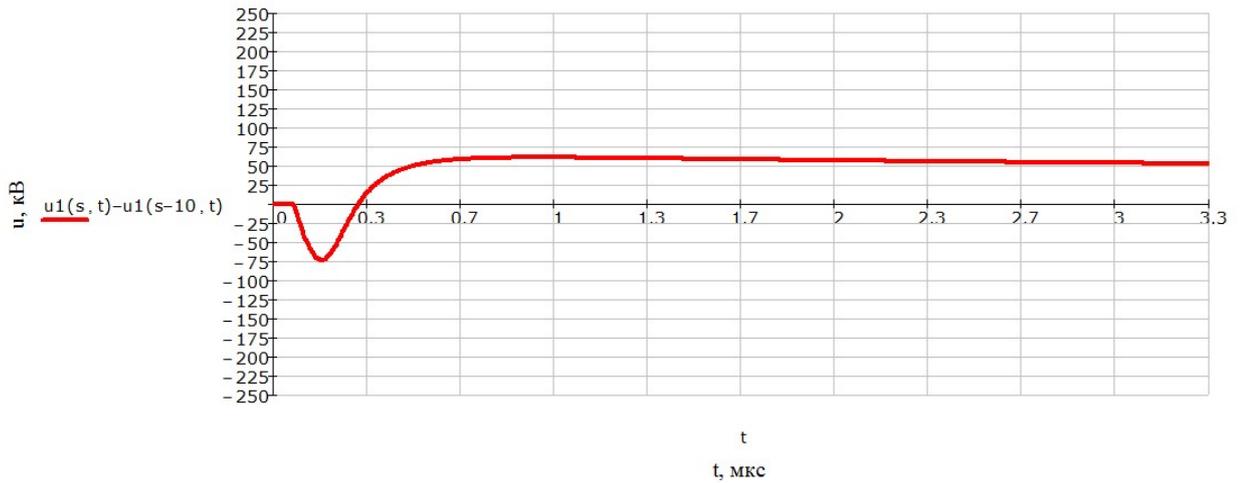


Рисунок 42 – Расчет напряжения методом бегущих волн. Напряжение на рамке. Дистанция между молнией и линией равна 20 метрам, высота и ширина 10 метров. Скорость изменения тока молнии по координате z : $v=c/2$. Время фронта тока 2 мкс.

Рисунки 41 и 42 показывают, что при увеличении времени фронта тока отрицательный максимум напряжения уменьшается по амплитуде и смещается вправо.

Вторая серия расчетов выполнена для скорости изменения тока молнии по координате z со скоростью $v=c$.

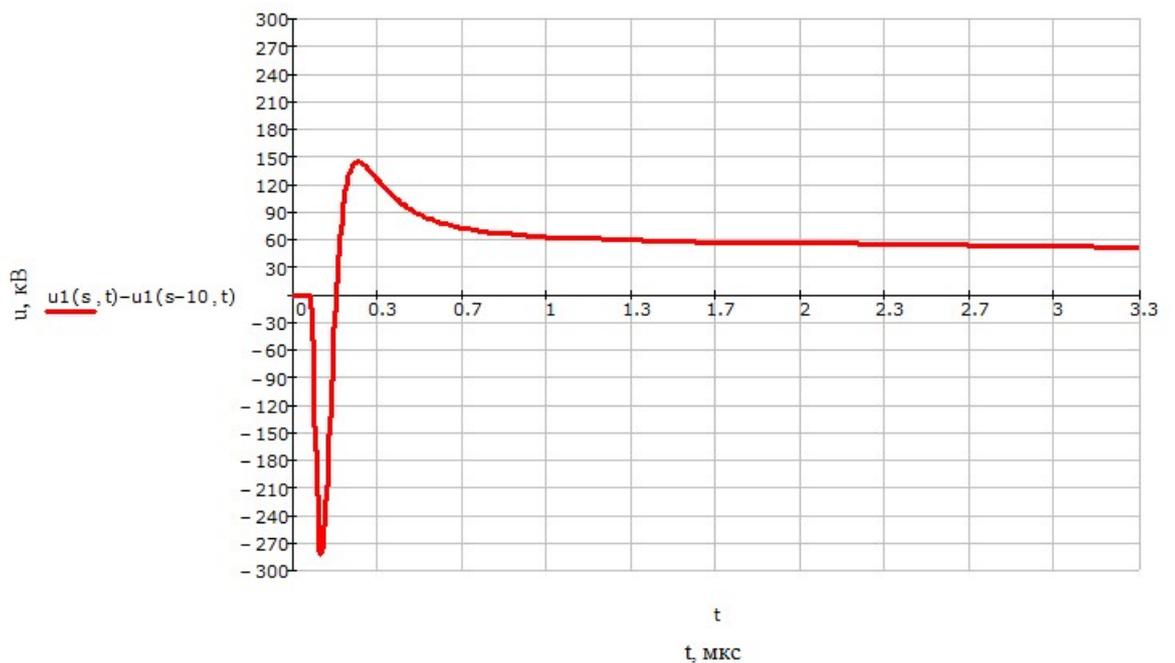


Рисунок 43 – Расчет напряжения методом бегущих волн. Напряжение на рамке. Дистанция между молнией и линией равна 20 метрам, высота и ширина 10 метров. Скорость изменения тока молнии по координате z : $v=c$.

На рисунке 43 показана разность напряжений в 2-х точках линии, расположенных на расстоянии 10 метров, для скорости $v=c$. Амплитуда тока 12 кА, времени фронта тока 0,4 мкс, время полуспада 18 мкс. Максимальное напряжение достигает величины -280 кВ.

На рисунке 44 увеличение времени фронта до 2 мкс для расчета при $v=c$, также как и для скорости $v=c/2$ приводит к уменьшению величины напряжения. Амплитуда тока 12 кА, времени фронта тока 2 мкс, время полуспада 18 мкс.

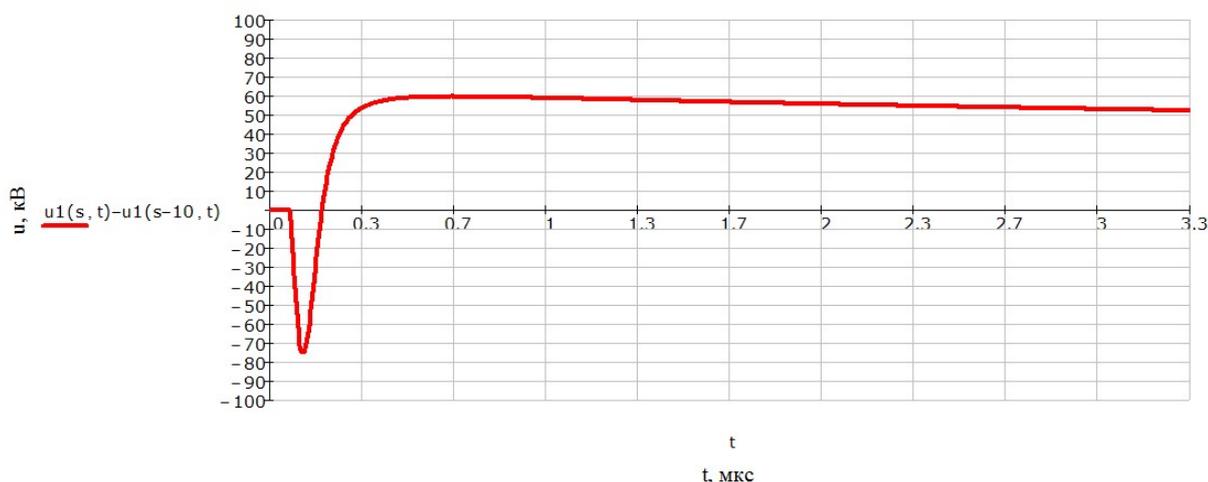


Рисунок 44 – Расчет напряжения методом бегущих волн. Напряжение на рамке. Дистанция между молнией и линией равна 20 метрам, высота и ширина 10 метров. Скорость изменения тока молнии по координате z : $v=c$.

Время фронта тока 2 мкс.

Расчет напряжения в рамке по формуле (5.7) с учетом скорости v (когда индукция рассчитывается в каждой точке внутри рамки) и по методу бегущих волн показал, что значения для метода бегущих волн в 10 раз выше, чем для формулы (5.7).

Отличительной особенностью оценки напряжения на рамке, с учетом волновой природы распределения токов и напряжений вдоль проводов ВЛ, которые изображены на рисунках 41 и 43, является наличие в первый момент

импульса напряжения значительной величины, вызванного большой производной тока молнии при временах t меньше времени фронта. Изменения знака производной и снижение ее величины при t больше времени фронта приводит к изменению знака и величины наведенного напряжения.

Существенное влияние фронта импульса тока молнии на форму и величину наведенного на рамке напряжения можно видеть на рисунках 42 и 44, где фронт тока молнии принят большим: время фронта=2 мкс. Заметим, что форма и величина напряжения на рамке по методике (5.1) (рисунки 38 и 39, где весь процесс определяется производной тока в $t=0$) ничего не имеет общего с результатом, полученным на рисунках 41-44.

Заключение

Работа посвящена созданию расчетной математической модели, позволяющей получить распределение напряжения, которое индуцируется при разряде молнии вблизи линии. В отличие от прямых ударов молнии, близкие удары молнии не опасны для силового оборудования высокого напряжения и для изоляции воздушных линий высокого напряжения. Однако они представляют опасность для воздушных линий низкого напряжения, цепей управления, контроля и защиты, так как наведенное напряжение от ЭМП молнии достигает уровней, способных повредить указанное оборудование.

В начале данного исследования были рассмотрены атмосферные явления, приводящие к образованию разрядов молнии, а также описаны проблемы развития грозовых облаков, проведено описание процесса разряда между облаком и землей, который состоит из различных стадий развития лидерного и обратного разряда молнии. Указаны методы определения параметров тока молнии, охарактеризованы общие вопросы защиты линий электропередачи.

Для оценки уровня напряжения при воздействии ЭМП молнии было решено:

1) Обоснованы параметры тока молнии при обратном разряде с учетом запаздывания по времени волны тока.

2) Решены уравнения Максвелла, используя понятия векторного и скалярного полей. Найдены компоненты электромагнитного поля молнии в заданной точке вокруг источника молнии с учетом взаимной ориентации линии и молнии.

3) Обоснованы вид телеграфных уравнений, содержащих правую часть, которая учитывает электромагнитное влияние источника молнии. Выражены уравнения через компоненты электрического поля. Решены полученные выражения для напряжения линии.

4) Создана математическая модель для расчета напряжения при прямом ударе молнии.

5) Реализован алгоритм в вычислительном комплексе Mathcad для оценки уровня напряжения. Проведена серия расчетов волновых процессов на линии для различных характеристик молнии.

6) Проведено сравнение результатов, которые получены с помощью методики из данного исследования, и с методиками, используемым в других работах.

Таким образом, в работе разработана методика для оценки уровня напряжения при воздействии ЭМП молнии с учетом параметров линии и молнии.

Показанные расчеты могут стать частью методики по комплексному определению наведенных напряжений на линии электропередачи от воздействия молнии. Разработанная методика может быть использована в проектной деятельности и в научно-исследовательских организациях при решении задач повышения характеристик работы электрооборудования и развития энергосистем.

Подтверждены актуальность темы исследования, необходимость проведения расчетов по оценке наведенного напряжения и дальнейшему уточнению математической модели. Исследования в области моделирования и расчета наведенного напряжения направлены на решение сложной электромагнитной задачи, связанной с расчетом ЭМП от тока молнии, уточнением модели тока молнии и его параметров, учетом параметров воздушной линии. Решение указанных проблем и точное моделирование механизма появления наведенного напряжения за счет ЭМП молнии позволят оценить потенциальный ущерб от воздействия молнии, подобрать необходимое защитное оборудование и повысить надежность электроснабжения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ, СОДЕРЖАЩИХ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Статьи в изданиях, индексируемых в международных реферативных базах цитирования Scopus и Web of Science:

1. G. A. Evdokunin, N. N. Petrov, Lightning-induced voltage on overhead lines, 2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference 2-3 февраля 2016 года. DOI:10.1109/EIConRusNW.2016.7448243.

2. G. A. Evdokunin, N. N. Petrov, Analytical-numerical solution of electromagnetic equations for calculation lightning-induced voltage on overhead transmission line, 2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, 1-3 февраля 2017 года. DOI:10.1109/EIConRus.2017.7910786

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разевиг Д.В. Техника высоких напряжений. М.: Энергия, 1964.- 471 с.
2. A. Andreotti, D. Assante, F. Mottola, L. Verolino, An Exact Closed-Form Solution for Lightning-Induced Overvoltages Calculations. IEEE Trans. Power Del., 24(3), pp.1328-1343, Jul. 2009.
3. C. Taylor, R. Satterwhite, C. Harrison Jr. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field, IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-13, no. 6, pp. 987–989, Nov. 1965.
4. M. J. Master, M. A. Uman, Electric and magnetic fields associated with establishing a finite electrostatic dipole: an exercise in the solution of Maxwell's equations, Amer. J. Phys., vol. 51, pp. 118-126, 1983
5. Демирчян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 3. 4-е изд. СПб: Питер. 2003. 377 с.: ил.
6. C.A. Nucci. Lightning-induced voltages on overhead power lines. Part I: return stroke current models with specified channel-base current for the evaluation of the return stroke electromagnetic fields. Electra, No. 161, pp. 74-102, August 1995.
7. Nucci C.A., "Lightning-induced voltages on overhead power lines. Part II: Coupling models for the evaluation of the induced voltages", Electra, No. 162, pp. 121-145, Oct. 1995
8. Новгородцев А.Б. Теория электромагнитного поля. С.-Пб.: СПбГТУ, 1998. 228с.
9. Nucci C.A., Rachidi F., Ianoz M.V., Mazetti C. Lightning-induced voltages on overhead lines. IEEE Transaction on electromagnetic compatibility, vol No 35 February 1993.
10. Master M.J., Uman M.A. Lightning-induced voltages on power lines: theory. IEEE Transaction on power apparatus and systems, No. 9. September 1984.

11. ПУЭ «Правила устройства электроустановок. Издание 7» Приказ Минэнерго РФ №204 от 08.07.2002 «Об утверждении глав Правил устройства электроустановок».

12. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. М.: Физматлит. 2001. 320 с.

13. Александров Г.Н. Молния и молниезащита. отв. редактор В.Н. Козлов]. Ин-т электрофизики и электроэнергетики РАН. М.:Наука. 2008. 274 с.

14. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: учебник для электротех., энерг., приборостроит. Спец. вузов. 8-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк. 1986. 263 с.: ил.

15. S. Rusk, Induced lightning overvoltages on power transmission lines with special reference to the over-voltage protection of low voltage networks, Royal Institute of Technology, PhD Thesis, Stockholm 1957.

16. Hoidalén H. K., Calculation of lightning-induced voltages in models including lossy ground effects, IPST 2003. New Orleans. USA.

17. Izadi M., M. Z. A. Ab Kadir, Hajikhani M. Considering on lightning electric fields in presence of ground reflection at non-perfect ground. Journal of electrical engineering. vol. 65. №4. 2014. pp.242–247

18. Izadi M., M. Z. A. Ab Kadir, Hajikhani Ground reflection effect on the lightning electromagnetic fields. 22nd International Conference on Electricity Distribution Stockholm. 10-13 June 2013

19. Дмитриев В.Л., Дмитриев М.В. Параметры разряда молнии в задачах грозозащиты. журнал “Известия РАН: Энергетика”. 2005. №4. С.54-61.