МИНОБРНАУКИ РОССИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики

<u>Теоретическое и экспериментальное исследование состава почвы с помощью</u> наименование темы курсовой работы полужирным шрифтом радиофизических методов

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента (ки) <u>2</u> курса <u>2233</u> группы

направления <u>03.04.03 «Радиофизика» профиль «Радиоэлектроника»</u> код и наименование направления

институт физики

наименование факультета

Колесова Германа Николаевича

фамилия, имя, отчества

Научный руководитель

д. ф. - м. н., профессор

должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

<u>М. В. Давидович</u> Инициалы Фамилия

Заведующий кафедрой

<u>д. ф. - м. н., профессор</u> должность, ученая степень, уч. звание

подпись, дата

О. Е. Глухова Инициалы Фамилия

Саратов 2021 г.

Оглавление

Введение	3
Радиофизические методы исследования почв	4
Метод зондирования однопроводной линией	5
Связь неоднородности диэлектрической проницаемости линии с	
искажениями, формируемого импульса	6
Исследование формирующих свойств однопроводной линии	12
Заключение	16
Список используемой литературы	18

Введение

Актуальность. Одной из стратегически важных областей применения радиофизических методов является геологическая разведка. С помощью радиофизических методов подповерхностного зондирования И профилирования проводится оценка электрофизических параметров почв, по которым можно судить о наличии в них полезных ископаемых. Решение обратной задачи зондирования почвы и составление математической модели, позволяющей адекватно производить оценку электрофизических параметров слоев почвы, является актуальной задачей современных междисциплинарных требуются исследований, решения которых современные для экспериментальные радиоизмерительные методы и радиофизические модели.

Практическая/теоретическая значимость. В работе представлены расчеты поверхностного импеданса многослойной структуры и глубины проникновения электромагнитной волны для метода зондирования дипольной антенной в широком диапазоне частот, а также эксперименты и расчеты электрофизических параметров почвы, полученные методом электропрофилирования почвы однопроводной линией. Методы являются бесконтактными методами исследования слоев почвы по сравнению с каротажом или бурением (бурение большого числа скважин, глубина каждой Большое которых метров). ИЗ составляет десятки количество радиофизических методов исследования работает в высокочастотной области от единиц мегагерц до десятков гигагерц. Это накладывает ограничение на глубину зондирования (определения профиля) Метод электропрофилирования с помощью формирующих свойств однопроводной линии ранее не рассматривался как способ определения электрофизических параметров почвы посредством импульса разряда линии.

Целью работы является исследование формирующих свойств однопроводной линии, относительно которых можно получить информацию о структуре почвы.

Разработка Решаемые задачи. программы нахождения ДЛЯ многослойной поверхностного импеданса среды, а также глубины проникновения электромагнитной волны в зависимости от частоты. Вывод аналитического выражения, связывающего параметры импульса, формируемого однопроводной линией с значениями диэлектрической проницаемости в каждой ее точке. Разработка программы для расчета диэлектрической проницаемости в каждой точке линии относительно формируемого импульса. Решение обратной задачи электропрофилирования относительно импульса, формируемого однопроводной линией.

Магистерская работа состоит из введения, 9 глав и вывода теоретической части, 5 глав и вывода практической части, заключения, списка используемой литературы, а также приложения А и приложения Б.

Радиофизические методы исследования почв. Для анализа структуры (неоднородности), влажности, проводимости, степени уплотненности почвы, а также содержания органического вещества и солей, растворенных в почвенной влаге, используются геофизические методы. Согласно методу электроразведки, исследование состава почв можно физическим проводить по следующим параметрам: удельному сопротивлению, электрическому магнитной восприимчивости И намагниченности, диэлектрической проницаемости и др. [2].

Наиболее часто применяют метод симметричного электропрофилирования, как простой в аппаратном исполнении метод его применяют для изучения сравнительно простых геологических структур при условии постоянства сопротивлений перекрывающих отложений. Недостатком метода является длительность исследования по времени, которая зависит от длины исследуемого геоэлектрического профиля. Также для вертикального профилирования основным недостатком метода является сложность определения границ пластов с различной литологией [1], [3].

В случае диэлькометрии значение є изменяется от нескольких единиц (у сухих осадочных пород) до 80 (у воды) и зависит в основном от

содержания воды и минерального состава породы. У изверженных пород є изменяется от 5 до 12, у осадочных — от 2—3 (у сухих) до 16—40 (у полностью насыщенных водой). Диэлектрическая проницаемость играет значительную роль в высокочастотной электроразведке [4].

Метод зондирования однопроводной линией. Из теории длинных линий передач, теории антенн известно о зависимости первичных параметров (C₀, L₀, R₀ и G₀) линий «от поверхности земли» [19], [20], [21], [22]. Особенно это проявляется в однопроводных линиях, и т.н. антеннах Бевериджа [горизонтальный провод над земной поверхностью]. В связи с этим предложен метод определения электрофизических параметров земной поверхности по распространению электромагнитной волны с прямоугольным Теория распространения таких волн рассмотрена в фронтом [23]. многочисленной учебной литературе [23], [24]. При распространении таких волн, как правило, рассматриваются линии без потерь. (грозовой импульс – [23]). В идеализация прямоугольного импульса ходе проведения литературного обзора научных публикаций по распространению волн прямоугольного фронта в однопроводной системе над поверхностью земли не найдено. Как правило, для получения максимального КПД антенн и независимости их параметров от структуры поверхности земли, разработчики стараются обеспечить хорошую проводимость среды под антенной (в задачах о возбуждении антенн рассматривают поверхность земли как идеально проводящую [10]). Также не найден ответ на вопрос, почему в геологических исследованиях (электроразведке) не используются однопроводные длинные линии [5].

Идея метода заключается в формировании импульсов наносекундной длительности посредством системы с распределенными параметрами, в которых присутствует неоднородность. Основная задача метода заключается в интерпретации формы импульса, создаваемого неоднородной линией «провод-земля». Неоднородность данной линии обусловлена неоднородностью диэлектрической и магнитной проницаемостей

исследуемой среды, а также ее удельной электропроводности. Перечисленные факторы сказываются на распространении электромагнитного поля в линии. Следствием этого является искажение формы вершины импульса, формируемого линией.

Сравнивая разрабатываемый метод с ранее открытыми, например, с методом переходных процессов, отмечено сходство решаемых задач. Основной задачей по развитию данного метода является интерпретация формы импульса, получаемого при разряде неоднородной линии «проводземля». Данная задача является обратной задачей геофизики – по заданному полю найти параметры объекта.

Связь неоднородности диэлектрической проницаемости линии с искажениями, формируемого импульса. Неоднородность волнового сопротивления однопроводной линии создает искажение формы вершины импульса, формируемого при ее разряде [23], [26]-[29]. При разряде длинной линии на согласованную нагрузку рис. 1 возникает импульс напряжения, параметры, которого определяются самой линией. В случае разряда неоднородной линии, неоднородность которой обусловлена неоднородность погонной емкости, на нагрузке возникает импульс, вершина которого имеет выбросы [30]. Амплитуды этих выбросов (под амплитудой понимается максимальное значение напряжения от нуля вершины выброса) до пропорциональны значениям погонных емкостей неоднородных участков линии [26].

Для определения закона, связывающего амплитуды выбросов вершины импульса с значениями емкостных неоднородностей (из которых можно определить ДП) однопроводной линии, необходимо воспользоваться эквивалентным представлением линии в виде источника напряжения E с внутренним сопротивлением $R_{\rm sh}$, равным волновому сопротивлению однородной линии р без неоднородностей [28].



Рис. 1. Схема разряда однопроводной линии на согласованную нагрузку. Источник напряжения E с внутренним сопротивлением R_{eH} подключен к сопротивлению нагрузки R_{H} . Эквивалентная схема разряда линии представлена на рис. 2. Для создания режима согласованной нагрузки сопротивление R_{H} должно быть равно волновому сопротивлению линии ρ .



Рис. 2. Эквивалентная схема разряда однопроводной линии.

Внутреннее сопротивление *R*_{вн} источника напряжения *E* определяется согласно формуле

$$R_{_{GH}} = \rho = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}},\tag{1}$$

где L_1 и C_1 – погонные значения индуктивности и емкости однопроводной линии. В случае увеличения погонной емкости, волновое сопротивление линии уменьшится. Неоднородность на участке однопроводной линии можно представить резким уменьшением волнового сопротивления участка линии, которое обратно пропорционально корню из *n* раз, где *n* – это отношение, показывает во сколько раз погонная емкость отрезков однопроводной линии, превышает погонную емкость основной линии.



Рис. 3. Схема искусственной линии, разряжаемой на согласованную нагрузку.

Перейдем от линии, рассматриваемой как систему с распределенными параметрами, к ее аналогу – искусственной линии рис. 3 [31]. В качестве емкостной неоднородности такой линии, по аналогии с длинной линией, могут выступать включения неоднородностей в виде сосредоточенных емкостей, включенных параллельно емкостям любых ее ячеек. Обозначим такую емкость емкостью неоднородности $C_{\rm H}$, тогда, значением п будет являться значение, которое показывает во сколько раз увеличилась емкость ячейки искусственной линии по сравнению с ячейками без включения емкости $C_{\rm H}$. Отсюда отношение волновых сопротивлений ячейки до (обозначим как ρ_1) и после (обозначим как ρ_2) включения неоднородности $C_{\rm H}$ имеет вид

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \sqrt{n} = \sqrt{\frac{C_2}{C_1}} = \sqrt{\frac{(C_n + C_1)}{C_1}}.$$
(2)

Уменьшение волнового сопротивления ячейки искусственной линии эквивалентно уменьшению внутреннего сопротивления R_{6H} источника напряжения E, которое вызовет увеличение напряжения на сопротивлении нагрузки R_{H} . Согласно эквивалентному представлению, падение напряжения U_{H} на нагрузке R_{H} определяется законом Ома для полной цепи

$$U_{\scriptscriptstyle H} = E \, \frac{R_{\scriptscriptstyle H}}{R_{\scriptscriptstyle H} + R_{\scriptscriptstyle BH}}.\tag{3}$$

Падения напряжений на нагрузке до и после подключения емкостной неоднородности имеют вид

$$\begin{cases} U_1 = E \frac{R_{\mu}}{R_{\mu} + \rho_1} \\ U_2 = E \frac{R_{\mu}}{R_{\mu} + \rho_2} \end{cases}$$
(4)

Выразим отношение падений напряжений U_2/U_1 на нагрузке из системы (4)

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_{\mu} + \rho_1}{R_{\mu} + \rho_2}.$$
(5)

Для представления правой части выражения (5) через отношение волновых сопротивлений (2) разделим числитель и знаменатель правой части на ρ_2 , а сопротивление нагрузки R_{μ} приравняем к волновому сопротивлению ρ_1 до включения емкостной неоднородности

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2\frac{\rho_1}{\rho_2}}{\frac{\rho_1}{\rho_2} + 1}.$$
(6)

Полученное выражение позволяет описать взаимосвязь между амплитудой выброса и волновым сопротивлением ячеек искусственной линии. В случае длинной линии в качестве неоднородностей могут выступать отрезки однопроводной линии [29], волновое сопротивление ρ_2 которых отлично от волнового сопротивления ρ_1 основной линии. При включении в искусственную линию сосредоточенных емкостных неоднородностей C_{μ} , формула (2.2.6) с учетом выражения (2.2.2) имеет вид

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2\sqrt{\frac{(C_H + C_1)}{C_1}}}{\sqrt{\frac{(C_H + C_1)}{C_1} + 1}}.$$
(7)

Отметим, что полученная формула согласуется с физическим смыслом при стремлении значения емкостной неоднородности к нулю: отношение напряжений становится равным единице, что говорит об отсутствии выбросов на вершине импульса.

Построим зависимость отношения напряжений $U_2/U_1 = k$ от отношения емкостей до и после включения неоднородности в искусственную линию, выразив это отношение через корень из n

$$k = \frac{2\sqrt{n}}{\sqrt{n+1}}.$$
(8)

Зависимость k(n) представлена на рис. 2.2.4.



Рис. 4. График зависимости приведенного значения амплитуды выброса от приведенного значения емкостной неоднородности участка линии.

При переходе от искусственной линии к однородной, дискретные емкостей становятся погонными [31]. Такой переход дает значения возможность определять неоднородность емкости линии, обусловленной не только включением отрезков однопроводной линии с погонными параметрами, отличными от основной, но и погонное значение емкости в каждой точке по всей ее длине. Приняв значения емкостей в выражении (7) за погонные значения емкостей линии и устремив погонное значение дины отрезка к нулю, получим значение емкости однопроводной линии в некоторой рассматриваемой точке. Как правило, неоднородность погонной емкости линии обусловлена неоднородностью диэлектрика. Поэтому можно совершить переход от погонной емкости к диэлектрической проницаемости однопроводной линии. В итоге получим значение диэлектрической проницаемости в некоторой рассматриваемой точке.

Выражение (7), можно записать через диэлектрические проницаемости участков линии

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}+1}},\tag{9}$$

где, ε_1 – диэлектрическая проницаемость участка однородной линии, ε_2 – диэлектрическая проницаемость линии в любой точке.

Для применения подобного выражения необходимо принять за U_1 значение амплитуды участка вершины импульса, не имеющего выбросов, и значение диэлектрической проницаемости ε_1 в координате точки линии, которая соответствует точке U_1 эпюры разряда линии. Для взаимно однозначного определения связи между координатой линии и значением напряжения в каждый момент времени эпюры разряда линии, применим выражение, связывающее геометрию линии и скорость протекания переходного процесса в ней

$$V = \frac{2l}{\tau},\tag{10}$$

где V – скорость распространения электромагнитной энергии в линии, l – длина линии, τ – длительность импульса, формируемого линией при ее разряде [31]. Для неоднородной линии формула (10) будет определять значение средней скорости распространения электромагнитной энергии в линии. средняя скорость распространения обусловлена градиентом диэлектрической проницаемости земли. Движение фронта электромагнитной энергии в координате линии в определенный момент времени можно выразить следующей зависимостью

$$x = Vt. \tag{11}$$

Подставляя в выражение (10) формулу (11), получим выражение, связывающее координату линии и момент времени, в который возникает некоторое значение напряжения эпюры разряда линии

$$x = \frac{2l}{\tau}t.$$
 (12)

Зная, что значения диэлектрической проницаемости линии зависят от координаты линии, а значения напряжений эпюры разряда линии зависят от времени, можно связать перечисленные величины с помощью полученного выражения (12):

$$\frac{U_2(t)}{U_1(t')} = \frac{2\sqrt{\frac{\varepsilon_2(x)}{\varepsilon_1(x')}}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2(x)}{\varepsilon_1(x')}} + 1} \longrightarrow \frac{U_2\left(\frac{2l}{\tau}t\right)}{U_1\left(\frac{2l}{\tau}t'\right)} = \frac{2\sqrt{\frac{\varepsilon_2(x)}{\varepsilon_1(x')}}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2(x)}{\varepsilon_1(x')}} + 1} \longrightarrow \frac{U_2(x)}{U_1(x')} = \frac{2\sqrt{\frac{\varepsilon_2(x)}{\varepsilon_1(x')}}}{\sqrt{\frac{\varepsilon_2(x)}{\varepsilon_1(x')}} + 1}$$
(13)

С помощью приведенного преобразования можно перейти от рассмотрения эпюры разряда во временной области в пространственную область (в направлении распространения электромагнитной энергии в линии), тем самым, установить взаимно однозначное соответствие напряжений в каждой точке эпюры разряда и диэлектрической проницаемости в координате соответствующей точки линии.

Полученное уравнение может быть использовано для определения градиента диэлектрической проницаемости в любой координате точки линии относительно ее формирующих свойств.

Исследование формирующих свойств однопроводной линии. Для исследования импульсных характеристик коммутатора и определения формирующих свойств однопроводной линии были проведены предварительные испытания. На рис. 5 представлена принципиальная схема используемого коммутатора.



Рис. 5. Принципиальная схема коммутатора для исследования формирующих свойств однопроводной линии. (рисунок исправить 50 кОм, и резистор 100 Ом от КЗ)

На рис. 6 схематически представлено расположение исследуемой однопроводной линии, протяженностью 95.68 м. Высота подвеса линии в опытах равны 0.75, 0.3 и 1.0 м. В первом эксперименте было определено значение емкости однопроводной линии. При высоте подвеса 0.75 м значение погонной емкости составляет 670 пФ.

На рис. 7 представлена осциллограмма заряда однопроводной линии. Заряд линии происходит до напряжения 30 В по экспоненциальному закону. Постоянная времени заряда составляет 55.5 мкс. На рис. 8 представлены осциллограммы разряда однопроводной линии для случаев, когда линия разряжается на резистор сопротивлением больше, меньше и равное волновому сопротивлению линии. В случае разряда однопроводной линии на сопротивление, равное волновому сопротивлению, на нем формируется одиночный импульс, близкий по своей форме к прямоугольному. Амплитуда этого импульса составляет 14 В, что удовлетворяет теории [28], [30], [31].

Вершина импульса имеет искажение, которое обусловлено изменением погонных параметров однопроводной линии. Изменение погонных параметров однопроводной линии обусловлено увеличением погонной емкости на участке 2 рис. 6.



Рис. 6. Расположение исследуемой однопроводной линии. 1 – точка подключения линии к коммутатору, 2 – участок линии, расположенный вблизи металлоконструкции, 3 – точка конца линии.



Рис. 7. Осциллограмма заряда однопроводной линии.



Рис. 8. Осциллограммы импульсов, формируемых однопроводной линией, в режимах согласованной нагрузки R = 489.95 Ом, близкому к режиму холостого хода R = 1155 Ом и близкому к режиму короткого замыкания R = 101.45 Ом.

Для определения зависимости волнового сопротивления однопроводной линии от высоты ее подвеса было проведено эмпирическим путем (подстройкой резистора R₅, на который осуществлялся ее разряд) измерение волнового сопротивления линии. На рис. 9 представлены осциллограммы импульсов, формируемых линией при различных высотах ее подвеса. С увеличением высоты подвеса происходит увеличение волнового



Рис. 9. Осциллограммы импульсов, формируемых линией при различных высотах ее подвеса. сопротивления однопроводной линии. В табл. 1 представлены значения найденных волновых сопротивлений линии в зависимости от высоты ее подвеса. С увеличением волнового сопротивления линии длительность формируемого ею импульса уменьшается.

Таблица 1. таблица значений волновых сопротивлений однопроводной линии в зависимости от высоты ее подвеса.

Высота подвеса линии, м	Волновое сопротивление линии, Ом
0.3	418.28
0.75	489.95
1.0	552.8

Для определения влияния качества заземления на импульс, формируемый линией, были проведены опыты с использованием заземляющего контура, переносного заземлителя и отключения заземления от макета коммутатора. На рис. 10 представлены осциллограммы импульсов, формируемых в перечисленных случаях.



Рис. 10. Осциллограммы импульсов разряда однопроводной линии при использовании заземляющего контура (ground on), переносного заземлителя (ground 1) и без заземления (ground off).

Заключение

Среди рассмотренных радиофизических методов исследования почв, применение разрабатываемого метода в качестве приложения к методу электропрофилирования является актуальным. Теоретически получена зависимость между выбросами эпюры разряда однопроводной линии и градиентом диэлектрической проницаемости, от которого зависит амплитуда выбросов. Определено соответствие между моментами времени, в которых возникают выбросы эпюры разряда линии и координатами соответствующих точек линии. Получено аналитическое выражение, связывающее градиент диэлектрической проницаемости однопроводной градиентом линии С диэлектрической проницаемости почвы.

Согласно результатам проведенных экспериментов однопроводная линия, как и двухпроводная обладает формирующими свойствами. Волновое сопротивление и длительность импульса, формируемого однопроводной линии зависят от высоты ее расположения над землей. Погонные параметры однопроводной линии меняются в зависимости от высоты ее подвеса над землей. Искажение импульса, формируемого однопроводной линией, зависит от неоднородности ее погонных параметров (емкостной неоднородности,

образованной металлоконструкцией и проч.). Качество заземления оказывает влияние на импульс, формируемый однопроводной линией.

Проведено сравнение практически найденных первичных параметров однопроводной линии с теорией. В связи с нехваткой данных для определения причины потери напряжения при формировании импульса линией необходимо провести серию экспериментов по определению сопротивления растеканию тока в почве и подтверждения ранее выдвинутого положения о нелинейном характере поведения сопротивления почвы при воздействии. Ожидаемая обеспечит импульсном информация физическую представленную модель дополнительными сведениями, относительно которых можно описать причины потерь напряжения при разряде однопроводной линии.

Дана интерпретация экспоненциального спада вершины импульса, относительно которой было найдено значение активного сопротивления линии. Определить градиент активного сопротивления линии на данный момент невозможно.

Проведено сравнение градиента ДП однопроводной линии в соответствии с геоэлектрическим разрезом, в направлении пролегания линии. Отмечена закономерность изменения градиента ДП в координатах перехода слоев почвы.

Список используемой литературы

1. Хмелевской В. К. Геофизические методы исследований. / Учебное пособие для геологических специальностей вузов. Петропавловск-Камчатский: изд-во КГПУ, 2004, 232 с.

2. Золотая Л. А. Геофизические исследования почв./ Л.А. Золотая, А.А. Бобачев, М.В. Калишева Геофизические исследования почв.// Тезисы научной конференции «Ломоносовские чтения», апрель 2005 г. Секция геология Подсекция: Геофизика и сейсмометрия.

3. Рыскин М. И. Полевая геофизика для геологов

4. Роберт «Бобби» Гриссо, Марк Элли, Дэвид Холсхаусер, Уэйд Томасон О чем рассказывает удельная электропроводность почвы // Агротехнологии. http://agrotehnology.com/tochnoe-zemledelie/ideologi/o-chem-rasskazyvaetudelnaya-elektroprovodnost-pochvy (18.12.19 г.)

5. Кожевников Н. О. Применение теории длинных линий для исследования собственной переходной характеристики незаземленной горизонтальной петли. // Геология и геофизика, 2009, т. 50, №3, с. 300-316.

6. Кожевников Н. О. Тестирование измерительной системы для малоглубинной импульсной индуктивной электроразведки с помощью замкнутой петли. // XV Международный научный конгресс «Интерэкспо Гео-Сибирь». Сборник материалов в 9 т.. Новосибирск СГУГиГ 2019г.

7. Давидович М.В. Об условии перехода быстрой поверхностной волны в медленную // Радиотехника и электроника 2018. Т. 63, № 6. С. 499–506.

8. Artem'ev V.V., Sochilin A.V., Eminov S.I.. Integral equation of a horizontal dipole located near the interface of media // MMPAM'2019 IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1352, P. 012004. 2019. IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1352/1/012004.

Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности.
 2-е изд. М.: Наука. Физматлит, 1999. 496 с.

 Марков Г.Т., Чаплин А.Ф. - Возбуждение электромагнитных волн. М.: Радио и связь, 1983, 296 с.

11. Ященко А. С., Кривальцевич С. В., Беляева Т. А. Анализ данных о диэлектрической проницаемости почв и их влияние на результат расчёта ослабления земной волны // Распространение радиоволн. Техника радиосвязи. Вып. 2 (45) 2020. DOI 10.33286/2075-8693-2020-45-48-58.

12. Шумилин В.Д. Горизонтальный диполь Герца над плоской землёй // Труды 50-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаметальных и прикладных наук»: Часть VIII. Проблемы современной физики. — М.: МФТИ, 2007. — 200 с. ISBN 978-5-7417-0217-8

13. Milica Rancic, Slavoljub Aleksic. Horizontal dipole antenna very close to lossy half-space surface. <u>https://www.researchgate.net/publication/234839169</u>

14. Хиппель А.Р. Диэлектрики и волны. // М.: Издательство иностранной литературы, 1960г.

15. А. И. Ахиезер, И. А. Ахиезер, Р. В. Половин, А. Г. Ситенко, К. Н. Степанов, Электродинамика плазмы. М., «Наука» (Главная редакция физикоматематической литературы), 1974, 719 с.

16. Арцимович Л. А. Элементарная физика плазмы. М: Изд-во: Госатомиздат, 1963.

17. Жданов С. К., Курнаев В. А., Романовский М. К, Цветков И. В. Основы физических процессов в плазме и плазменных установках. М: Мифи, 2000.

18. Семенов Н.А. Техническая электродинамика. // учебное пособие для вузов. М.: Связь 1973.

 Мейнке Х., Гундлах Ф. Радиотехнический справочник. Том.І. — М.-Л.: Энергоиздат, 1961.

20. Надененко С.И. Антенны. – М.: Связьиздат, 1959.

21. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга.– Л.: Энергоатомиздат, 1986.

22. Иоссель, Э.С. Качанов, М.Г. Струнский. Расчет электрической емкости.– Л.: Энергоатомиздат, 1981.

23. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники в 3 т. Т 1 / Демирчян К.С., Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. 4-е изд. 2003.

24. Гольдштеин Л.Д., Зернов Н. В. Электромагнитные поля и волны 2-е изд. «Советское радио» М.—1971.

25. Вакман Д. Е., Вайнштейн Л. А. Амплитуда, фаза, частота — основные понятия теории колебаний // УФН 123 с. 657–682 1977 https://doi.org/10.1070%2FPU1977v020n12ABEH005479

26. B. Г., Колесов Γ. H. Андрианов Теоретическое определение выброса зависимости амплитуды на вершине импульса OT емкости неоднородности В коаксиальной волноведущей системе // Вопросы прикладной физики: межвуз. науч. сб. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2020. Вып. 27 с. 45-47.

27. Шимони К. Теоретическая электротехника / пер. с нем. Под ред. проф.К. М. Поливанова. – М. «Мир», 1964

28. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / 4-е изд. М. «Энергия», 1975. – 752с.

29. Андрианов В.Г., Шигаев В.Ю., Тимофеев В.В., Хохлов А.Е., Колесов Г.Н. Определение первичных параметров однопроводной линии // Вопросы прикладной физики: межвуз. науч. сб. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2020. Вып. 27 с. 85-88.

30. Евтянов С. И., Редькин Г. Е.. Импульсные модуляторы с искусственной линией.- М. Сов. радио. 1973.

31. Ицхоки Я. С., Овчинников Н. И.. Импульсные и цифровые устройства.// Под ред. проф. Я. С. Ицхоки. - Москва : Сов. радио, 1972. - 591 с.

32. Артеменко, Кожевников Н. О. Моделирование эффекта Максвелла-Вагнера в мерзлых крупнодисперсных породах с порфировой структурой

33. Кожевников Н. О. Быстропротекающая индукционно-вызванная поляризация в мерзлых породах

34. Губатенко В.П. Эффект Максвелла-Вагнера в электроразведке // Физика Земли, 1991,№4. С. 88-98.

35. Андрианов В. Г., Колесов Г. Н. Формирующие свойства коаксиальных волноведущих систем // Вопросы прикладной физики: межвуз. науч. сб. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 2020. Вып. 27 с. 12-17.

 36. Разработка и применение высокоскоростных схем управления

 силовыми
 полевыми
 транзисторами.

 http://valvolodin.narod.ru/articles/fetdrvr.pdf (дата обращения: 07.05.2021)
 07.05.2021)

37. Коровкин Н. В., Шишигин С. Л. Расчетные методы в теории заземления // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. №1 (166). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ raschetnye- metody-v- teorii- zazemleniya (дата обращения: 20.01.2021).

38. Дэвис Дж., Карр Дж. Справочник радиоинженера / ГЭИ 1961

39. Анненков В. З. Уравнения для определения импульсного сопротивления сосредоточенных заземлителей // Электричество, 2018, № 12, с. 22–27 DOI:10.24160/0013 5380 2018 12 22 27

40. Базелян Э.М., Скобарихин Ю.В., Манасыпов Р.Ф. Измерения и расчет импульсных характеристик заземлителей // Известия академии наук энергетика №5 2010.

41. Яковлев О. И., Якубов В. П., Урядов В. П., Павельев А. Г. Распространение радиоволн: Учебник. Под ред. О. И. Яковлева: - М.: ЛЕН АНД, 2009.- 496 с.

42. Губатенко В.П., Бердичевский М.Н., Светов Б.С., Назаров А.А. Эффект Максвелла-Вагнера в двумерных моделях магнитотеллурики. Известия РАН. Физика Земли, №12, 1994, С. 52-61.

43. Агеев Д. В. Изучение явления быстропротекающей вызванной поляризации мерзлых пород / автореферат диссертации. https://istina.msu.ru/dissertations/248106579/

44. Электрические характеристики земной поверхности / Международный союз электросвязи, Женева 2018.

45. Губатенко В. П. Эквивалентные геоэлектрические разрезы в методе становления электромагнитного поля // Изв. Сарат. ун-та Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2020. №2.