

КАНДАЛОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ
ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

Специальность 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические
системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Электрические системы» ГОУ ВПО
"Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина"

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Слышалов Владимир Константинович

Официальные оппоненты доктор технических наук, профессор
Митькин Юрий Алексеевич

кандидат технических наук, профессор
Белов Владимир Павлович

Ведущее предприятие: ОАО «Зарубежэнергопроект»,
г. Иваново

Защита состоится «22» октября 2010г. в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 по защите докторских диссертаций при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, корпус Б, ауд. № 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. С авторефератом – на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.В. Мошкарин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации

Согласно «Правилам устройства электроустановок» (ПУЭ) и другим нормативным документам (ГОСТ Р 50571.10–96, ГОСТ 12.1.038–82) при разработке и создании систем заземления энергетических и промышленных объектов рекомендуется использование совместно с искусственными заземлителями естественных заземлителей, среди которых следует специально отметить металлические трубопроводы, обсадные трубы скважин, оболочки кабелей и т.п. объекты, характеризующиеся значительной длиной и существенным поперечным размером.

В ряде случаев они образуют единую систему, а такие объекты, как трубопроводы могут иметь по длине участки, на которых осуществляется непрерывный контакт с заземляющей средой, и участки, где контакт с землей имеет регулярный, но прерывистый характер через опоры или стойки. Аналогичная ситуация характерна для прокладки электрических кабелей по эстакадам и в кабельных каналах.

Аналогичным образом формулируются в «Инструкции по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций» (Утверждено Приказом Министерства энергетики России от 30 июня 2003 г. № 280) рекомендации по совместному использованию искусственных и естественных заземлителей с дополнительными указаниями по объединению разделенных по технологическим соображениям заземлителей с помощью системы уравнивания потенциалов (ПУЭ п.1.7.110).

Использование в качестве естественных заземлителей трубопроводов горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов и смесей запрещено ПУЭ, однако указанные ограничения не исключают необходимости присоединения таких трубопроводов к существующим заземляющим устройствам в целях уравнивания потенциалов, что приводит на практике к протеканию по трубопроводам токов, появлению на них высоких потенциалов, искрению, электрическим разрядам и другим пожаро- и взрывоопасным проявлениям электричества.

Необходимо также указать на опасные ситуации, обусловленные грозовой деятельностью (прямые удары молнии и индукционные наводки), авариями в электрических системах и цепях, работой молниеотводов и промышленных заземлителей, падением проводов воздушных линий электропередач (далее ВЛЭП) на трубопроводы наружной прокладки и рядом других причин, связанных с иными неконтролируемыми проявлениями электромагнитной энергии. Следствиями указанных событий в системах заземления и присоединенных к ним трубопроводах являются следующие основные режимы:

- режим синусоидальных токов и напряжений, характерный для аварийного контактирования трубопроводов и заземлителей с элементами электрических сетей при совместной прокладке, пробоях и механических повреждениях электрических кабелей, обрывах проводов ВЛЭП и их падении на трубопроводы и т.д.;
- импульсный режим, характерный для различных проявлений грозовой деятельности: удары молний в трубопроводы, индукционные наводки при грозовых разрядах в землю и соседствующие с трубопроводами объекты, работа молниеотводов и связанных с ними заземляющих систем.

Таким образом, современные заземляющие системы, относительно входящих в них естественных заземлителей трубопроводного типа, независимо от назначения

последних, являются, во-первых, системой защиты от опасных проявлений электричества, когда рассеивают электромагнитную энергию нештатных режимов и событий на трубопроводных участках, и, во-вторых, когда включают в себя трубопроводы как рабочей элемент, совершенствуют свои функциональные свойства.

Недостаточно полный учет заземляющих свойств естественных заземлителей трубопроводного типа специального назначения при расчете характеристик является в ряде случаев причиной аварий с тяжелыми социальными и экономическими последствиями.

В этой связи необходимо иметь представление о естественных заземлителях трубопроводного типа заземляющих систем (ЗС) как об электрических цепях, для чего надо определить их электрические параметры, разработать методы их расчета и оценить возможности их использования в качестве естественных заземлителей.

Следует также оценить влияние на естественные заземлители трубопроводного типа ЗС грозовой деятельности (прямые удары молний и индукционные наводки), аварий в электрических системах, работы молниеотводов и промышленных заземлителей, падений на них проводов ВЛЭП и других т.п. событий.

Указанные выше области практического интереса к параметрам и режимам функционирования естественных заземлителей трубопроводного типа ЗС энергетических объектов и промышленных объектов любого другого назначения определяют **актуальность выбранной темы исследования.**

Объект исследования – естественные заземлители электроэнергетических объектов в форме трубопроводов различного назначения.

Предмет исследования – электромагнитные процессы в естественных заземлителях трубопроводного типа, разработка методов расчета параметров и характеристик для протекающих в них режимах синусоидального и импульсного тока.

Целью диссертации является совершенствование методов расчета электромагнитных характеристик естественных заземлителей электроэнергетических объектов в форме трубопроводов различного назначения.

В данной работе решаются следующие задачи:

- анализ электротехнических проблем, связанных с аварийными и нештатными ситуациями при эксплуатации надземных и подземных трубопроводных участков заземляющих систем;
- разработка математических моделей электромагнитных процессов в естественных заземлителях трубопроводного типа при подземной прокладке; расчет их электромагнитных характеристик;
- разработка математических моделей естественных заземлителей трубопроводного типа для надземных участков трубопроводных систем и методики расчета их параметров и характеристик;
- разработка методики расчета распределений синусоидального тока и напряжения в естественных заземлителях трубопроводного типа при наземной прокладке;
- расчет, описание и частотный анализ прямого и наведенного токов грозового разряда в сечениях естественных заземлителей трубопроводного типа и соответствующих им напряжений и распределений электрических зарядов;
- разработка методики расчета распределений в естественных заземлителях трубопроводного типа надземной прокладки импульсных токов, напряжений и наведенных зарядов.

Методы исследования

Теоретические методы исследования основываются на системе уравнений Максвелла, использование которых базируется на аппарате специальных функций и спектральном методе анализа электромагнитных явлений. При расчете наведенных зарядов и токов применен метод интегральных уравнений и теорема Шокли-Рамо. Математическая модель для подземных трубопроводных участков заземлителя построена в форме бесконечной системы алгебраических уравнений. Для надземных участков разработана цепная модель в форме каскадно соединенной системы четырехполюсников, использование которой для расчетов базируется на частотных характеристиках конкретных участков трубопровода.

Достоверность и обоснованность результатов исследования подтверждается соответствием исходных математических уравнений и физических допущений поставленным задачам исследования; проверкой полученных теоретических результатов путем предельных переходов по частоте, геометрическим и физическим параметрам. Согласие полученных результатов с расчетными данными других исследователей и результатами компьютерного моделирования.

Обоснование соответствия диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы»

Соответствие диссертации формуле специальности

в соответствии с формулой специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки), объединяющей исследования по связям и закономерностям при планировании развития, проектировании и эксплуатации электрических станций, электроэнергетических систем, электрических сетей и систем электроснабжения, в диссертационном исследовании разработаны комплексы математических моделей и методов их реализации, выполненные для совокупности явлений связанных с функционированием естественных заземлителей трубопроводного типа электроэнергетических и иных производственных объектов.

Соответствие диссертации области исследования специальности

отраженные в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы»: по развитию и совершенствованию теоретической и технической базы электроэнергетики с целью обеспечения экономичного и надежного производства электроэнергии, ее транспортировки и снабжения потребителей электроэнергией в необходимом для потребителей количестве и требуемого качества.

Пункту 6 "Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике" паспорта специальности 05.14.02 – «Электростанции и электроэнергетические системы» (технические науки) соответствует следующий результат диссертационного исследования, отраженный в поставленных задачах и имеющий научную новизну.

Рассмотренная Ю.В. Кандаловым математическая модель естественного заземлителя трубопроводного типа в форме каскадно соединенных четырехполюсников позволяет оценить изменения тока и напряжения возникающих на трубопроводах наружной прокладки различного назначения с учетом конкретных характеристик отдельных участков: *длин трубопроводных участков; расстояния между опорами; изменяющегося удельного сопротивления грунта трубопровода; изменения диаметров трубопровода; сопротивления заземления опор; высоты трубопровода*

над землей и т.д. До этого электромагнитные процессы в естественных заземлителях трубопроводного типа рассматривались аналогично ВЛЭП. Однако имеющиеся существенные различия обусловленные следующими факторами: *различие в материалах и конструкциях трубопроводов и проводов ВЛЭП, в силу чего существенно различаются их продольные параметры (индуктивности и активные сопротивления); близость трубопроводов к земле и, соответственно, увеличение емкости, и влияние электромагнитных процессов в грунте на продольные параметры трубопровода; наличие сосредоточенных утечек на землю за счет опор трубопровода.* Показывают, что методика расчета электромагнитных параметров трубопроводов требует специальной, целенаправленной разработки, хотя и допускает включения в себя отдельных элементов методических разработок по расчету параметров ВЛЭП.

Пункту 11 "Разработка методов анализа структурной и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения" соответствует следующий результат диссертации, отраженный в поставленных задачах и имеющий научную новизну.

Разработанные Ю.В. Кандаловым методы расчетов параметров естественных заземлителей трубопроводного типа и электрических полей подземных и надземных трубопроводных участков заземлительных систем, токов и напряжений в трубопроводах, воздухе и грунте, а также других характеристик применительно к режимам протекания по трубопроводам синусоидального и импульсного токов позволяют в целом решать задачу электромагнитной совместимости пожаро- и взрывоопасных трубопроводных систем с системами электроснабжения и заземления, и использовать их в качестве естественных заземлителей. Разработанные методы могут быть использованы при автоматизированном проектировании систем заземления с использованием естественных заземлителей в форме трубопроводных участков. Методика расчета ЭМ полей естественных заземлителей электроэнергетических объектов в форме трубопроводов различного назначения применима к задачам об электромагнитной совместимости токовых режимов трубопроводов, кабельных оболочек, арматуры зданий и т.п. естественных и искусственных заземлителей с производственным и информационно-измерительным оборудованием.

Научная новизна

1. Установлена и реализована возможность исследования электромагнитных процессов естественных заземлителей электроэнергетических объектов в форме надземных трубопроводных участков заземляющих систем на основе использования специальной электрической цепи, элементы которой учитывают особенности конструкции и прокладки моделируемого участка.

2. Разработана математическая модель естественного заземлителя (трубопроводного участка) в форме цепной схемы из каскадно соединенных четырехполосников, параметры которых учитывают не только электрические свойства трубы, но и электрическое сопротивление грунта, сопротивление заземления опор и геометрические характеристики трассы трубопроводного участка заземляющей системы.

3. Разработаны методы расчета токов и напряжений в сечениях естественных заземлителей электроэнергетических объектов в форме надземного трубопровода при синусоидальном режиме электромагнитных воздействий, а также на основе частотных характеристик трубопровода, определяемых в этом режиме при импульсных воздействиях.

4. Усовершенствована и реализована методика расчета импульсных токов, наводимых на естественные заземлители ЗС электроэнергетических объектов в форме трубопроводов различного назначения за счет индуктивной связи при ударах молнии в землю или соседствующие объекты. Разработана методика расчета распределения наведенных зарядов по естественным заземлителям в форме трубопроводов наружной прокладки при ударе молнии в землю.

5. Разработана методика расчета собственных и взаимных параметров и характеристик систем естественных заземлителей в форме подземных трубопроводов большого диаметра.

Практическая значимость работы. Разработанные в диссертации методы расчетов параметров естественных заземлителей трубопроводного типа и электрических полей подземных и надземных трубопроводных участков заземлительных систем, токов и напряжений в трубопроводах, воздухе и грунте, а также других характеристик (напряжений прикосновения и шага, пробивных напряжений, анодной и катодной зон и т.д.) применительно к режимам протекания по трубопроводам синусоидального и импульсного токов позволяют в целом решить задачу электромагнитной совместимости пожаро- и взрывоопасных трубопроводных систем с системами электроснабжения и заземления, и использовать их в качестве естественных заземлителей. Разработанные методы могут быть использованы при автоматизированном проектировании систем заземления с использованием естественных заземлителей в форме трубопроводных участков. Методика расчета ЭМ полей естественных заземлителей электроэнергетических объектов в форме трубопроводов различного назначения применима к задачам об электромагнитной совместимости токовых режимов трубопроводов, кабельных оболочек, арматуры зданий и т.п. естественных и искусственных заземлителей с производственным и информационно-измерительным оборудованием.

Результаты работы, относящейся к расчету электромагнитных параметров естественных заземлителей в форме трубопроводов различного назначения, и разработанные математические модели электромагнитных процессов в них внедрены в АКХ им. Памфилова и ЗАО «Проектный институт «МОРДВАГРОПРОМПРОЕКТ»». Результаты работы используются в учебном процессе для подготовки специалистов по направлению «Электроэнергетика» ИГЭУ (лекционный курс «Электромагнитное поле и волновые параметры многопроводных воздушных линий»).

На защиту выносятся:

1. Методика расчета параметров естественных заземлителей трубопроводного типа и характеристик естественных заземлителей подземных трубопроводных участков систем заземления.

2. Математические модели и методика их реализации для расчета индукционных токов и зарядов, наводимых в заземлителях при грозовом разряде.

3. Математическая модель естественного заземлителя в форме надземного трубопровода в виде электрической цепи из каскадно соединенных четырехполюсников.

4. Методы расчета естественных заземлителей трубопроводного типа синусоидальных и импульсных процессов в надземном трубопроводном участке системы заземления.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на конференциях: XIV-й и XV-й международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Москва, МЭИ(ТУ) 2008 – 2009 гг.), международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (Бенардосовские чтения) (Иваново, ИГЭУ, 2007, 2009 гг.), межрегиональной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Смоленск, 2008, 2010), региональных научно-технических конференций студентов и аспирантов (Иваново, 2007, 2009, 2010 гг.), III-й Российской конференции по заземляющим устройствам (Новосибирск, 2008 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 6 статей в журналах и сборниках научных трудов, 9 тезисов докладов международных научно-технических конференций.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложений и списка литературы. Общий объем основного текста диссертации 116 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, выполнен анализ современного состояния проблемы, сформулирована цель и задачи исследования, обозначены пути их решения, приведена структура и содержание диссертации.

В первой главе изложены физические и математические основы моделирования естественных заземлителей в форме трубопроводов различного назначения, а именно подземных трубопроводных участков ЗС, сформулирована основная задача выполняемого исследования, предложена методика определения электрического поля, распределения тока, стекающего с трубопровода в грунт, шагового напряжения и напряжения прикосновения, а также характеристик электрического взаимодействия трубопроводов с протяженными заземлителями и друг с другом.

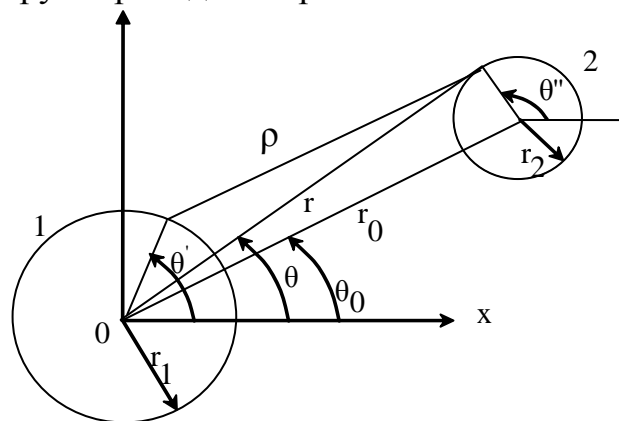


Рис. 1. Координатная система и геометрические характеристики заземлителя и трубопровода

Основой разработки методики являлась задача взаимодействия (рис. 1) цилиндрических электродов, в которой распределение тока в грунте определено при условии, что проводимость электродов $\gamma_э \rightarrow \infty$, т.е. плотности тока на электродах распределения векторов тока в грунте $\vec{\delta}(r, \theta)$ и напряженности электрического поля $\vec{E}(r, \theta) = \vec{\delta}(r, \theta)$, определено при допущении, что удельное сопротивление материала электродов

$\gamma_э \rightarrow \infty$, т.е. вектора плотности токов на электродах $\vec{\delta}_1(r_1 \theta')$, $\vec{\delta}_2(r_2 \theta'')$, имеют только нормальные составляющие и являются аналогами плотностей свободных зарядов в соответствующей задаче электростатики. При решении этой задачи принято, что плотности зарядов на цилиндрах 1 и 2 распределены по законам:

$$\sigma_1(\theta') = \sigma_{01} + \sum_{k=1}^{\infty} A_{k1} \cos k\theta' + B_{k1} \sin k\theta'; \quad (1)$$

$$\sigma_2(\theta'') = \sigma_{02} + \sum_{n=1}^{\infty} A_{n2} \cos n\theta'' + B_{n2} \sin n\theta'', \quad (2)$$

где $\sigma_{0i} = \frac{\tau_{0i}}{2\pi r}$, ($i=1, 2$) – линейная плоскость свободных зарядов на цилиндрах. Элементарный линейный заряд второго электрода $d\tau_2 = \sigma_2(\theta'')r_2 d\theta''$ индуцирует на первом электроде распределение

$$d\sigma_1(\theta') = -\frac{\sigma_2(\theta'')r_2 d\theta''}{\pi r_1} \sum_{k=1}^{\infty} \left(\frac{r_1}{r}\right)^k (\cos k\theta \cos k\theta' + \sin k\theta \sin k\theta'). \quad (3)$$

Последовательно полагая, что $\sigma_{02}(\theta'') = \frac{\tau_{02}}{2\pi r_2}$, $\cos n\theta''$, $\sin n\theta''$ ($n=1, 2, \dots$), интегрируем по θ'' от 0 до 2π . В итоге для $\sigma_1(\theta')$ получаем коэффициенты A_{k1} , B_{k1} в форме бесконечной системы алгебраических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} A_{k1} &= a_{k0}\sigma_{02} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{kn}A_{n2} + b_{kn}B_{n2}, \\ B_{k1} &= b_{k0}\sigma_{02} + \sum_{n=1}^{\infty} b_{kn}A_{n2} - a_{kn}B_{n2}, \end{aligned} \right\} \text{где} \quad \left. \begin{aligned} a_{k0} &= -2\frac{r_2}{r_1} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k \cos k\theta_0, \quad b_{k0} = -2\frac{r_2}{r_1} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k \sin k\theta_0, \\ a_{kn} &= (-1)^{n+1} \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k \frac{(k+n-1)!}{n!(k-1)!} \cos(n+k)\theta_0, \\ b_{kn} &= (-1)^{n+1} \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{r_1}{r_0}\right)^k \frac{(k+n-1)!}{n!(k-1)!} \sin(n+k)\theta_0. \end{aligned} \right\}$$

Для распределения $\sigma_2(\theta'')$ по выражению (2) коэффициенты A_{n2} , B_{n2} находятся тем же методом.

В качестве иллюстраций применения предлагаемой методики в диссертации рассмотрены два случая:

- для трубопровода (рис. 2), проложенного в грунте вблизи плоской границы раздела с воздухом ($\gamma_2 \rightarrow 0$), рассчитано распределение плотности тока, стекающего с трубопровода в грунт, напряжение прикосновения $U_{пр}$ и шаговое напряжение $U_{ш}(x)$.

- для заглубленного трубопровода $h \gg r_T$, проложенного параллельно цилиндрическому заземлителю, с которого стекает заданный ток, определены величины катодной и анодной поверхностей трубопровода в поле заземлителя.

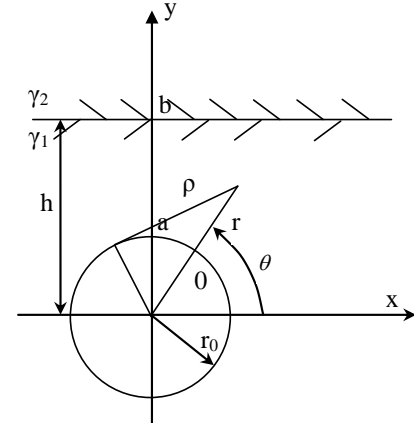


Рис. 2. Геометрические характеристики системы: заземлитель, граница раздела сред

Во второй главе на основе анализа электрофизических явлений индукции при ударе молнии в землю разработан метод расчета наведенного тока в заземлителе, применительно к ВЛЭП высоких классов напряжения.

Количественное соотношение между наведенным током и движущимся зарядом $dq = -\tau_{л} dz$ в ситуации (рис.3) позволяет установить теорема Шокли-Рамо.

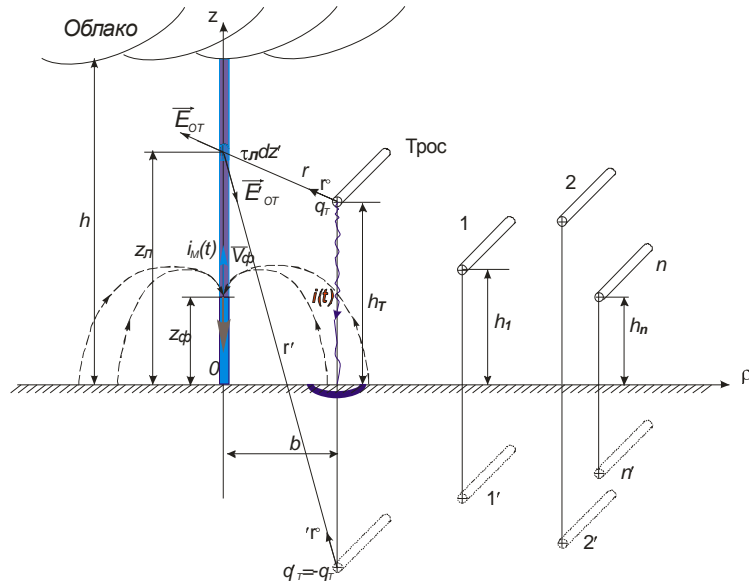


Рис. 3. Основные параметры системы провода - тросы и канала грозового разряда

Для выбранного направления $i_M(t)$, т.е. при $i(t) = -\frac{dq_T}{dt}$ (q_T – наведенный заряд троса), эта теорема имеет вид

$$di(t) = \tau_L dz \vec{V}_\phi(t) (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) + \int_V (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}_\delta}{\partial t} dv \quad (4)$$

Задача о поле тока смещения как в лидерной стадии, так и в стадии главного разряда была решена ранее, поэтому подынтегральное выражение во втором слагаемом $di(t)$ считаем известным и вычисляем ток $i(t)$, обусловленный движением заряда $\tau_c dz$ [48]. Фиксируя момент наблюдения t , определяем положение фронта нейтрализации:

$z_\phi(t) = \int_0^t V_\phi(v) dv$ и, полагая выполненным условие $\text{div} \vec{V}_\phi(t) = 0$, интегрируем

$di(t)$ по z от 0 до $z_\phi(t)$. В итоге получаем:

$$i(t) = -\frac{\tau_L V_\phi(t)}{\ln \frac{2h_T}{r_T}} \ln \frac{\sqrt{b_T^2 + (z_\phi + h_T)^2}}{\sqrt{b_T^2 + (z_\phi - h_T)^2}} + \int_V (\vec{E}_{OT} + \vec{E}'_{OT}) \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} dV. \quad (5)$$

Произведена в качестве иллюстрации применения предложенной методики оценка параметров ожидаемых импульсов наведенного тока, выполнен расчет $i(t)$ при следующих исходных данных: радиус троса $5 \cdot 10^{-3}$ м; варианты высоты подвеса $h_{T1} = 10$ м, $h_{T2} = 1$ м, $h_{T3} = 0.2$ м; вариант расстояния до точки удара молнии $b_1 = 20$ м, $b_2 = 100$ м; ток молнии задан в форме биэкспоненциального импульса, соответствующего 50%-му току молнии, для которого имеем $i_{M \max} \approx 37$ кА, $V_{\phi \max} = 0,31 \cdot 3 \cdot 10^8$ м/с, $\tau_L = 4 \cdot 10^{-4}$ Кл/м. Форму этого импульса описывает выражение $|i_M(t)| = i_m \left(e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1} \right) = i_m (e^{-\eta t} - e^{-\xi t})$.

Полагая, что составляющая наведенного тока $di(t)$ в формуле создается движением элементарного заряда $dq(t-t_3)$, где t_3 – время запаздывания, обусловленное конечностью скорости распространения возмущений в поле, получаем

$$i(t') = i \left(t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2} \right).$$

Расчеты показали, что для инженерных оценок импульсов наведенного тока допустимо использовать сравнительно простую формулу (5) (первое слагаемое), рассматривая данную зависимость с учетом сдвига во времени для переменной $t' = t - \frac{1}{c} \sqrt{b_T^2 + h_T^2}$.

При наличии нескольких заземленных тросов расчет наведенных токов проводится для каждого из них в отдельности; ток в заземлителе находится путем суммирования с учетом запаздывания t_{31}, t_{32}, \dots $i(t) = \sum_{k=1}^m i^{(k)} \left(t - \frac{1}{c} \sqrt{b_k^2 + h_k^2} \right)$.

В качестве иллюстрации применения изложенной методики рассчитан наведенный ток, стекающий в систему заземления с защитных тросов ВЛЭП 500 кВ при ударе молнии в землю в середине пролета линии. Ток в заземлителе определяется по формуле

$$i(t) = i^{(1)} \left(t - \frac{1}{c} \sqrt{b_1^2 + h_1^2} \right) + i^{(2)} \left(t - \frac{1}{c} \sqrt{b_2^2 + h_2^2} \right), t > \frac{1}{c} \sqrt{b_1^2 + h_1^2} \quad (6)$$

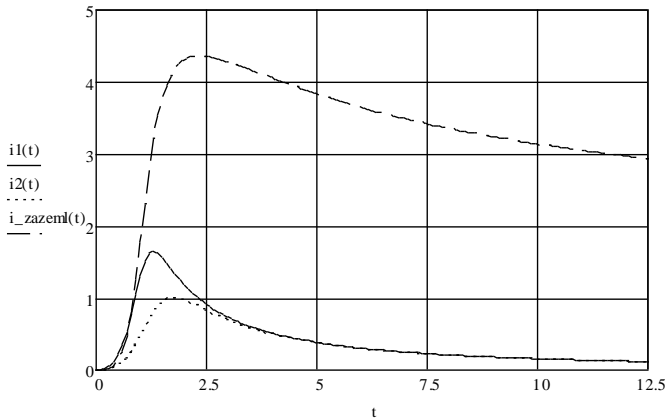


Рис. 4. Результаты расчета наведенного тока стекающего в заземлитель с защитных тросов при ударе молнии в землю, в середине пролета линии ЛЭП 500 кВ

Предложенный в диссертации метод расчета распределений наведенных зарядов на трубопроводных объектах показан на рис. 5 и 6.

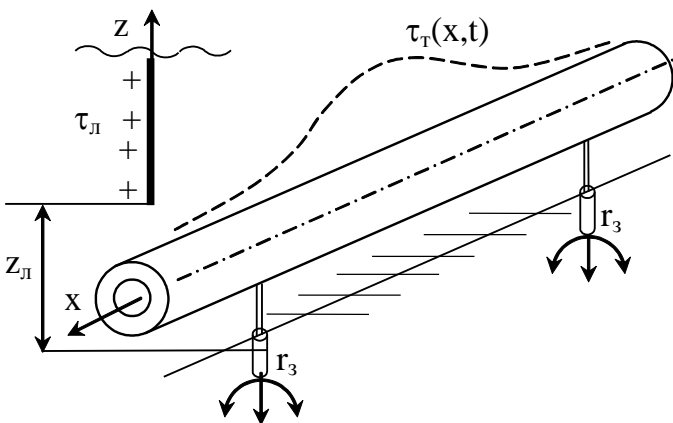


Рис. 5. Распределение линейной плотности наведенных зарядов $\tau_T(x,t)$ и создаваемого ими электрического поля у поверхности трубы при ударе молнии

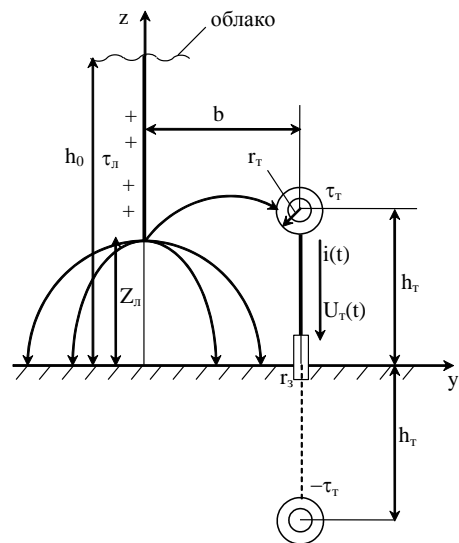


Рис. 6. Основные параметры системы трубопровода и канала грозового разряда

В работе показано, что для преобразованных по Фурье линейных плотностей зарядов

$$\tilde{\tau}(v, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \tau(x, t) e^{ivx} dx$$

справедливо уравнение

$$\frac{\epsilon_0}{\gamma} \cdot \frac{\partial \tilde{\tau}^*(v, t)}{\partial t} + v[r_T I_1(r_T v) - r_1 I_1(r_1 v)] \cdot [K_0(r_T v) - K_0(2h_T v)] \tilde{\tau}^*(v, t) = -\frac{r_T^2 - r_1^2}{2} F_n(v, t),$$

где $\tilde{\tau}^*(v, t) = \frac{\tilde{\tau}(v, t)}{\tau_n}$;

$$F_n(v, t) = \int_0^\infty \left\{ \frac{x^2}{x^2 + b^2} \left[\frac{Z_n - h_T}{(x^2 + c_1^2)^{\frac{3}{2}}} - \frac{Z_n + h_T}{(x^2 + c_2^2)^{\frac{3}{2}}} \right] + \frac{x^2 - b^2}{(x^2 + b^2)^2} \left[\frac{Z_n - h_T}{(x^2 + c_1^2)^{\frac{1}{2}}} - \frac{Z_n + h_T}{(x^2 + c_2^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \cos vxdx, \quad (7)$$

где $Z_n(t) = h_0 - v_n t$; начальное условие $\tilde{\tau}^*(v, t) = 0$.

На основе этого уравнения была разработана и реализована инженерная методика расчета распределений наведенных зарядов $\tau(x, t)$. Суть ее заключается в следующем: входящая в уравнение (7) постоянная ϵ_0/γ (γ – удельная проводимость материала трубы) имеет порядок 10^{-18} с, поэтому, полагая трубу сверхпроводящей ($\gamma \rightarrow \infty$), можем для заданного положения головки лидера Z_n найти распределение $\tau(v, t)$ как отношение $\tau(v) = -F_n(v)/F_1(v)$, где $F_1(v) = [r_T I_1(r_T v) - r_1 I_1(r_1 v)] \cdot [K_0(r_T v) - K_0(2h_T v)]$, и затем, выполняя обратное преобразование Фурье можем, найти $\tau(x, t)$. Наибольший интерес при исследовании закономерностей в этих распределениях имеет максимальные значения плотностей зарядов $\tau_{\max}^* = \tau^*(0)$ и зависимость $\tau_{\max}^*(z_n^*)$ в целом (рис.7).

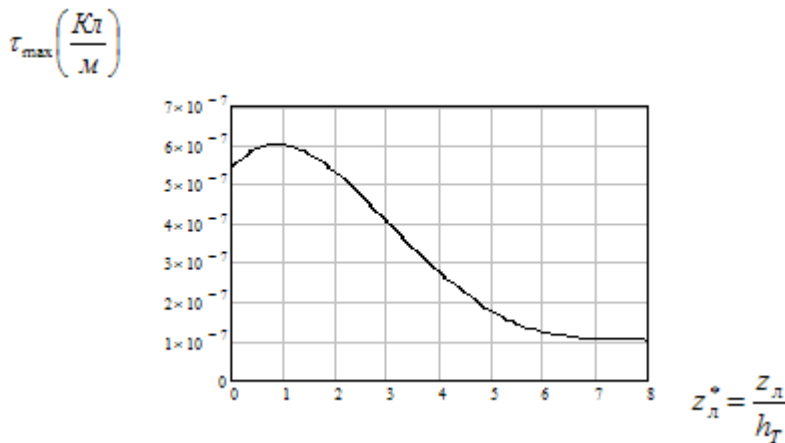


Рис. 7. Максимальное значение плотности наведенных зарядов (сечение $x=0$) в функции от положения лидера

В третьей главе разработана методика определения продольных и поперечных параметров естественных заземлителей в форме трубопровода и математическая модель электромагнитных процессов в системе трубопровод–земля при синусоидальном токе.

Основной задачей расчета продольных параметров является расчет электромагнитного поля трубопровода в режиме протекания синусоидального тока, определение на этой основе удельных значений активного сопротивления и индуктивности

как функций частоты $r_0(\omega)$, $L_0(\omega)$. Исходными для расчета электромагнитного поля во всех областях трубопровода являлись уравнения Максвелла в символической форме записи. Результаты расчета были представлены в форме $Z_0(j\omega)=r_0+j\omega L_0$, проверены по литературным источникам и дополнены значениями добавок, учитывающих влияние грунта:

$$Z_{0\text{эф}}(j\omega)=(r_0+\Delta r)+j\omega(L_0+\Delta L)=r_{0\text{эф}}+j\omega L_{0\text{эф}}. \quad (8)$$

Величины Δr , ΔL определялись с помощью собственного интеграла Карсона. Проведенные расчеты показали, что влияние электромагнитного поля в грунте на вычисляемые значения продольных параметров (r_0 и L_0) трубопровода при промышленной частоте следует признать существенным и оценить \sim в 20%.

В ходе исследований было установлено, что общий вид характеристик $r_0(\omega)$ и $x_0(\omega)$ приближенно соответствует аналитическим зависимостям:

$$r_0(\omega)=r_0(0)+k_2\sqrt{\omega}; \quad x_0(\omega)=x_x\sqrt{\omega}. \quad (9)$$

К поперечным параметрам трубопровода относятся распределенная емкость трубопровода, суммарное активное сопротивление заземлителя и стойки, индуктивность стойки (рис. 8).

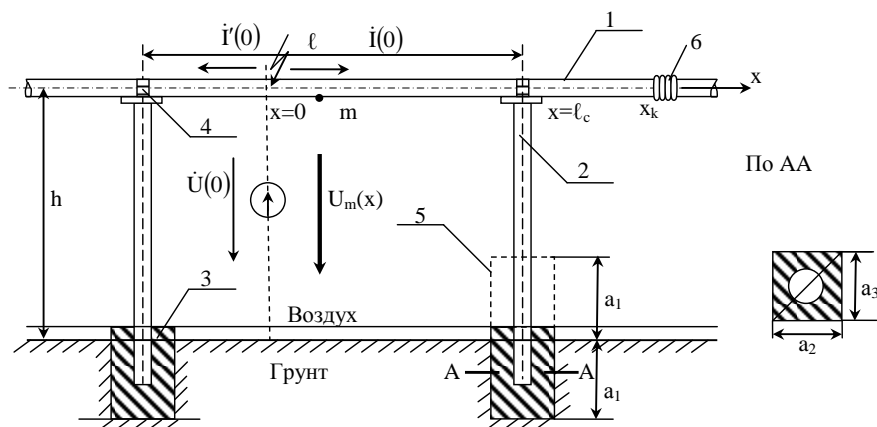


Рис. 8. Геометрические характеристики участка трубопровода:

1 – трубопровод $\varnothing 273 \times 6,0$; 2 – стойка $\varnothing 159 \times 4,5$; 3 – бетонный фундамент стойки (заземлитель); 4 – монтажный хомут; 5 – пунктирный контур иллюстрирующий способ применения метода изображений при расчете сопротивления заземлителя; 6 – компенсатор.

Для оценочного расчета сопротивления заземлителя r_3 было рассмотрено два случая.

1. Сопротивление заземления при $\rho_{\Gamma} \gg \rho_{\text{Б}}$.

Для оценки величины сопротивления заземления r_3 бетонный параллелепипед – фундамент стойки заменялся вытянутым сфероидом.

2. Сопротивление заземления при $\rho_{\Gamma} \approx \rho_{\text{Б}}$.

В этом случае производилась замена заземлителя цилиндром конечной длины.

Для определения удельной емкости трубопровода относительно земли учтено, что $l \gg h$, и на этом основании использовались в расчете формулы для плоскопараллельного поля.

Приведенная на рис. 8 схема трубопровода в электрическом отношении характерна тем, что за счет применения сильфонных компенсаторов, обеспечивающих механическую устойчивость трубопровода и изолирующих вставок, она может оказаться электрически разделенной на изолированные участки длины l_c . Кроме того,

каждый из этих участков разделен на n ($n \gg 2$) меньших участков опорами трубопровода, установленными с учетом топографических особенностей местности, т.е. неравномерно. Длины этих участков ℓ_k ($k=1, 2, \dots, n$) в сумме дают расстояние ℓ_c между компенсаторами.

Таким образом, должна быть рассмотрена модель трубопровода, состоящего из последовательно соединенных отдельных участков, имеющих сосредоточенные поперечные утечки за счет заземлителей опор (рис. 8), т.е. в форме электрической цепи, образованной каскадно соединенными четырехполюсниками, каждый из кото-

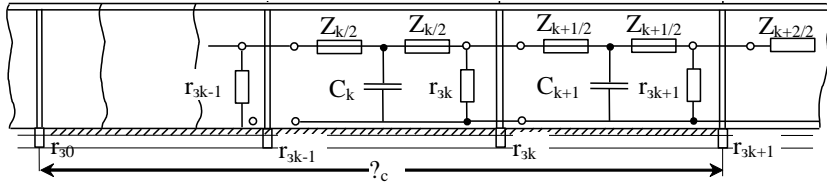


Рис. 9. Цепная схема замещения трубопровода

$$\frac{Z_k}{2} = \frac{(r_{0эф} + j\omega L_{0эф}) \cdot \ell_k}{2}, \quad Y_k = j\omega C_k \ell_k. \quad (10)$$

Все четырехполюсники симметричны и соединены каскадно. Нагрузкой каждого из них является сопротивление заземления стойки r_3 . Здесь необходимо заметить следующее: все эти сопротивления не могут быть одинаковыми в силу их зависимости от множества различных факторов (удельного сопротивления грунта, качества изготовления и монтажа заземлителя и т.д.), поэтому расчетное значение r_{3k} считаем зависящим от номера стойки "k".

Для дальнейших расчетов было выполнено преобразование схемы рис.9 к схеме рис.10 и определены коэффициенты уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= A\dot{U}_2 + B\dot{I}_2, \\ \dot{I}_1 &= C\dot{U}_2 + D\dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Целью дальнейших преобразований являлись получение коэффициентов эквивалентной цепи (рис.10.) четырехполюсников и определение характеристического сопротивления Z_c и постоянной передачи g .

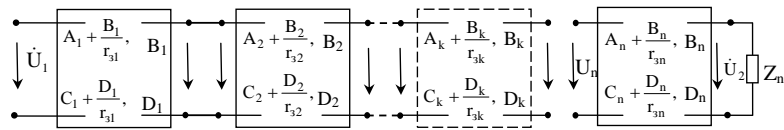


Рис. 10. Эквивалентная цепь четырехполюсников

Первая из этих задач решается путем последовательного перемножения матриц коэффициентов соседних двухполюсников. Через коэффициенты этого четырехполюсника A, B, C, D вычисляются искомые параметры.

Полученная модель позволяет оценить изменения синусоидального тока и напряжения в пределах участка трубопровода $\ell_c = \sum_{k=1}^n \ell_k$ с учетом конкретных характеристик отдельных участков ℓ_k : их длин, удельного сопротивления грунта, сопротивления заземления опор, высоты трубопровода над землей и т.д.

В четвертой главе рассматриваются импульсные электромагнитные процессы в естественных заземлителях в форме трубопровода, обусловленные или гальва-

нической (контактной) связью с электрическими цепями заземлителей, или как следствие прямого удара молнии (рис. 11). При исследовании импульсных процессов с помощью цепной модели, разработанной в главе третьей, рассматриваются два случая.

1. Определение во входном сечении цепи четырехполюсников импульса напряжения на входе $u_1(t)$ по заданному импульсному току $i_1(t)$.

2. Определение в выходном сечении цепи тока и напряжения на выходе $i_2(t)$, $u_2(t)$ по импульсам $i_1(t)$, $u_1(t)$.

Второй случай в общем плане рассматривался как задача о расчете импульсов $i_k(t)$, $u_k(t)$ на выходе произвольного, k -го, четырехполюсника цепи.

Расчет напряжения на входе цепной модели трубопровода физически соответствует удару молнии непосредственно в трубопровод (рис. 11).

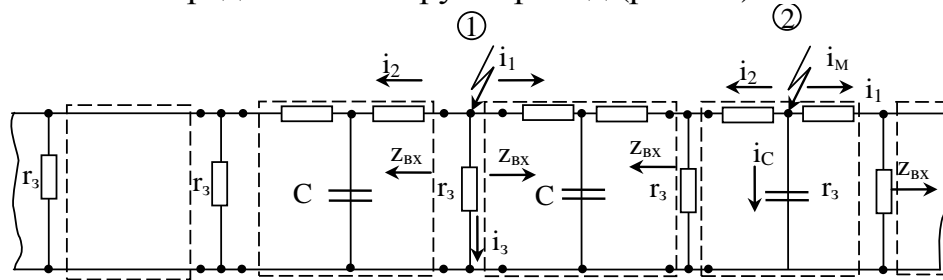


Рис. 11. Ситуационные состояния трубопровода:

1 – удар молнии в опору (стойку) трубопровода; 2 – удар в середину участка между соседними стойками

Не требует пояснений тот факт, что вместо тока молнии на рис. 11 может быть подставлен ток короткого замыкания или установившегося режима синусоидального тока. Эти ситуации возникают при падении проводов ЛЭП на трубопровод. В установившемся режиме комплексное напряжение \dot{U}_1 будет определяться через комплексные сопротивления, рассмотренные в главе третьей.

В импульсном режиме предварительно определяется частотная характеристика тока на входе цепи с помощью преобразований Фурье. Такой расчет был выполнен для биэкспоненциальной формы представления тока молнии:

$$|i_m(t)| = i_m \left(e^{-t/\tau_2} - e^{-t/\tau_1} \right) = i_m \left(e^{-\eta t} - e^{-\xi t} \right)$$

Для единичного тока имеем:

$$\dot{I}_0(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(e^{-\eta t} - e^{-\xi t} \right) e^{-j\omega t} dt = a(\omega) + jb(\omega); \tag{12}$$

$$a(\omega) = \frac{\eta}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{\xi}{\xi^2 + \omega^2}; b(\omega) = \frac{\omega}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{\omega}{\xi^2 + \omega^2}.$$

Частотная характеристика импульсного напряжения $\dot{U}_1(\omega)$:

$$\dot{U}_1(\omega) = i_m \dot{I}_0(\omega) [r_s(\omega) + jx_s(\omega)], \quad i=1, 2,$$

где $r_{эф}(\omega)$, $x_{эф}(\omega)$ – частотные характеристики входного сопротивления цепи.

Выполняя обратное преобразование Фурье, получаем зависимость мгновенного импульсного напряжения на входе цепи от времени:

$$\begin{aligned}
u_1(t) &= \frac{i_m}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{j\omega t} (r_3 + jx_3) \left\{ \left(\frac{\eta}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{\zeta}{\zeta^2 + \omega^2} \right) + j\omega \left(\frac{1}{\zeta^2 + \omega^2} - \frac{1}{\eta^2 + \omega^2} \right) \right\} d\omega = \\
&= \frac{i_m}{\pi} \left\{ \int_0^{+\infty} \left[\left(\frac{\eta}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{\zeta}{\zeta^2 + \omega^2} \right) r_3 + \omega \left(\frac{1}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{1}{\zeta^2 + \omega^2} \right) x_3 \right] \cos \omega t d\omega - \right. \\
&\quad \left. - \int_0^{+\infty} \left[\left(\frac{\eta}{\eta^2 + \omega^2} - \frac{\zeta}{\zeta^2 + \omega^2} \right) x_3 + \omega \left(\frac{1}{\zeta^2 + \omega^2} - \frac{1}{\eta^2 + \omega^2} \right) r_3 \right] \sin \omega t d\omega \right\}. \tag{13}
\end{aligned}$$

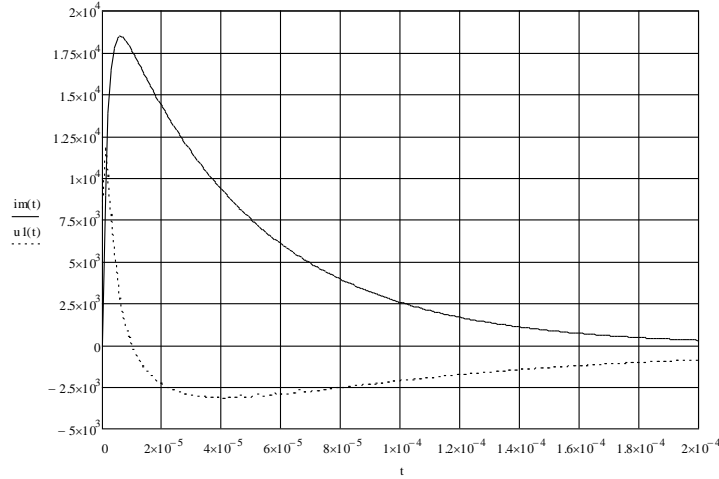


Рис. 12. Импульс напряжения на входе цепи от времени $u_1(t)$ совместно с импульсом тока молнии $i_m(t)$

При расчете напряжения и тока в выходном сечении по рассмотренной в третьей главе методике расчета режима синусоидального тока были введены передаточные функции:

$$K_U(\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{Z_{2H}}{A(\omega)Z_{2H} + B(\omega)}; \quad K_I(\omega) = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{1}{C(\omega)Z_{2H} + D(\omega)}. \tag{14}$$

С их помощью задача определения импульсов $i_2(t)$, $u_2(t)$ в выходном сечении цепной модели по известным импульсам $i_1(t)$, $u_1(t)$ на входе была решена на основе использования обратного преобразования Фурье:

$$\dot{U}_1(\omega) = U_1'(\omega) + jU_1''(\omega); \quad K_U(\omega) = K_U'(\omega) + jK_U''(\omega) \tag{15}$$

Напряжение $u_2(t)$ определяется по выражению, аналогичному (13):

$$u_2(t) = \frac{1}{\pi} \left\{ \int_0^{\infty} [K_U'(\omega) \cdot U_1'(\omega) - K_U''(\omega) \cdot U_1''(\omega)] \cos \omega t d\omega - \int_0^{\infty} [K_U'(\omega) \cdot U_1''(\omega) + K_U''(\omega) \cdot U_1'(\omega)] \sin \omega t d\omega \right\}. \tag{16}$$

Заменяя в K_U' , K_U'' на K_I' , K_I'' и U_1' , U_1'' на i_1' , i_1'' , получаем формулу для расчета функции $i_2(t)$ – импульса тока в выходном сечении четырехполюсника.

В качестве иллюстрации применения описанной методики в диссертации рассмотрена задача для участка трубопровода с числом пролетов $n=8$. В одну из стоек трубопровода, например, ударила молния. Ток молнии $i_m(t)$ описывает формула $i_m(t) = i_m(e^{\sigma t} - e^{-\zeta t})$, где $i_m=43,771$ (кА); $\zeta=0,0214$ (1/мкс); $\sigma=0,565$ (1/мкс). Участок трубопровода, на который приходится удар молнии проложен по увлажненному грунту с $\rho_{\Gamma}=500$ Ом·м, левее и правее точки удара трубопровод проложен по сухому грунту с $\rho_{\Gamma}=50$ Ом·м, затем через 60 м прокладки увлажненный грунт сменяется сухим. Трубопровод выполнен из труб диаметром 273х6,0, высота над землей $h=2,5$ м; опо-

ры расположены на расстоянии $\ell=20$ м. Полагаем, что выходное сечение расположено на выходе из болотистой местности, т.е. правее точки удара имеем до выходного сечения 5 участков на сухом грунте и 3 на болотистом. Целью расчета является закон изменения напряжения $u_2(t)$ и тока $i_2(t)$ в выходном сечении.

Импульсы напряжения $u_2(t)$ и $i_2(t)$

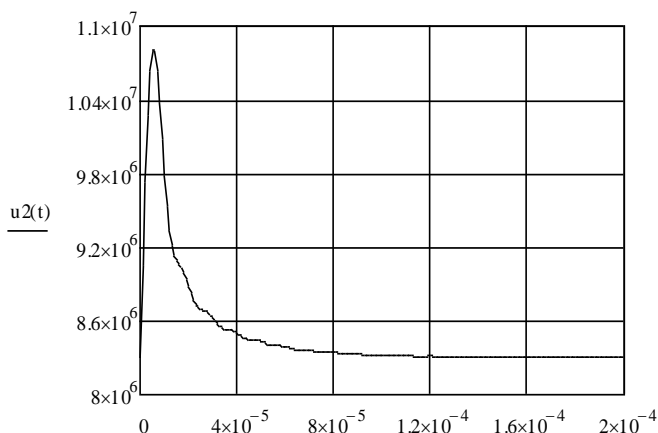


Рис. 13. Импульс напряжения на выходе цепи $u_2(t)$

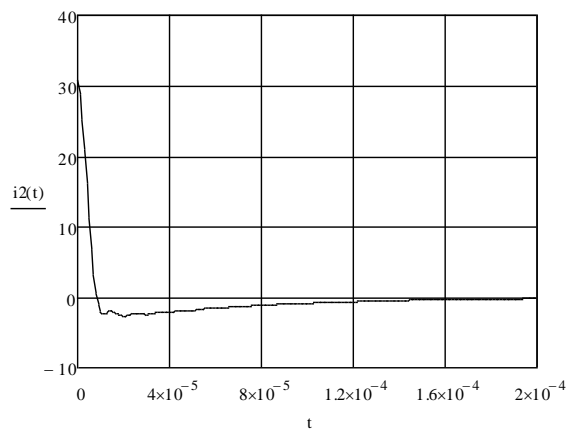


Рис. 14. Импульс тока на выходе цепи $i_2(t)$

приведены на рис. 13 и 14.

В приложениях приведены акты внедрения, расчет активного сопротивления заземления трубопровода и вывод уравнения для наведенных зарядов при ударе молнии в землю вблизи трубопровода.

В заключение приводятся и обсуждаются основные результаты, полученные в диссертации, оцениваются перспективные направления их дальнейшего использования.

Основные результаты и выводы

Основным результатом диссертации является разработка комплекса математических моделей и методов их реализации, выполненная для совокупности явлений связанных с функционированием естественных заземлителей трубопроводного типа электроэнергетических и иных производственных объектов. В диссертации разработаны:

1. Математическая модель естественного заземлителя трубопроводного типа подземной прокладки для условий прокладки трубы параллельно границе раздела воздух-грунт на глубине соизмеримой с ее диаметром. Модель позволяет рассчитывать не только традиционные параметры – сопротивление заземления, напряжения прикосновения и шага, но и получить оценки влияния параллельных ей соседних цилиндрических объектов (труб, кабелей и т.п.), а также получить характеристики коррозионного воздействия.

2. Математическая модель появления индукционного импульсного тока в системе заземления при ударе молнии вблизи объекта, подключенного к данной ЗС.

3. Математическая модель индукционного наведения электрических зарядов на естественных заземлителях трубопроводного типа надземной прокладки при ударе молнии в землю вблизи трубопровода любого назначения.

4. Математическая модель естественных заземлителей трубопроводного типа надземной прокладки, учитывающая конкретные характеристики участков: сопротивление грунта на трассе прокладки, расположение опор и параметры их заземлителей, изменения высоты расположения труб и их физические параметры.

В диссертации установлено, что наиболее полно перечисленным условиям удовлетворяет электрическая цепь в форме системы каскадно соединенных четырехполюсников, параметры которых соответствуют конструктивным, физическим и топографическим характеристикам трубопровода и трассы. Тем самым в практику исследования электромагнитного состояния естественных заземлителей трубопроводного типа введена специальная модель, позволяющая автоматизировать расчет ситуационных состояний трубопровода.

Рассмотренная в диссертации математическая модель естественного заземлителя трубопроводного типа в форме каскадно соединенных четырехполюсников позволяет оценить изменения тока и напряжения возникающих на трубопроводах наружной прокладки различного назначения с учетом конкретных характеристик отдельных участков: *длин трубопроводных участков; расстояния между опорами; изменяющегося удельного сопротивления грунта трубопровода; изменения диаметров трубопровода; сопротивления заземления опор; высоты трубопровода над землей и т.д.* До этого электромагнитные процессы в естественных заземлителях трубопроводного типа рассматривались аналогично ВЛЭП. Однако имеющиеся существенные различия обусловленные следующими факторами: *различие в материалах и конструкциях трубопроводов и проводов ВЛЭП, в силу чего существенно различаются их продольные параметры (индуктивности и активные сопротивления); близость трубопроводов к земле и, соответственно, увеличение емкости, и влияние электромагнитных процессов в грунте на продольные параметры трубопровода; наличие сосредоточенных утечек на землю за счет опор трубопровода.* Показывают, что методика расчета электромагнитных параметров трубопроводов требует специальной, целенаправленной разработки, хотя и допускает включения в себя отдельных элементов методических разработок по расчету параметров ВЛЭП.

Для реализации перечисленных математических моделей в диссертации разработаны методы расчета индуцированных зарядов и токов в элементах ЗС при грозовом разряде; усовершенствован и применен для расчета естественных заземлителей в форме подземных трубопроводных участков ЗС метод исследования полей стержневых заземлителей; на основе спектрального метода разработана и применена к цепочной модели надземных участков ЗС методика расчета параметров и характеристик трубопроводов в режимах протекания синусоидальных и импульсных токов.

В общем и целом решены все обозначенные во введении к диссертации задачи. Более того, в ходе выполнения исследования была установлена и подтверждена специалистами АКХ им. Памфилова и ЗАО «Проектный институт «МОРДОВАГ-РОПРОМПРОЕКТ»» перспективность использования разработок диссертации для изучения и решения проблем пожаро - и взрывоопасности газораспределительных сетей. Результаты работы внедрены в учебный процесс (лекционный курс «Электромагнитное поле и волновые параметры многопроводных воздушных линий») подготовки специалистов по направлению «Электроэнергетика» ИГЭУ.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Оценка параметров наведенных токов, протекающих в заземлителях при грозовых разрядах/ В.К. Слышалов, А.Ф. Сорокин, А.В. Слышалов, Ю.А. Киселева, Ю.В. Кандалов. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – Иваново, 2008. – 114 с.
2. Расчет электрического поля и параметров системы цилиндрических электродов/ В.К. Слышалов, А.В. Слышалов, Ю.В. Кандалов, Д.А. Полкошников. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 2. – Иваново, 2009. – 124 с.
3. Расчет распределений электрических зарядов, индуцируемых на трубопроводах надземной прокладки полем лидера молнии/ В.К. Слышалов, Ю.В. Кандалов. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 3. – Иваново, 2010.
4. Расчет электромагнитных параметров надземных трубопроводных участков заземляющих систем и разработка математических моделей электромагнитных процессов в них/ Ю.В. Кандалов. – Вестник ИГЭУ. – Вып. 3. – Иваново, 2010.

Публикации в других изданиях

5. Расчет характеристик электрического взаимодействия трубопроводов с протяженными заземлителями/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов, А.В. Слышалов. – III-я Рос. конф. по заземляющим устройствам: Сб. докл.; под. ред. Ю.В. Целебровского – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2008. – 224 с.
6. Методика оценки параметров импульса наведенного тока при ударе молнии вблизи воздушной линии электропередачи/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов. – Информационные технологии, энергетика и экономика. Сб. трудов V Межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 3т. Т2. – 2008. – 152 с.
7. Расчет тока, наведенного в заземлителе при ударе молнии вблизи воздушной линии электропередачи (ВЛЭП)/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов. – Радиоэлектроника, электротехника и энергетика/. XIV междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп.: тез. докл.. – В 3-х т. т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – С. 347-348.
8. Методика определения характеристик электрического взаимодействия трубопроводов с протяженными заземлителями/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов. – Радиоэлектроника, электротехника и энергетика/. XV междунар. науч.-техн. конф. студ. и асп.: тез. докл.. – В 3-х т. т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009, – С. 382-383.
9. Расчет электрического поля системы параллельных цилиндрических электродов/ В. К. Слышалов, Ю. В. Кандалов, Д. А. Полкошников. – Тез. докл. – междунар. науч.-техн. конф. "Состояние и перспективы развития электротехнологии" (XV Бенардосовские чтения)/ ГОУВПО ИГЭУ.—Иваново.—2009.—Т. 1.—С. 27 – 28.
10. К расчету электрического поля и параметров системы цилиндрических электродов/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов, А.В. Слышалов. – Труды ИГЭУ. Вып. 9.- М.: Энергоатомиздат, 2009.
11. Расчет параметров заземлителей трубопроводного типа/ Ю.В. Кандалов. – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студ. и асп. / ГОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2010. – Т. 3. – 100с.

12. Математическая модель электромагнитных процессов в системе трубопровод - земля при синусоидальном токе/ Ю.В. Кандалов. – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студ. и асп. / ГОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2010. – Т.3. – 100с.

13. Определение электрических параметров взаимодействия трубопроводов с протяженными заземлителями и друг с другом/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов. – Информационные технологии, энергетика и экономика: Сб. тр.VII Межрег. науч.-техн. конф. студ. и асп.. В 3т. Т.1. – 2010. – 170 с.

14. О защитном заземлении в локальных системах газораспределения/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов. – ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА: Тез. докл. региональной науч.-техн. конф. студ. и асп. / ГОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2007. – Т. 3. – 100с.

15. Концептуальные вопросы использования заземлителей при обеспечении электробезопасности систем газораспределения/ Ю.В. Кандалов, В.К. Слышалов. – Тез. докл.: междунар. науч.-техн. конф. «Состояния и перспективы развития электротехнологии» / ГОУ ВПО ИГЭУ. – Иваново, 2007. – Т.1. – 260с.

КАНДАЛОВ ЮРИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕСТЕСТВЕННЫХ
ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Подписано в печать . . . 2010. Формат 60x84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,39.

Тираж 100экз. Заказ № .

ГОУ ВПО “Ивановский государственный
энергетический университет им. В.И. Ленина”

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.