

УДК 621.316.99

Д.В. Куклин, В.Н. Селиванов

## Программное обеспечение для расчета волновых процессов в заземлителях и заземленных объектах

D.V. Kuklin, V.N. Selivanov

### Software for calculations of surge processes in ground conductors and grounded objects

**Аннотация.** В статье описано программное обеспечение, предназначенное для расчета процессов, связанных с распространением электромагнитного поля в объектах электрических сетей (опоры линий электропередачи и их заземлители, заземлители подстанций). При помощи данного программного обеспечения выполнена проверка метода моделирования произвольно ориентированных проводников, предложенного в работе Guiffaut et al. (2012) для случая с проводящей средой.

**Abstract.** Software for calculations related to propagation of electromagnetic waves in high-voltage objects (transmission towers and their grounding, substation grounding) has been described in the paper. Using the software the oblique thin wire simulation method proposed by Guiffaut et al. (2012) has been verified for conductive medium.

**Ключевые слова:** метод конечных разностей во временной области, переходное сопротивление, заземление  
**Key words:** finite difference time domain method, transient resistance, grounding

#### 1. Введение

Среди существующих методов расчета распространения электромагнитных волн в протяженных проводниках метод конечных разностей во временной области (FDTD) является наиболее подходящим для учета неоднородностей среды (неоднородности грунта, заземлители в грунте, фундаменты опор линий электропередачи и т.д.) (Куклин, 2013а). Метод конечных разностей во временной области применяется для расчета распространения электромагнитного поля несколько десятилетий, однако широкое распространение он получил лишь с появлением высокопроизводительных персональных компьютеров и показал хорошие результаты при его применении в расчете характеристик заземлителей. Первые работы, посвященные применению этого метода для расчета параметров заземлителей, появились около десяти лет назад. На данный момент с развитием методов моделирования протяженных проводников в неоднородных средах появляется отсутствующая ранее возможность точного расчета электрических параметров заземлителей с учетом сложного характера распространения электромагнитного поля, что необходимо для адекватной оценки грозоупорности линий электропередачи при использовании конкретных заземлителей.

На сегодняшний день существует большое количество различных программ, использующих алгоритмы метода конечных разностей во временной области для решения широкого круга задач, связанных с распространением электромагнитного поля в широком диапазоне частот, начиная от сверхдлинных волн и заканчивая волнами оптического диапазона. Однако среди этого программного обеспечения (ПО) мы не нашли такого, программный код которого подошел бы для расчета переходных характеристик заземлителей или мог бы легко модифицироваться для добавления новых возможностей. Часть ПО является проприетарным и не позволяет свободно использовать и изменять программный код. Так как данный метод непрерывно развивается, то программы с открытым кодом уже устарели и не удовлетворяют поставленной цели. В ходе выполнения работы было создано программное обеспечение, обладающее необходимыми свойствами для решения задачи компьютерного моделирования заземляющих устройств опор линий электропередачи с учетом вертикальных и горизонтальных неоднородностей грунта в условиях северной климатической зоны.

Основное назначение данного ПО – расчет электрических характеристик заземлителей, но оно также может применяться и для других задач, связанных с распространением электромагнитного поля.

Для написания программ использовался язык C++. За исключением графической оболочки, ПО не использует стороннего кода и библиотек, что сводит к минимуму число зависимостей кода.

При написании ПО был использован принцип модульности с целью упрощения изменения, расширения и тестирования программы (рис. 1). Основной модуль не является программой или динамической библиотекой, а только содержит файлы с основными классами, которые могут

использоваться для создания программ. Модуль работы с расчетной моделью компилируется в отдельную программу, использующую файлы основного модуля. Графическая оболочка также компилируется в отдельную программу и использует файлы основного модуля и модуля работы с расчетной моделью.

## 2. Основной модуль

Основной модуль содержит классы с функциями расчета электрического и магнитного полей конечно-разностными выражениями, используемыми для решения уравнений Максвелла в дифференциальной форме; реализацию поглощающих граничных условий (в данном случае применяются UPML (Gedney, 1996)); задание источников поля; функции сохранения результатов расчетов.

Для выполнения расчетов создан класс основного цикла расчета. Перед началом расчета в него следует добавить экземпляры классов в порядке расчетов, которые необходимо совершить за одну итерацию цикла. Данные экземпляры классов содержат функции, в которых выполняются соответствующие классам операции (расчеты поля, учет граничных условий, сохранение результатов).

В качестве источников можно задавать значения полей в конкретных точках расчетной области (что создает основу реализации источников тока и напряжения), а также есть возможность задавать плоские волны.

Данного модуля достаточно для проведения расчетов, но задание модели в таком случае требует компиляции отдельной программы для каждого расчета. К тому же задавать модель в виде кода неудобно и может приводить к ошибкам задания модели, которые трудно обнаружить. Для повышения удобства был создан следующий модуль.

## 3. Модуль работы с расчетной моделью

Данный модуль компилируется в виде программы, использующей файлы основного модуля, и осуществляет расчеты на основе текстового файла описания модели. Кроме описания модели в файле содержатся расчеты, полученные в результате работы программы.

В параметры модели входят: размер расчетной области, размер ячейки, время расчета (число итераций цикла), задание объектов модели (грунт, проводники, источники тока и напряжения, сосредоточенные элементы).

В таблице представлены основные команды. Все числа полей команд являются положительными.

Опишем, как реализованы некоторые команды.

Положение и размер параллелепипеда команды "bar" задается через две ячейки, одна из которых имеет меньшие значения координат по осям  $x$ ,  $y$  и  $z$ , а другая – большие. Удельная проводимость и диэлектрическая проницаемость просто устанавливаются во всех точках, находящихся внутри этого параллелепипеда.

Проводник произвольного диаметра (команда "thin\_wire") задается с помощью метода, описанного в (Railton et al., 2005). Моделирование проводника с произвольным расположением (команда "staircase\_wire") осуществляется при помощи ступенчатой аппроксимации (Noda et al., 2004). Также есть команда "staircase\_corwire" для моделирования произвольно ориентированного проводника с корректировкой ошибки скорости распространения волн (Куклин, 2013b), поля которой совпадают с полями команды "staircase\_wire".

Команда "voltage\_path" задает расположение пути расчета интеграла электрического поля, который в случае конечного размера ячейки, рассчитывается как сумма

$$\sum_i E_i \cdot \Delta, \quad (1)$$

где  $E_i$  – значение напряженности электрического поля в точке расчетной сетки,  $\Delta$  – размер ячейки.

Ток рассчитывается как интеграл напряженности магнитного поля вокруг проводника (также в виде суммы):

$$\sum_i H_i \cdot \Delta, \quad (2)$$

где  $H_i$  – значение напряженности электрического поля в точке расчетной сетки.

Результаты расчетов записываются программой между командами "result(" и ")result".

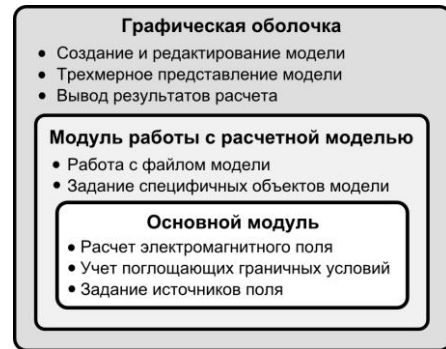


Рис. 1. Структура программного обеспечения

Таблица. Описание основных команд модуля работы с расчетной моделью

Название (описание команды)	№ поля	Значение	Описание поля	Пример
volume (размер области расчета)	1-3	Целое число	Число ячеек по осям x, y, z	volume (200, 100, 150, 0.5)
	4	Веществ. число	Размер ячейки в метрах	
calc_time (время расчета)	1	Веществ. число	Время расчета в микросекундах	calc_time (1.5)
bar (параллелепипед с определенными электрическими свойствами)	1	Латинская буква	Тип	bar (m, 0.05, 3.2, 30, 40, 50, 79, 93, 60)
	2	Веществ. число	Удельная проводимость, см/м	
	3	Веществ. число	Относительная диэлектрическая проницаемость	
	4-6	Целое число	x, y, z-координаты "нижней" ячейки	
	7-9	Целое число	x, y, z-координаты "верхней" ячейки	
thin_wire (проводник с произвольным диаметром)	1	Буква x, y или z	Направление	thin_wire (x, 0.03, 20, 30, 35, 40)
	2	Веществ. число	Диаметр в метрах	
	3	Целое число	Длина в ячейках	
	4-6	Целое число	x, y, z-координаты начала проводника	
staircase_wire (проводник с произвольным расположением)	1-3	Целое число	x-координаты начала проводника	staircase_wire (30, 49, 40, 60, 20, 90)
	4-6	Целое число	x, y, z-координаты конца проводника	
current_source (источник тока)	1	Буква x, y или z	Направление	current_source (z, 0.02, 40, 35, 40)
	2	Веществ. число	Внутренняя проводимость, см	
	3-5	Целое число	x, y, z-координаты	
voltage_path (путь расчета потенциала)	1	Целое число	Число отрезков	voltage_path (1, y, 29, 50, 34, 46)
	2	Буква x, y или z	Направление	
	3	Целое число	Длина отрезка	
	4-6	Целое число	x, y, z-координаты начала отрезка	
current_measure (расчет тока)	1	Буква x, y или z	Направление	current_measure (y, 40, 50, 60)
	2-4	Целое число	x, y, z-координаты	

Форма напряжения или тока источников может задаваться произвольно либо с помощью команд задания определенной формы сигнала. Для моделирования тока молнии часто используется т.н. функция Хейдлера (Heidler, Cvetic, 2002):

$$i = \frac{i_{\max}}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{T}\right)^n}{1 + \left(\frac{t}{T}\right)^n} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (3)$$

для которой числа в команде "heidler" соответствуют следующему порядку обозначений формулы heidler(T, τ, i<sub>max</sub>, η, n, Δt), здесь Δt обозначает интервал рассчитанных значений тока и напряжения в микросекундах, с которым программа выводит результаты расчетов.

На рис. 2 показан пример файла для расчета импульсного сопротивления проводника длиной 50 м.

Этот модуль повышает удобство проведения расчетов и позволяет абстрагироваться от деталей реализации расчетного метода, но отсутствие проверки корректности задания модели может приводить к ошибочным результатам расчетов. Для устранения этого недостатка была создана графическая программа работы с параметрами модели.

```

volume (60, 150, 60, 0.5)
calc_time (2)
bar (g, 0.002, 5, 0, 0, 59, 149, 30)
thin_wire (y, 0.01, 100, 30, 30, 30)
thin_wire (z, 0.1, 3, 30, 30, 30)
thin_wire (z, 0.1, 25, 30, 30, 34)
current_source (z, 0, 30, 30, 33)
voltage_path (1, x, 29, 30, 30, 33)
current_measure (z, 30, 30, 33)
heidler(0.454, 143.0, 1.0, 0.993, 10.0, 0.01)
result(
)result
    
```

Рис. 2. Пример файла описания модели

#### 4. Графическая оболочка

Графическая оболочка представляет собой отдельную программу, использующую файлы остальных модулей и облегчает работу создания текстового файла модели, позволяет проверить корректность задания модели, а также выводит результаты расчетов.

На рис. 3 представлены окна программы (открыт ранее рассмотренный пример файла).

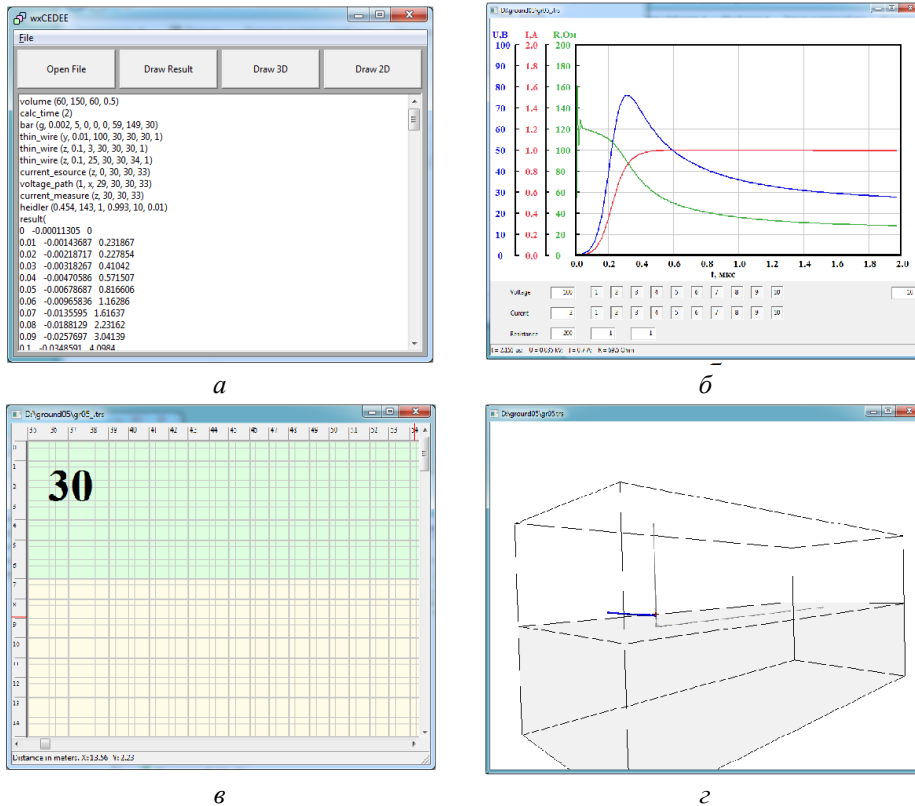


Рис. 3. Графическая оболочка:

а – основное окно программы, б – окно результатов расчета, в – вспомогательное окно создания модели, г – трехмерное представление модели

Графическая оболочка написана с использованием библиотек wxWidgets. Данные библиотеки были выбраны по причине возможности компилирования и запуска программы на различных платформах (Windows, Linux). Для трехмерного представления модели использованы библиотеки OpenGL. Как wxWidgets, так и OpenGL являются свободным ПО, что также повлияло на выбор его использования.

#### 5. Сравнение методов моделирования тонких проводников для расчета импульсных характеристик заземлителей

Как уже было сказано, ПО может легко модифицироваться, например, с целью внедрения каких-либо новых методов моделирования объектов. Так, была выполнена проверка применимости одного из недавно появившихся методов моделирования произвольно ориентированных проводников (*Guiffaut et al.*, 2012) для расчета сопротивления заземлителей, т.к. в оригинальной статье данный метод был проверен только для антенн. С этой целью результаты расчетов сопротивления протяженного заземленного проводника методом (*Guiffaut et al.*, 2012) были сравнены с результатами применения метода (*Railton et al.*, 2005), а также экспериментальными данными. В случае с методом, предложенным *Guiffaut* и др., расчет проводился как для параллельных к сетке проводников, так и для повернутых относительно сетки на 45 градусов.

В качестве расчетной модели была выбрана модель ранее проведенных экспериментов. Измерения проводились по трехэлектродной схеме с разомкнутыми токовым и потенциальным контурами (рис. 4). Длина заглубленного в землю на 0,15 м проводника составляет 200 м. Длина токового и потенциального контуров – по 100 м. Диаметр проводника равен 4 мм. Токовый и потенциальный контуры размещены перпендикулярно заземленному проводнику.

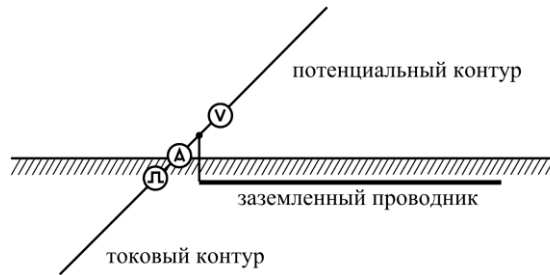


Рис. 4. Схема измерений

Относительная диэлектрическая проницаемость земли принята равной 18, что соответствует экспериментальным данным. Удельное сопротивление грунта – 220 Ом·м. Шаг сетки выбран равным 0,15 м, что в данном случае определяется глубиной расположения заземленного проводника. На рис. 5 показаны результаты эксперимента и расчетов. В случае с повернутыми относительно сетки проводниками, повороту подверглись все проводники, т.е. угол между заземленным и контурными проводниками остался прямым.

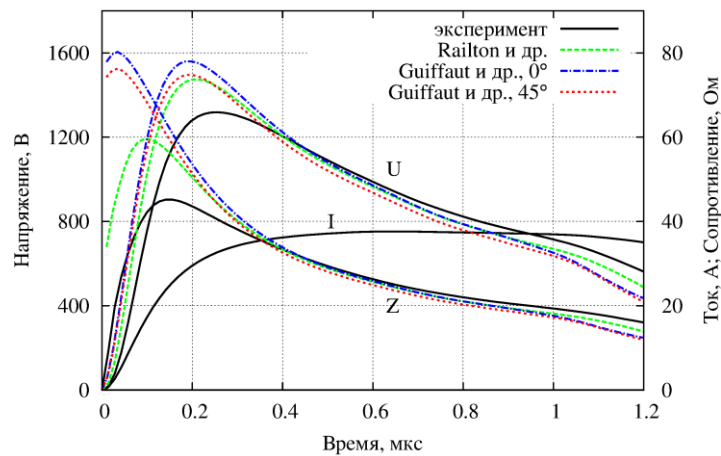


Рис. 5. Результаты измерения и расчетов

Важно отметить, что вследствие особенностей применяемых методов, разность потенциалов между заземлителем и потенциальным проводником измерялась различными способами. В первом случае (*Railton et al., 2005*) – как интеграл электрического поля между проводниками (поле получено непосредственно из расчетной сетки), во втором (*Guiffaut et al., 2012*) – как разность между потенциалами на проводниках. Также остается открытым вопрос корректности моделирования тонких проводников вблизи границы между средами, т.к. в реальности картина полей вблизи границы раздела сред отличается от полей, принятых при моделировании тонких проводников.

## 6. Заключение

Создание ПО для редактирования трехмерной модели является сложной задачей, поэтому рассмотренная графическая оболочка обладает ограниченной функциональностью. Также в методе конечных разностей во временной области, как правило, используется ортогональная расчетная сетка, что накладывает дополнительные ограничения на создание расчетной модели. Таким образом, создание удобной в использовании программы для инженерных нужд требует больших временных затрат. Возможно, упрощения задачи можно добиться с помощью применения т.н. систем автоматизированного проектирования, особенно если в них содержатся данные о параметрах моделируемых объектов (например, опор). Но на данный момент рассмотренное программное обеспечение может использоваться лишь для исследовательской деятельности.

Что касается метода (*Guiffaut et al., 2012*), то это, похоже, единственный на сегодняшний день устойчивый метод моделирования произвольно ориентированных проводников, соединенных сложным образом и имеющих произвольный диаметр. Однако он требует сложного алгоритма, осуществляющего взаимодействие токов в проводниках с электрическим полем расчетной сетки.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Мурманской области (проект № 14-08-98803 p\_север\_a).

## Литература

- Gedney S.D.** An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. V. 44. P. 1630-1639.
- Guiffaut C., Reineix A., Pecqueux B.** New oblique thin wire formalism in the FDTD method with multiwire junctions. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. V. 60. P. 1458-1466.
- Heidler F., Cvetic J.** A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. European Transactions on Electrical Power. 2002. V. 12, N 2. P. 141-150.
- Noda T., Yonezawa R., Yokoyama S., Takahashi Y.** Error in propagation velocity due to staircase approximation of an inclined thin wire in FDTD surge simulation. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. V. 19. P. 1913-1918.
- Railton C.J., Paul D.L., Craddock I.J., Hilton G.S.** The treatment of geometrically small structures in FDTD by the modification of assigned material parameters. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005. V. 53. P. 4129-4136.
- Куклин Д.В.** Коррекция ошибок, вызванных применением ступенчатой аппроксимации проводника в методе конечных разностей во временной области. Вестник МГТУ. 2013б. Т. 16, № 4. С. 728-733.
- Куклин Д.В.** Расчет переходного сопротивления заземлителей с помощью метода конечных разностей во временной области. Вестник МГТУ. 2013а. Т. 16, № 1. С. 114-122.

## References

- Gedney S.D.** An anisotropic perfectly matched layer-absorbing medium for the truncation of FDTD lattices. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1996. V. 44. P. 1630-1639.
- Guiffaut C., Reineix A., Pecqueux B.** New oblique thin wire formalism in the FDTD method with multiwire junctions. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2012. V. 60. P. 1458-1466.
- Heidler F., Cvetic J.** A class of analytical functions to study the lightning effects associated with the current front. European Transactions on Electrical Power. 2002. V. 12, N 2. P. 141-150.
- Noda T., Yonezawa R., Yokoyama S., Takahashi Y.** Error in propagation velocity due to staircase approximation of an inclined thin wire in FDTD surge simulation. IEEE Transactions on Power Delivery. 2004. V. 19. P. 1913-1918.
- Railton C.J., Paul D.L., Craddock I.J., Hilton G.S.** The treatment of geometrically small structures in FDTD by the modification of assigned material parameters. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2005. V. 53. P. 4129-4136.
- Kuklin D.V.** Korrektsiya oshibok, vyzvannykh primeneniem stupenchatoi approksimatsii provodnika v metode konechnykh raznostei vo vremennoy oblasti. [Correction of errors caused by stepwise approximation of a wire in finite difference time domain method]. Vestnik MGTU. 2013b. T. 16, N 4. P. 728-733.
- Kuklin D.V.** Raschyot perehodnogo soprotivleniya zazemlitelei s pomoshch'yu metoda konechnykh raznostei vo vremennoy oblasti [Calculation of transient resistance of groundings using the finite difference time domain method]. Vestnik MGTU. 2013a. T. 16, N 1. P. 114-122.

## Информация об авторах

**Куклин Дмитрий Владимирович** – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, науч. сотрудник, e-mail: kuklindima@gmail.com

**Kuklin D.V.** – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Research Associate, e-mail: kuklindima@gmail.com

**Селиванов Василий Николаевич** – Центр физико-технических проблем энергетики Севера КНЦ РАН, зам. директора, доцент кафедры электроэнергетики АФ МГТУ, e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru

**Selivanov V.N.** – Centre for Physical and Technological Problems of Energy in Northern Areas KSC RAS, Vice Director, Associate Professor of Power Energy Department of AB MSTU, e-mail: selivanov@ien.kolasc.net.ru