

Используя возможность получения эквивалентов схем для токов обратной и нулевой последовательностей на основе алгоритма, изложенного в [3], представляется возможным формировать комплексную схему, отвечающую виду несимметричного КЗ, и определить напряжения всех последовательностей. Используя значения этих напряжений в качестве ба-

зисов в соответствующих схемах замещения можно получить распределение токов и напряжений.

Изложенный метод не требует приведения параметров к базисным условиям, легко программируется и удобен для пользователей. Данный алгоритм может быть адаптирован для моделирования гидравлических режимов трубопроводных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. – 528 с.
3. Слюсаренко С.Г., Костюк Л.Ю. Расчет нормальных установившихся режимов электрических систем двухэтапным методом // Известия вузов. Электромеханика. – 2006. – № 3. – С. 101–106.

Поступила 07.05.2008 г.

УДК 621.3.01 (075)

ПОСТРОЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ПО КУРСУ ТОЭ В РАЗЛИЧНЫХ СИСТЕМАХ ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Н.А. Макенова, Ф.Ю. Канев, Г.В. Носов

Томский политехнический университет
E-mail: nosov@el.ti.tpu.ru

Проведено сравнение серии виртуальных лабораторных работ, написанных на языке программирования C++ и работ, построенных в редакторе Electronics Workbench 5.12. Отмечены достоинства и недостатки методов создания компьютерных приложений, предназначенных для использования в учебном процессе. В качестве примеров рассмотрен ряд моделей, используемых в курсе электротехники.

Введение

В настоящее время в образовательном процессе и для решения научных задач широко используются такие программные редакторы, как Electronics Workbench (Multisim) и MathCAD. Указанные системы программирования являются относительно простыми, универсальными, набор встроенных функций позволяет создавать на их основе модели, применяемые в различных областях. Несмотря на отмеченные преимущества в ряде случаев создание учебных приложений целесообразно на языках низкого уровня, таких как C++, которые позволяют наиболее полно использовать возможности, предоставляемые персональным компьютером.

В данной статье выполнено сравнение компьютерных моделей, построенных на языке C++ и в среде программирования Electronics Workbench 5.12. В качестве примеров использованы модели цепей с сосредоточенными параметрами, линий электропередач и модели, в которых строятся картины электростатического и магнитного полей линии.

1. Моделирование электрических цепей с сосредоточенными параметрами

Среда программирования Electronics Workbench была разработана специально для решения задач

электротехники и электроники [1]. Набор встроенных компонент, таких как резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности; измерительных приборов, осциллографа позволяет моделировать достаточно сложные цепи, исследовать их работу в различных режимах. Удобно использовать этот редактор и в учебном процессе, так в данной среде был создан цикл лабораторных работ по курсу теоретических основ электротехники, написан лабораторный практикум [2]. Примеры построения приложений на основе Electronics Workbench, оформленных в виде лабораторных работ, приведены на рис. 1 и 2.

На рис. 1 показана цепь, предназначенная для исследования резонанса напряжений, в нее входят катушка индуктивности, конденсатор, два резистора. Частотная характеристика цепи выведена на экран анализатора амплитудно-частотных характеристик (Bode Plotter). Здесь видно, что близкий к нулю сдвиг фаз между током и напряжением, т. е. резонанс, достигается при определенной частоте источника ЭДС, входящего в цепь. Редактор позволяет варьировать емкость конденсатора, индуктивность катушки, номиналы резисторов, студентам можно продемонстрировать изменение резонансной частоты, ее зависимость от параметров цепи.

Аналогичным является выполнение лабораторной работы, моделирующей трехфазную цепь

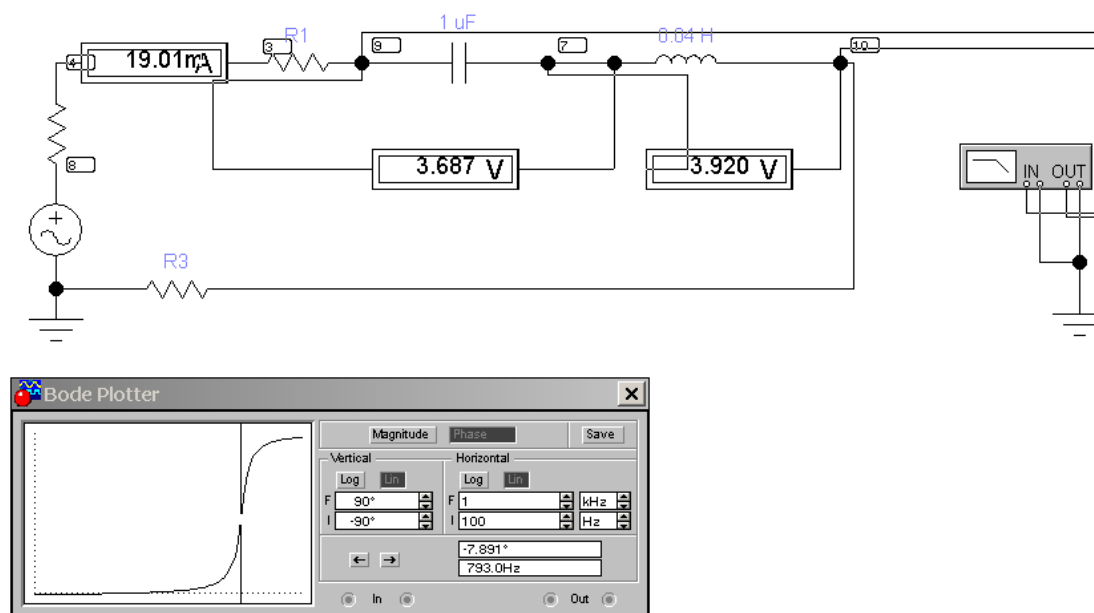


Рис. 1. Моделирование явления резонанса в редакторе Electronic Workbench

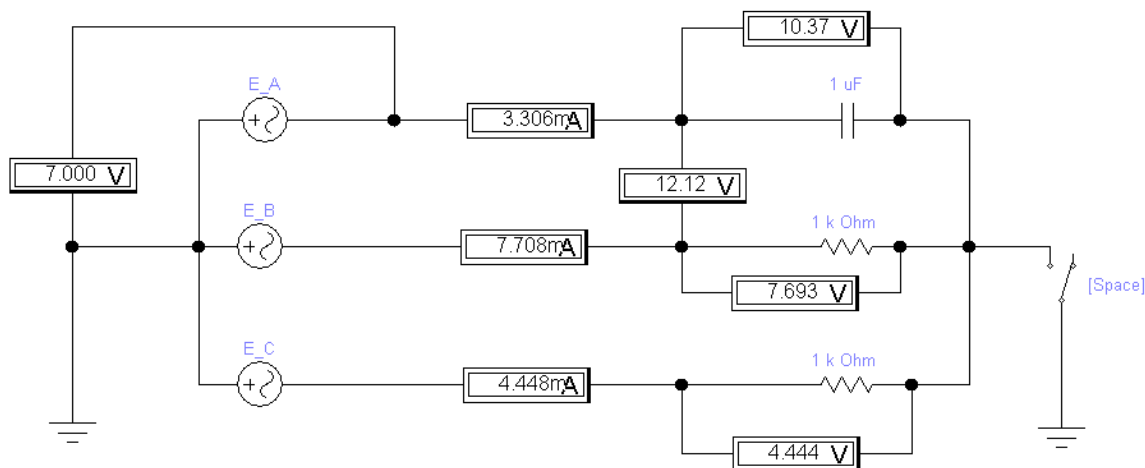


Рис. 2. Модель трехфазной цепи (Electronic Workbench)

(рис. 2). Здесь также возможно провести несколько виртуальных экспериментов, выполнить исследование цепи при различных параметрах.

Кроме универсальности редактора Electronics Workbench, приведенные выше примеры показывают, что выполнение в нем лабораторных работ существенно отличается от экспериментов на лабораторном столе. Компоненты редактора являются лишь условными обозначениями реальных приборов, не совпадает и порядок операций, выполняемых студентом.

Как будет показано ниже, приближение виртуального эксперимента к реальному, получение точного соответствия между операциями возможно при построении моделей на языке C++. Так интерфейс программы, предназначенной для изучения резонанса напряжений, показан на рис. 3.

Компоновка приборов в схеме, их изображения в окне похожи на реальные элементы, качество представления определяется исключительно возможностями автора. Кроме этого в модели воспроизведена

последовательность операций эксперимента, резонанс получается изменением частоты источника, его проявление фиксируется по показаниям амперметра, входящего в электрическую схему.

На принципах соответствия были построены и другие модели, включенные в цикл лабораторных работ. В частности, исследование трехфазной цепи иллюстрируется на рис. 4.

Дополнительной возможностью приложения является автоматическое построение векторной диаграммы, вид которой может быть сопоставлен студентами с диаграммой, построенной самостоятельно. Отметим, что в Electronics Workbench такая возможность отсутствует.

2. Моделирование линии электропередач, как системы с распределенными параметрами

В среде Electronics Workbench возможно исследование режимов работы цепей с распределенными параметрами, в частности, линий электропередач.

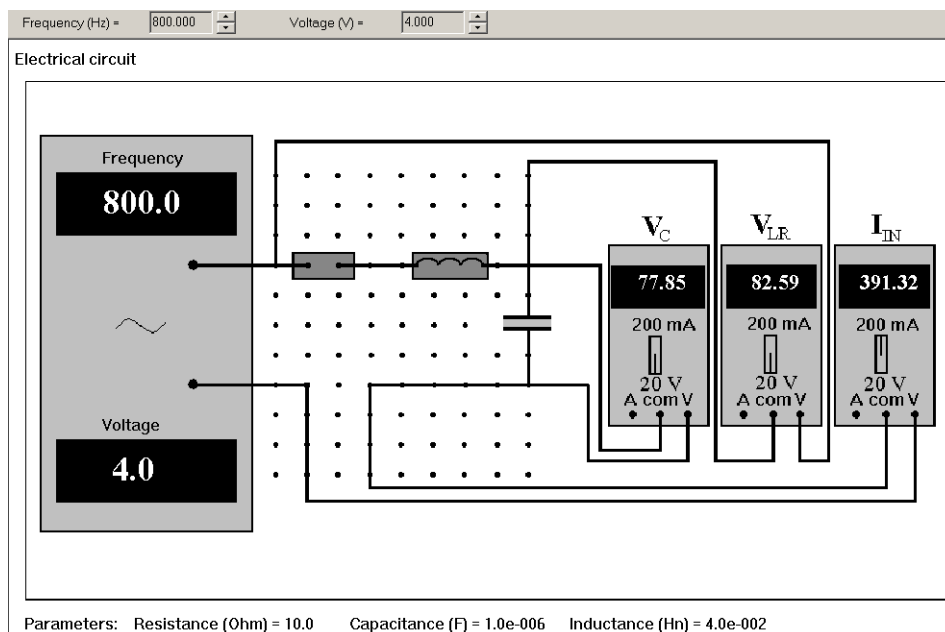


Рис. 3. Виртуальный эксперимент по исследованию резонанса (C++)

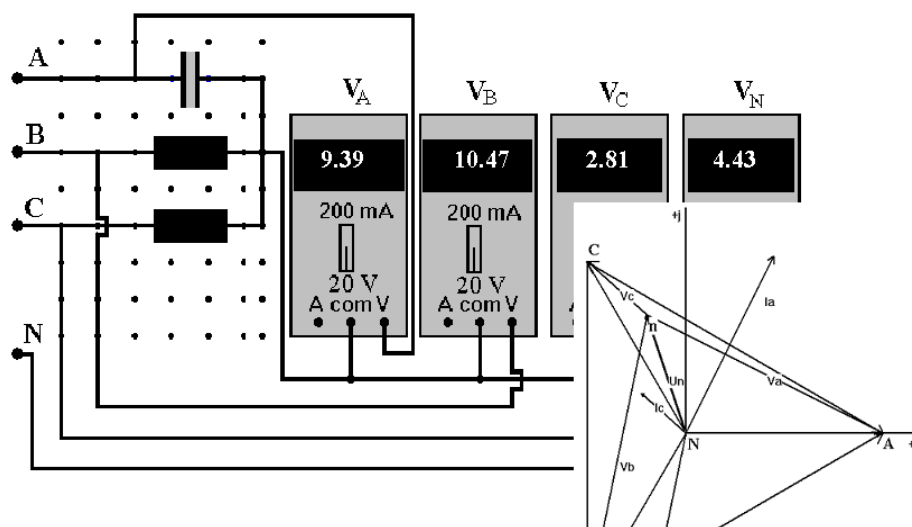


Рис. 4. Трёхфазная цепь (C++)

Но, как и в предыдущем случае, более наглядным и удобным для использования является приложение, написанное на языке низкого уровня (C++).

Построенная авторами модель предназначена для регистрации распределения токов и напряжений в линии, демонстрации зависимости электрических величин от расстояния между точкой включения измерительного прибора и нагрузкой (источником питания).

Основное окно интерфейса программы показано на рис. 5. В процессе выполнения работы пользователь перемещает комплекс измерительных приборов (амперметр и вольтметр) вдоль линии, при этом в нижней части окна выводятся их показания и значение мощности в соответствующей точке. В центральной области интерфейса строится

графики всех трех параметров, регистрируемых в процессе численного эксперимента.

Изменение первичных параметров, таких как сопротивление, емкость, индуктивность и проводимость изоляции между кабелями на единицу длины позволяет изучить работу линии в различных режимах. В частности, подбирая сопротивление и проводимость, можно регулировать затухание сигнала в линии, что демонстрируется графиками, выводимыми на экран, а при задании значений этих величин равными нулю от режима с потерями осуществляется переход к режиму без потерь, сопровождающийся формированием стоячих волн. Таким образом, программа позволяет получить полную информацию о токах и напряжениях в линии и обеспечивает ее наглядное представление.

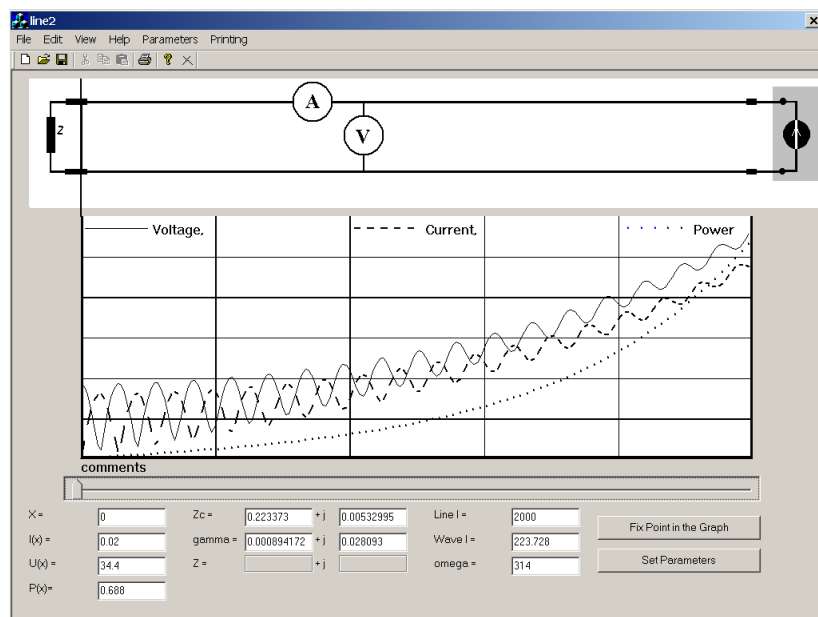


Рис. 5. Распределение тока (штриховая линия), напряжения (сплошная линия) и мощности (указано точками) в линии с потерями

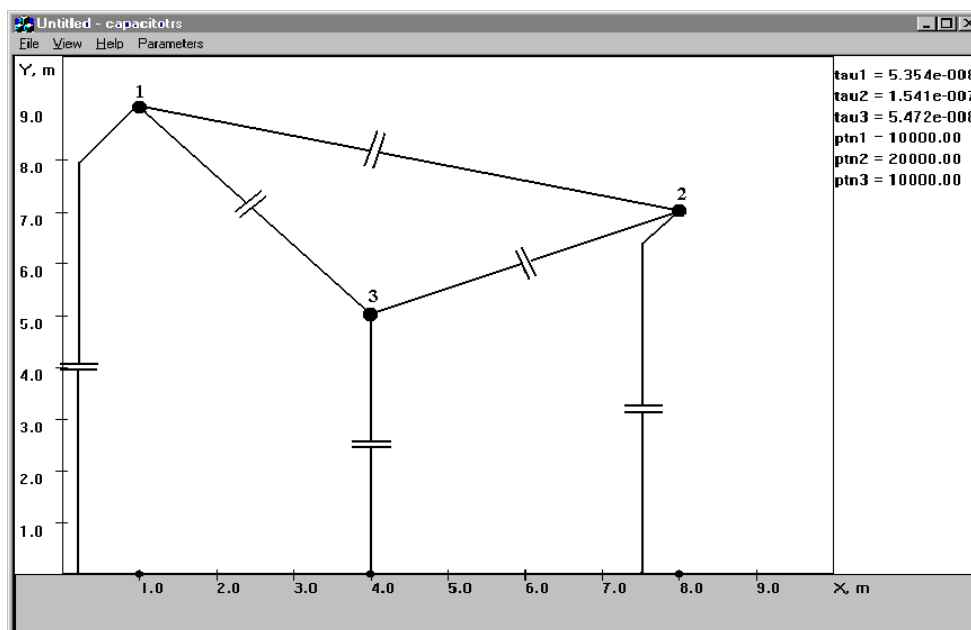


Рис. 6. Основное окно интерфейса программы

3. Определение потенциальных и емкостных коэффициентов линии, собственных и частичных емкостей проводов

Получение таких характеристик линии, как потенциальные и емкостные коэффициенты, собственные и частичные емкости проводов является возможным в редакторе Electronics Workbench, но, как и в предыдущих примерах, порядок выполнения виртуальных экспериментов отличается от реальных, лабораторная работа не является наглядной. Вместе с тем, эта тема подробно изучается в курсе ТОЭ, ей уделяется внимание и в разделе

«электродинамика». Ниже приведено описание работы, построенной на языке C++, отмечены ее основные особенности.

Если несколько проводов линии находятся в среде с неизменной диэлектрической проницаемостью, то связь между их линейными плотностями зарядов (Кл/м) и потенциалами (В) выражается известными линейными зависимостями [3, 4], по которым определяются вышеперечисленные коэффициенты. На рис. 6 приведено основное окно интерфейса лабораторной работы, построенной на языке C++.

В окне показана геометрия линии (координаты проводов), обозначено включение собственных и взаимных емкостей, в правом верхнем углу выводятся заряды проводов (τ) и потенциалы (ptn) для каждого провода. В ходе численного эксперимента пользователь имеет возможность задавать положение проводов в пространстве, варьировать их потенциалы или заряды (в частности, задавать их равными нулю), и вычислять параметры, характеризующие линию.

При выполнении работы студенты должны убедиться, что потенциальные и емкостные коэффициенты, а также частичные емкости проводов линии определяются ее геометрией и не зависят от зарядов и потенциалов проводов.

4. Построение картины электростатического поля

Построение картины электростатического поля – это еще одна задача, которая изучается в курсе теоретических основ электротехники. Вычислить потенциалы точек пространства, получить силовые и эквипотенциальные линии можно в редакторе MathCAD, но подобные действия студенты воспринимают именно как вычисления, а не как выполнение эксперимента. Поэтому было разработано специальное приложение, моделирующее проведение физического исследования.

При обращении к программе на дисплее появляется основное окно интерфейса, в котором видны провода линии с введенными «по умолчанию» координатами. Задание параметров, соответствующих одному из вариантов, указанных в учебном пособии [5], осуществляется в специальном диалоговом окне, где вводятся координаты проводов, их радиусы и потенциалы.

Как было отмечено выше, основное назначение описываемой модели – это построение эквипотенциальных линий электростатического поля. При построении на экране дисплея отмечаются точки, потенциалы которых являются одинаковыми. Первый этап работы – определение максимального и минимального потенциалов поля и деление полученного диапазона на равные интервалы. Для этого на экране выводятся координаты точки (в метрах) в которую помещен курсор и потенциал поля (в вольтах) в этой же точке. По этим данным студентом определяются максимальный и минимальный потенциалы поля, и интервал от максимума до минимума разбивают на несколько равных промежутков, т. е. находят значение потенциала для каждой из линий.

После выбора потенциалов осуществляется построение картины поля, для чего на экране фиксируются точки, формирующие эквипотенциальную линию. Заданием достаточного количества точек отмечается эквипотенциальная линия. Результат может быть подобен картине, представленной на рис. 7.

Для получения полной картины электростатического поля к линиям равного магнитного потен-

циала студенты самостоятельно достраивают силовые линии, которые перпендикулярны линиям равного потенциала и образуют с ними квадратные ячейки. Для проверки полученного результата, картина, построенная студентом, может быть сопоставлена с картиной генерируемой моделью. Эта опция программы может быть включена только преподавателем, после ввода специального пароля. Так, данным рис. 7 соответствует картина, показанная на рис. 8.

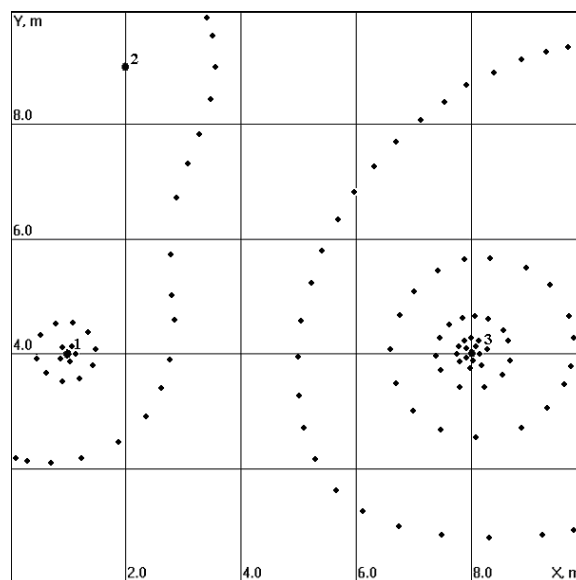


Рис. 7. Линии равного потенциала электростатического поля

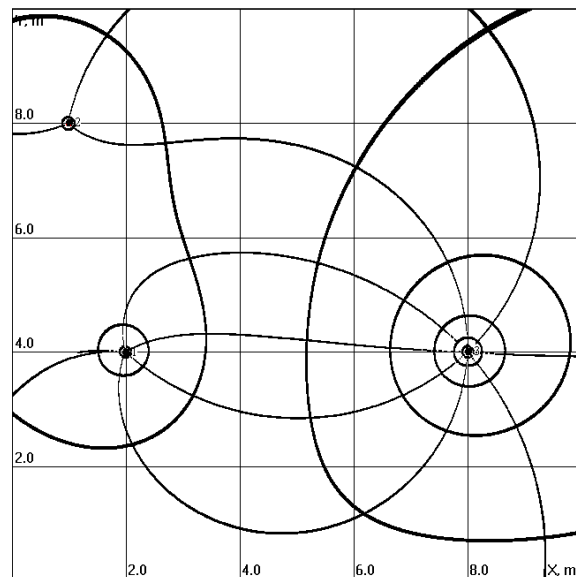


Рис. 8. Картина электростатического поля

При выполнении задания внимание студентов необходимо обратить на то, что построенные эквипотенциальные линии являются замкнутыми, т.е. электростатическое поле потенциально, работа по перемещению заряда в нем зависит только от координат начальной и конечной точек и не зависит от формы траектории.

5. Построение картины магнитного поля

Построение картины магнитного поля выполняется практически так же, как и для электростатического поля, отличием является то, что в этом случае строятся линии скалярного магнитного потенциала, который для каждого из проводов находится по формуле

$$\varphi = -\frac{I}{2\pi}\alpha,$$

а для системы нескольких проводов по принципу суперпозиции. Здесь I – ток, протекающий в проводе, α – полярный угол точки в системе координат, центром которой является провод. Входными данными рассматриваемой модели являются координаты проводов, их радиусы и токи, протекающие в линии.

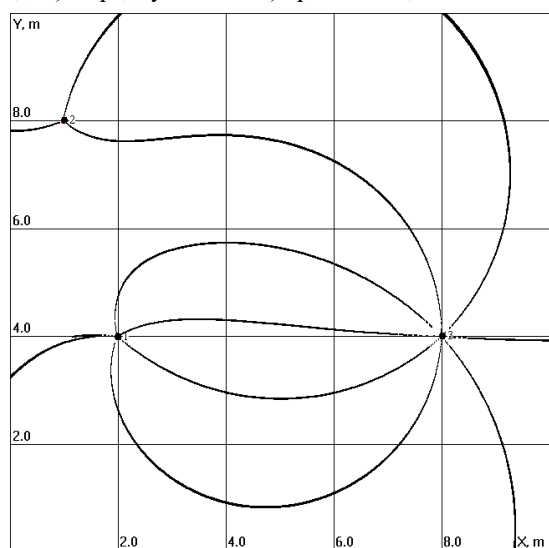


Рис. 9. Распределение скалярного магнитного потенциала

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум на Electronics Workbench. Т. 1, 2 / Под ред. Д.И. Панфилова. – М.: Додека, 1999. – Т. 1. – 271 с.; Т. 2. – 316 с.
2. Пустынников С.В., Эськов В.Д. Руководство к лабораторным работам по ТОЭ в программной среде Electronics Workbench. Ч. 1. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 56 с.
3. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

Для одного из набора параметров эквипотенциальные линии приведены на рис. 9. Полученный рисунок студенты самостоятельно дополняют силовыми линиями, методика построения которых описана в руководстве к лабораторным работам [5]. При этом внимание студентов должно быть обращено на то, что эквипотенциальные линии начинаются и оканчиваются на проводниках, а силовые линии замкнуты. Еще одна особенность распределения заключается в том, что при сохранении геометрии линии и задании значений токов пропорционально зарядам в предыдущей работе, силовые линии магнитного поля совпадают с линиями равного потенциала электростатического поля и наоборот.

Заключение

Написанный на языке программирования C++ набор компьютерных моделей и разработанный на его основе цикл виртуальных лабораторных работ охватывает основные темы, изучаемые в курсе теоретических основ электротехники. С использованием прикладных программ, представленных в настоящей статье, возможно не только изучение электрических цепей с сосредоточенными параметрами, но и моделирование линий электропередач, построение картины электростатического и магнитного полей.

Разработанные компьютерные модели имеют ряд преимуществ по сравнению с приложениями, создаваемыми в средах программирования Electronics Workbench и MathCAD, они являются более информативными, наглядными, простыми в использовании.

4. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
5. Канев Ф.Ю., Носов Г.В., Макенова Н.А. Лабораторный практикум по исследованию длинных линий и электромагнитного поля на ЭВМ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2001. – 52 с.

Поступила 14.05.2008 г.