

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Л.К. Бурулько

**ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

*Рекомендовано в качестве учебного пособия
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2016

УДК 621.31:519.876(075.8)

ББК 31.2:22.1я73

Б91

Б91

Бурулько Л.К.

Программные средства профессиональной деятельности / Л.К. Бурулько; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2016. – 150 с.

В учебном пособии рассмотрены основные принципы и методы математического моделирования элементов, входящих в силовую часть электромеханических систем переменного тока.

Пособие подготовлено на кафедре электропривода и электрооборудования, соответствует программе дисциплины и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.31:519.876(075.8)

ББК 31.2:22.1я73

Рецензенты

Доктор технических наук,
профессор кафедры ПрЭ ТУСУРа

А.В. Кобзев

Кандидат технических наук
13-го отдела НИИАЭМ ТУСУРа

Н.А. Михневич

© ФГАОУВО НИ ТПУ, 2016

© Бурулько Л.К., 2016

© Оформление. Издательство Томского политехнического университета, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА	8
1.1. Программное обеспечение.....	8
1.2. Прикладное программное обеспечение	10
1.3. Математическое моделирование и пакеты прикладных программ	13
Глава 2. ПРИКЛАДНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	16
2.1. Интерфейс программы	16
2.2. Основные этапы создания схем	19
2.3. Выбор и подключение контрольно-измерительных приборов	22
2.4. Решение типовых электротехнических задач	30
2.5. Проверка основных теоретических положений электротехники	32
2.6. Моделирование типовых электрических и электронных устройств.....	35
Глава 3. ПРИМЕНЕНИЕ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА MATHCAD	46
3.1. Интерфейс программы <i>MathCAD</i>	46
3.2. Решение типовых электротехнических задач	49
3.2.1. Расчет и анализ стационарных режимов работы	51
3.2.2. Расчет характеристик эквивалентного генератора	55
3.2.3. Метод комплексных амплитуд	60
3.2.4. Расчет и анализ стационарных режимов в цепях переменного тока	63
3.2.5. Расчет и анализ динамических режимов работы	66
3.3. Символьные вычисления в системе <i>MathCAD</i>	69
Глава 4. РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ПРОГРАММЕ MICROSOFT EXCEL	75
4.1. Интерфейс программы <i>Excel</i>	75
4.2. Применение функций <i>Excel</i> в электротехнических расчетах	78
4.3. Решение типовых электротехнических задач	80
4.3.1. Расчет электрической цепи постоянного тока	80
4.3.2. Расчет электрической цепи переменного тока.....	86
4.4. Анализ и расчет электротехнических устройств в программе <i>Excel</i>	92
4.4.1. Расчет электротехнических устройств в <i>Excel</i>	93
4.4.2. Численное решение задачи в <i>Excel</i>	95
4.4.3. Анализ динамики электротехнических устройств в <i>Excel</i>	97

Глава 5. ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРИКЛАДНОМ ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ <i>MATLAB/SIMULINK</i>.....	103
5.1. Операционная среда Simulink	103
5.2. Создание модели.....	107
5.3. Решение электротехнических задач.....	109
5.4. Исследование электротехнических устройств	113
5.4.1. Вывод передаточных функций электрической схемы	113
Глава 6. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ЗАДАЧ В ПРОГРАММЕ «<i>ELCUT</i>»	119
6.1. Применение.....	119
6.2. Основные принципы работы	120
6.3. Модель для расчета электростатического поля	131
Приложение 1. ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА	140
Приложение 2. ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ $P(R_H)$.....	142
Приложение 3. ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	144
Приложение 4. ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАРЯДА КОНДЕНСАТОРА.....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	148

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит активное внедрение компьютерных технологий в процесс подготовки специалистов по различным специальностям. Поэтому целесообразность использования компьютера в учебном процессе очевидна. Один из способов применения компьютера и его сочетаемость с содержанием, формами и методами обучения представлены в дисциплине «Программные средства профессиональной деятельности».

Целью дисциплины «Программные средства профессиональной деятельности» является подготовка специалистов, владеющих общими принципами и методами математического моделирования с использованием пакетов прикладных программ и автоматизаций с их помощью инженерной деятельности и имеющих навыки их практического использования в области электромеханики и энергетики.

В соответствии с рабочей программой дисциплина изучается один семестр. При этом теоретический материал изложен в виде лекций, в которых приведены принципы и основы использования пакетов прикладных программ (ППП) для автоматизации профессиональной деятельности специалистов по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника». Основное внимание, при освоении этой дисциплины, уделяется выполнению лабораторных работ в компьютерных классах. Для закрепления навыков работы с прикладными программами каждый студент выполняет самостоятельно индивидуальные задания.

Основой при изучении дисциплины являются знания информатики и вычислительной техники, основ математического анализа, теоретических основ электротехники, теоретических основ электроники, инженерной и компьютерной графики. Студенты должны иметь уверенные навыки работы с персональным компьютером.

Инженерная деятельность как профессия связана с регулярным применением научных знаний в технической практике. Целью инженерной деятельности – создание принципиально нового технико-технологического артефакта.

Проблемы инженерной деятельности тесно сопряжены с проблемами социальными. В этом отношении особенно важна роль государства. Сегодня российские инженеры остро нуждаются в четкой инновационной политике государства, в пополнении своих рядов высококвалифицированными специалистами, в повышении их социального статуса, что позволило бы быстро ликвидировать отставание от высокоразвитых стран по ряду позиций. Создание и развитие техники информационных

процессов и технологий делает деятельность инженера всеохватывающей. В этой связи следует обратить внимание на то, что при полных циклах автоматизации человек исключается из технической системы, но он все же остается главным агентом в процессе разработки, внедрения и освоения новой техники и технологии.

В электротехнике, электроэнергетике задача инженера – организация процессов получения, передачи, преобразования и распределения электрической энергии на основе разработки соответствующих систем, машин, аппаратов, регулирующих устройств и т.п.

Инструментарием современной инженерной деятельности является система автоматизированного проектирования (САПР), с помощью которой реализуются этапы *функционального, алгоритмического, конструкторского и технологического* проектирования.

Функциональное проектирование – это разработка структурных, функциональных и принципиальных схем технических систем.

Алгоритмическое проектирование – разработка алгоритмов функционирования технических систем, и программного обеспечения для управления системой в целом и ее отдельными блоками с помощью ЭВМ и издание общего математического обеспечения.

Конструкторское проектирование – выбор формы и материалов, подбор унифицированных изделий, их пространственное расположение и т.п.

Технологическое проектирование – разработка технологических процессов и создания технической системы.

При этом все многообразие возникающих задач решается путем математического моделирования, а проектные процедуры сводят к расчету и проектированию отдельных устройств и системы в целом, анализу процессов в системе, к оптимизации устройств и систем и их синтезу.

Расчет и проектирование состоят в определении параметров и характеристик отдельных элементов, звеньев, блоков, устройств, частей системы и всей системы в целом. Для этого на основе определенных физических зависимостей и закономерностей, заложенных в основу их принципа действия, составляются алгоритмы и методики их расчета.

Задачи анализа сводятся к определению свойств и показателей системы и конкретного ее объекта при изменении их внутренних параметров или внешних воздействий, в исследовании переходных и установившихся режимов работы, условий устойчивости и т.д.

Оптимизация состоит в определении такой оптимальной комбинации значений внутренних параметров элементов и устройств системы и системы в целом при их неизменной структуре, при которой одна или несколько внешних характеристик или параметров объекта исследований имеют наилучшие значения согласно выбранному критерию. При

этом составляется функция цели, в концентрированной форме отражающая конечный смысл решаемой задачи: поиск оптимальной характеристики объекта с учетом определенных ограничений. Поиск же глобального минимума или максимума функции цели, в зависимости от характера решаемой задачи, осуществляется по нескольким методам, составляющим предмет нелинейного программирования.

Синтез заключается в определении структуры проектируемого объекта и значений параметров его элементов, при которых устройство наилучшим образом, согласно выбранному критерию, отвечает необходимым требованиям.

Глава 1

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА

Современная профессиональная подготовка студентов, предполагает разработку специальных средств, которые необходимы преподавателям и студентам для успешной реализации своей деятельности и в полной мере соответствующие их уровню профессиональной квалификации и образованности. В качестве таких средств в учебном пособии рассматриваются программные средства подготовки (профессиональной подготовки) студентов.

В настоящее время можно выделить два направления по использованию программных средств. Первое для организации процесса обучения и второе для использования программных средств в обучении.

1.1. Программное обеспечение

Процесс обучения в целом – это получение определенных теоретических знаний и приобретение навыков их использования в обычной жизни и профессиональной деятельности. Организация этого процесса связана с взаимодействием преподавателя и студента, в ходе которого студент приобретает знания, умения и навыки. В настоящее время это взаимодействие осуществляется с использованием компьютерных технологий. Для организации процесса обучения в этом случае необходимо соответствующее программное обеспечение. Его функциональное назначение состоит в том, чтобы взаимодействие между преподавателями и студентами направлялось на развитие специальной образованности студентов по конкретным дисциплинам.

Программное обеспечение – это совокупность программ системы обработки информации и программных документов, необходимых для описания дисциплин и стратегии профессиональной подготовки студентов по определенному направлению и специальности.

Программное обеспечение принято подразделять:

- по назначению на *системное программное обеспечение, прикладное и инструментальное*;
- по способу распространения и использования на *несвободное/закрытое, открытое и свободное*.

Системное программное обеспечение – это комплекс программ, которые обеспечивают эффективное управление компонентами вычислительной системы, такими как процессор, оперативная память, каналы ввода-вывода, сетевое оборудование, выступая как «межслойный ин-

терфейс» с одной стороны которого аппаратура, а с другой приложения пользователя. В отличие от прикладного программного обеспечения, системное не решает конкретные прикладные задачи, а лишь обеспечивает работу других программ, управляет аппаратными ресурсами вычислительной системы и т.д.

В учебном процессе системное программное обеспечение (СПО) используют для активизации и развития самообразования студентов. Для этого преподавателем совместно с программистом, обслуживающим СПО, разрабатывается программная система, чтобы индивидуализировать работу с каждым студентом. Эта система должна обеспечивать студенту:

- предоставление информации об организации учебного процесса через портал вуза;
- предоставление доступа к учебно-методическим комплексам (УМК);
- проведение по возможности чат – консультации;
- создание и проведение форумов по дисциплинам;
- проведение текущего контроля с использованием портала вуза;
- предоставление информации об успеваемости студентов.

Таким образом, с помощью СПО обеспечивается новый вид процесса обучения – проблемно-компьютерное обучение.

Прикладное программное обеспечение – это прикладная программа, предназначенная для выполнения определенных пользовательских задач и рассчитанная на непосредственное взаимодействие с пользователем. В большинстве операционных систем прикладные программы не могут обращаться к ресурсам компьютера напрямую, а взаимодействуют с оборудованием и прочим посредством операционной системы.

Инструментальное программное обеспечение – программное обеспечение, предназначенное для использования в ходе проектирования, разработки и сопровождения программ. Обычно этот термин применяется для акцентирования отличия данного класса ПО от прикладного и системного программных обеспечений.

Несвободное/закрытое (проприетárное) программное обеспечение – программное обеспечение, являющееся частной собственностью авторов или правообладателей. Правообладатель такого ПО сохраняет за собой монополию на его использование, копирование и модификацию, полностью или в существенных моментах.

Открытое программное обеспечение – программное обеспечение с открытым исходным кодом. Исходный код таких программ доступен для просмотра, изучения и изменения, что позволяет пользователю при-

нять участие в доработке самой *открытой программы*. Использовать этот код можно для создания новых программ и исправления в них ошибок – через заимствование исходного кода, если это позволяет лицензия, или через изучение использованных алгоритмов, структур данных, технологий, методик и интерфейсов.

Свободное программное обеспечение может распространяться, устанавливаться и использоваться на любых компьютерах дома, в офисах, школах, вузах, а также коммерческих и государственных учреждениях без ограничений.

В учебном процессе Томского политехнического университета используется более сотни программных продуктов. В их число входят популярные офисные продукты (Word, Excel, PowerPoint, Corel Draw, Photoshop). Системы автоматизированного проектирования общего назначения (AutoCad, P-CAD, Accel EDA, Electronics Workbench, Microcap и др.), узкоспециализированные САДы и моделирующие программы (Code Composer Studio, Mustang, Dakkar, TKZ3000, Genie и др.), математические продукты (MathCAD, Matlab), системы программирования (Delphi, Builder C++ и др.). Разработанные непосредственно для учебного процесса прикладные программы для моделирования и расчета процессов в электротехнике, электромеханике и электроэнергетике.

1.2. Прикладное программное обеспечение

Основную часть прикладного программного обеспечения составляют *пакеты прикладных программ (ППП)*. *Пакет прикладных программ* – это комплекс программ, предназначенный для решения определённого класса задач по некоторой тематике. Пакеты разрабатываются таким образом, чтобы максимально упростить использование компьютера, специалистами разных профессий, освободив их от необходимости изучения программирования и других областей знаний, связанных с компьютером. Это достигается за счёт так называемого *дружественного интерфейса*. При этом пользователь выполняет в режиме общения с компьютером набор действий, определённых входным языком пакета (ввод с клавиатуры, выполнение команд, просмотр информации и т.п.) или следует указаниям встроенного средства (программного модуля) пошагового достижения результата, называемого мастером.

В настоящее время существует огромное количество ППП, которые охватывают практически все стороны деятельности человека. Всё множество ППП можно разделить на два больших класса: пакеты общего назначения и специализированные пакеты.

ППП общего назначения – универсальные программные продукты, предназначенные для автоматизации разработки и эксплуатации функциональных задач пользователя.

К этому классу ППП относятся:

- редакторы: текстовые (Word, WordPad) и графические (CorelDraw, Photoshop);
- электронные таблицы (Excel, Lotus 1-2-3);
- системы управления базами данных (Access, Oracle);
- средства подготовки презентаций (PowerPoint);
- интегрированные ППП (MathCAD, MatLAB);
- системы автоматизации проектирования (AutoCAD);
- оболочки экспертных систем и систем искусственного интеллекта и др.

В классе пакетов общего назначения особое место занимают интегрированные пакеты прикладных программ. Они представляют собой многофункциональный набор программ, в котором в одно целое соединены возможности различных функциональных пакетов общего назначения. Идеей объединения является, с одной стороны, функциональная полнота дополняющих друг друга программ, имеющих однотипный пользовательский интерфейс, а с другой стороны, возможность выполнять весь технологический цикл обработки данных на одном рабочем месте.

Обобщенная архитектура ППП, отражающая ее внутреннюю организацию и способ общения с пользователем представлена на рис. 1.1.

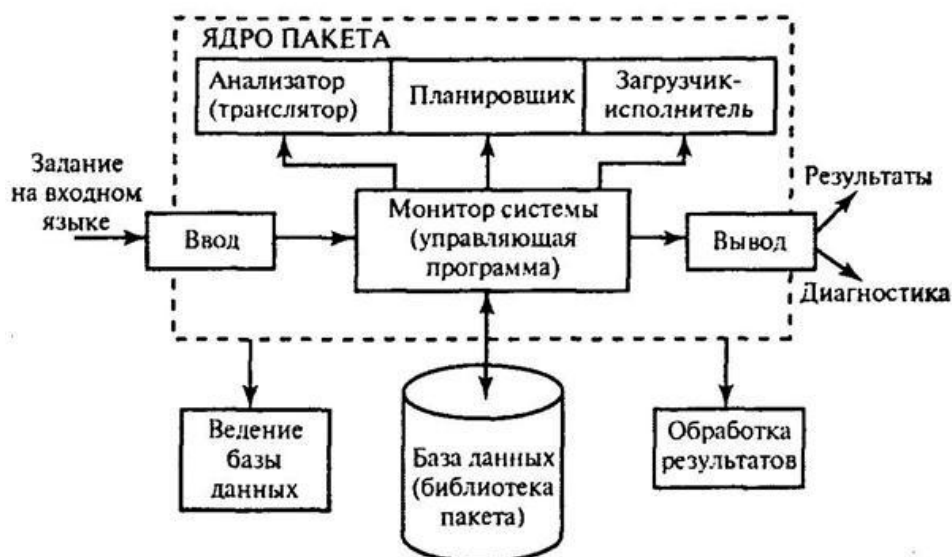


Рис. 1.1. Обобщенная архитектура пакета прикладных программ

В архитектуре пакета можно выделить ядро пакета. *Ядро* – это неизменная часть пакета, т.е. системное обеспечение ППП. Оно изменяется в зависимости от предметной области – проблемное обеспечение. Ядро (монитор) пакета развивает возможности операционных систем ЭВМ для решения конкретных прикладных задач.

Архитектура ППП включает следующие основные составляющие:

- монитор пакета (управляющая программа);
- библиотека программных модулей (база данных);
- процессор с входного языка;
- сервисные средства пакета.

Монитор пакета – специальная программа, которая по формулировке задачи на входном языке автоматически организует вызов модулей в нужной последовательности, обеспечивает обмен информацией между ними и управляет процессом решения задач. Ввод модели на входном языке можно осуществлять в произвольном порядке.

Анализатор обеспечивает трансляцию исходного текста задания на входном языке пакета во внутренний язык ЭВМ. Другими словами осуществляется расшифровка конструкций, сформулированных на входном языке пакета и извлечение из них информации для организации работы всех остальных программ пакета.

Планировщик вычислительного процесса определяет правильную необходимую цепочку, последовательность обработки модулей для выполнения соответствующих инструкций.

Загрузчик-исполнитель последовательно загружает и выполняет все программные модули по вычислительной схеме планировщика.

Пакет прикладных программ сопровождается документацией, необходимой для его установки и эксплуатации. Документация включает:

- паспорт и пояснительную записку (составные части и характеристику пакета – назначение и область применения);
- инструкцию по вводу ППП в эксплуатацию, т.е. инструкцию по генерации пакета на ЭВМ;
- инструкцию для пользователя по подготовке исходных данных и инструкцию по работе с пакетом для решения задач;
- документацию на модули.

Модуль системы – это программа, реализующая законченную функцию, ориентированная на его совместное использование с другими модулями и в соответствии с этим оформленная.

Итак, ППП позволяет хранить относительно простые готовые программы (модули) и автоматически собирать из них сложные программы,

подобно тому, как из унифицированных деталей строятся разнообразные архитектурные сооружения.

Для автоматической сборки модулей и разработки пользовательских моделей пакеты прикладных программ оснащены так называемыми *пользовательскими интерфейсами* (UI – англ. *user interface*). Они представляет собой *совокупность средств и методов*, при помощи которых пользователь взаимодействует с различными, чаще всего сложными, машинами, устройствами и аппаратурой.

По отношению к компьютерным программам, под интерфейсом прикладной программы подразумевается набор средств, методов, правил и списка инструкций, точно описывающих заложенный алгоритм взаимодействия любой системы, управляемой человеком.

Особое и отдельное внимание в интерфейсе пользователя уделяется его *эффективности и удобству использования*. Его основные характеристики – это *понятный, удобный, дружелюбный*.

Для прикладных программных пакетов – это оконный интерфейс, т.е. способ организации полноэкранный интерфейс программы, в котором каждая интегральная часть располагается в *окне* – собственном субэкранном пространстве, находящемся в произвольном месте «над» основным экраном. Несколько окон, одновременно располагающихся на экране, могут перекрываться, виртуально находясь «выше» или «ниже» друг относительно друга.

1.3. Математическое моделирование и пакеты прикладных программ

Пакеты прикладных программ, используемые при подготовке студентов в направление 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», на первом и втором курсах предназначены:

- для приобретения навыков по решению простейших электротехнических задач с использованием математических моделей;
- для освоения студентами основ и принципов метода математического моделирования.
- для решения на компьютерах всех видов математических задач с визуализацией этапов вычислений.

Навыки по решения простейших электротехнических задач в дисциплине «Программные средства профессиональной деятельности» студенты приобретают при расчетах простых и сложных электрических схем. При этом рассматриваются установившиеся и переходные процессы в этих схемах.

При разработке пользовательских программ в ППП, рассматриваемых в данной дисциплине, используются методы расчета электрических цепей изучаемые в дисциплинах «Электротехника» и «Теоретические основы электротехники». В основе этих методы, как известно, положены закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа [2, 12]. При этом необходимо обращать внимание студентов на то, что установившиеся режимы работы электрических цепей, с математической точки зрения, описываются алгебраическими уравнениями, а динамические режимы работы, сопровождаемые переходными процессами, дифференциальными уравнениями. *Данный педагогический аспект является одним из основных при разработке математических моделей в ППП.*

Вне зависимости от используемого прикладного программного пакета математическая модель исследуемого объекта, процесса и явления составляется в соответствие со структурой, представленной на рис. 1.2.

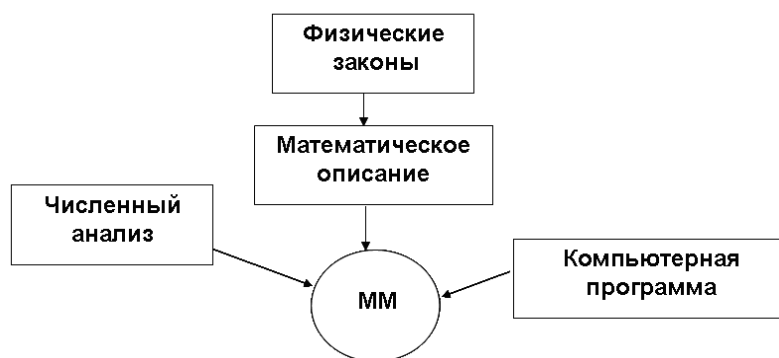


Рис. 1.2. Обобщенная структура построения математической модели

Основу математической модели, в соответствие с представленной на рис. 1.2 структурой, определяют физические законы функционирования исследуемого объекта. Математическое описание составляется с учетом определенных допущений в виде алгебраических или дифференциальных уравнений и их систем. Компьютерная программа – это используемый пакет прикладной программы, а численные анализ – метод решения уравнений, заложенный в монитор пакета. На данный *педагогический аспект* при разработке модели так же необходимо обращать внимание студентов на лекциях и практических занятиях.

Прикладные программные пакеты позволяют проводить исследование явлений и процессов в объектах во временной, частотной областях и в пространстве состояний. При этом использованы классический, операторный и численные методы расчета и решения уравнений. Каждый ППП имеет определенный набор операторов и встроенных функций для преобразования компонентных и топологических уравнений [1, 10, 11].

Набор численных методов расчета, операторов и встроенных функций в прикладных программных пакетах в настоящее время при подготовке программистов выделяется в специальный раздел математики, а именно *компьютерной математики*. При подготовке бакалавров по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» этот набор позволяет осуществлять решение на компьютерах всех видов математических задач с визуализацией этапов вычислений.

Рассматриваемые в дисциплине «Программные средства профессиональной деятельности», пакеты прикладных программ позволяют широко использовать визуализацию полученных результатов исследований. Связано это с тем, что каждый из ППП имеет свой текстовый редактор, математический интерпретатор и графический процессор, использование которых осуществляется через соответствующие командные строки интерфейса и кнопки обращения.

Глава 2

ПРИКЛАДНЫЕ ПРОГРАММНЫЕ ПАКЕТЫ СХЕМОТЕХНИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Схемотехническое моделирование является наиболее эффективным способом исследования проектируемого объекта на стадии формирования его принципиальной электрической схемы. Схемотехническое моделирование – важный этап проектирования многих изделий электронной техники (ИЭТ): цифровых и аналоговых интегральных схем (ИС), электронных схем разной степени сложности, реализованных на дискретных элементах, блоков радиоаппаратуры и электронных изделий в целом. Схемотехническое моделирование учитывает реальные физические ограничения в электрических процессах – законы сохранения. Этим оно отличается от логического моделирования, при котором рассматриваются только информационные потоки в схеме. Упомянутые ограничения описываются первым и вторым законами Кирхгофа, которые вытекают из законов сохранения заряда и энергии и называются обычно законами электрического равновесия. Необходимость выполнения этих законов в каждой расчетной точке требует решения соответствующих уравнений электрического равновесия.

Все современные программные продукты *Electronics Workbench 5*, *Multisim 2001*, *Ultiboard 2001*, *Ultiroute* и *Commsim 2001*. разработанные для метода схемотехнического моделирования, предполагают ввод в редакторе принципиальных схем, после чего генерируется список соединений, необходимый для работы программы моделирования.

Для учебных задач остановимся на рассмотрении принципа схемотехнического моделирования с использованием программы *Electronics Workbench, Version 5.12 (EWB 5.12)*.

2.1. Интерфейс программы

Использование интегрированной программной системы схемотехнического моделирования аналоговых и цифровых радиоэлектронных устройств *Electronics Workbench* позволяют решать следующие задачи:

- создание модели принципиальной электрической схемы устройства и ее редактирование;
- расчет режимов работы модели;
- расчет частотных характеристик и переходные процессы модели;
- провести оценку и анализ модели;

- наращивать библиотеку компонентов;
- представлять данные в форме, удобной для дальнейшей работы;
- разрабатывать печатные платы и подготовку научно-технических документов и др.

Система схемотехнического моделирования *Electronics Workbench (EWB)* имитирует реальное рабочее место исследователя – лабораторию, оборудованную измерительными приборами, работающими в реальном масштабе времени. Для понимания принципов ее работы необходимо:

- знание основных принципов работы операционной системы *Windows*;
- понимание принципов работы основных измерительных приборов (осциллографа, мультиметра и т.д.);
- знание отдельных элементов электрических и электронных устройств.

Работа с системой моделирования *EWB* включает в себя три основных этапа:

- создание схемы (для сложных систем схемы замещения);
- подключение измерительных приборов;
- активизация схемы – расчет процессов протекающих в исследуемом устройстве (объекте).

Процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле *EWB* компонентов из библиотеки программы. Окно (интерфейс) программы *Electronics Workbench* представлено на рис. 2.1.

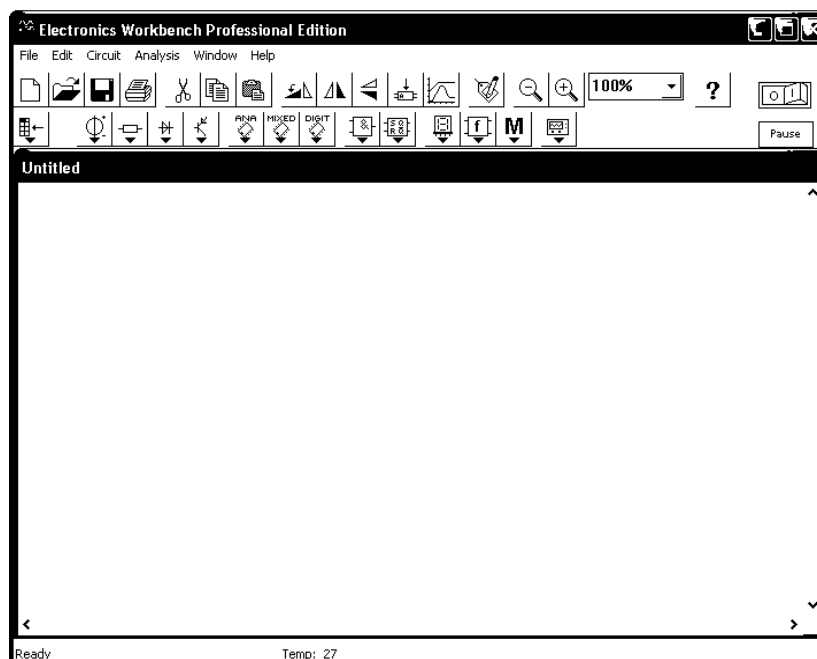


Рис. 2.1. Окно программы Electronics Workbench

Программа использует стандартный интерфейс Windows, что значительно облегчает ее использование.

В верхней части окна программы расположена строка меню. Она содержит шесть заголовков (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Меню программы Electronics Workbench

Под меню в виде строки пиктограмм расположена стандартная панель инструментов (рис. 2.3). Щелчок мышью на той или иной пиктограмме дублирует основные команды меню.



Рис. 2.3. Стандартная панель инструментов

Кроме стандартных *Windows*-кнопок, на панели инструментов расположены следующие:

- поворот;
- горизонтальное зеркальное отображение;
- вертикальное зеркальное отображение;
- создать модель;
- вывести график;
- свойства компонента;
- две кнопки изменения масштаба изображения.

Далее расположены раскрывающиеся панели линейки инструментов с компактным представлением библиотек (рис. 2.4):

- Sources – источники питания.
- Basic – группа пассивных компонентов.
- Diodes – полупроводниковые диоды, стабилитроны и т.п.
- Transistors – полупроводниковые транзисторы.
- Analog ICs – аналоговые микросхемы.
- Mixed ICs – микросхемы смешанного типа (АЦП, ЦАП).
- Digital ICs – цифровые микросхемы.

- Logic Gates – логические цифровые микросхемы.
- Digital – цифровые микросхемы (отличающиеся от Digital ICs).
- Indicators – индикаторные устройства.
- Controls – аналоговые вычислительные устройства (дифференциаторы, интеграторы и т.д.).
- Miscellaneous – компоненты смешанного типа.
- Instruments – контрольно-измерительные приборы.

Favorites содержит, созданные пользователем элементы-подсхемы, и в начале работы панель пуста.

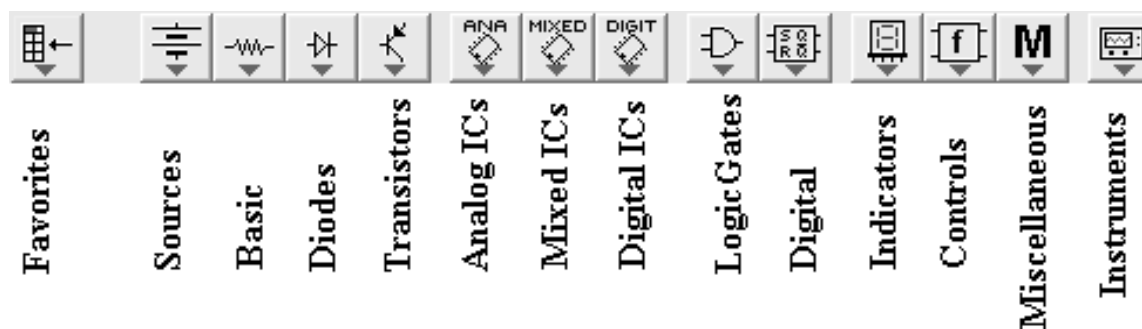


Рис. 2.4. Панели выбора элементов схемы и измерительных инструментов

В рабочем поле программы располагается моделируемая схема с подключенными к ней «иконками» контрольно-измерительных приборов и краткое описание схемы (*description*). При необходимости каждый из приборов может быть развернут для установки режимов его работы и наблюдения результатов.

2.2. Основные этапы создания схем

Electronics Workbench позволяет строить схемы различной степени сложности при помощи следующих операций:

- выбор элементов и приборов из библиотек;
- перемещение элементов и схем в любое место рабочего поля;
- поворот элементов и групп элементов на углы, кратные 90°;
- копирование, вставка или удаление элементов, групп элементов, фрагментов схем и целых схем;
- изменение цвета проводников;
- выделение цветом контуров схем для более удобного восприятия;
- одновременное подключение нескольких измерительных приборов и наблюдение их показаний на экране монитора;
- присваивание элементу условного обозначения;

- изменение параметров элементов в широком диапазоне.

Все операции производятся при помощи мыши и клавиатуры. Управление только с клавиатуры невозможно.

После построения схемы и подключения приборов анализ ее работы начинается после нажатия выключателя в правом верхнем углу окна программы.

Прежде чем создавать чертеж принципиальной схемы средствами программы EWB, необходимо на листе бумаги подготовить ее эскиз с примерным расположением компонентов и с учетом возможности оформления отдельных фрагментов в виде подсхем. Целесообразно также ознакомиться с библиотекой готовых схем программы для выбора аналога (прототипа) или использования имеющихся решений в качестве подсхем.

Исследуемая схема собирается на рабочем поле с использованием мыши и клавиатуры. При построении и редактировании схем выполняются операции выбора элемента из соответствующей панели, перетаскивание его на рабочее поле, соединение с другими элементами.

В общем случае процесс создания схемы начинается с размещения на рабочем поле EWB компонентов из библиотек программы в соответствии с подготовленным эскизом. Четырнадцать разделов библиотеки программы EWB поочередно могут быть вызваны с помощью меню Window или с помощью иконок (рис. 2.5).

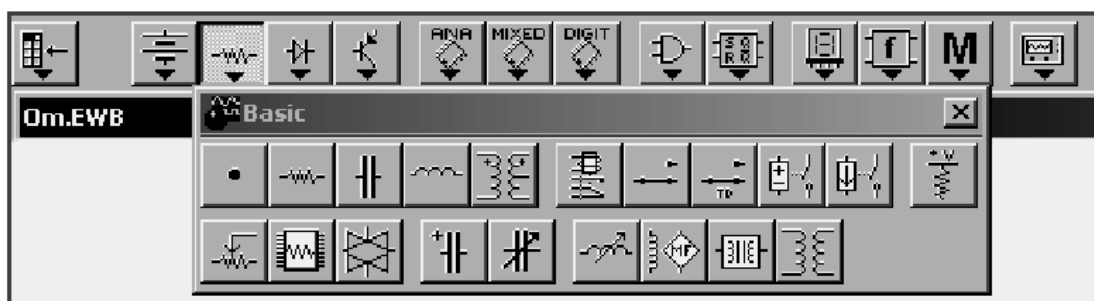


Рис. 2.5. Выбор пассивных компонентов электрической схемы

Для того чтобы выбрать необходимый компонент, подводят указатель мыши к изображению компонента в библиотеке, нажимают левую кнопку мыши (не отпуская кнопку), перемещают компонент в окно редактирования, и после этого отпускают кнопку.

Разместив на рабочем поле необходимые компоненты для создания исследуемой схемы, приступают ко второму этапу.

Второй этап – это этап ввода и изменения параметров выбранных компонентов. Для этого подводят указатель мыши к компоненту в окно

редактирования, и щелкаем два раза левой кнопкой мыши. Выпадает меню, состоящее из нескольких опций. Рассмотрим две из них:

Label – необходима для написания обозначения компонента;

Value – необходима для простановки значений компонента.

В контрольно-измерительных приборах при необходимости, например, в вольтметрах и амперметрах, при внесении параметров в опции *Label*, указываем для какого тока постоянного или переменного; в *Mode* выбираем DC – для постоянного тока, AC – для переменного.

На третьем этапе создания схемы осуществляют соединение компонентов электрической схемы. При этом необходимо учитывать, что к выводу компонента можно подключить только один проводник. Для выполнения подключения указатель мыши подводят к выводу компонента и после появления жирной точки (указатель соединения) нажимают левую кнопку мыши, и появляющийся при этом проводник протягивают к выводу другого компонента до появления на нем такой же жирной точки, после чего кнопку мыши отпускают, соединение готово. Если соединение нужно разорвать, указатель мыши подводят к одному из выводов компонента или к точке соединения и при появлении указателя соединения нажимают левую кнопку, проводник отводят на свободное место рабочего поля, после чего кнопку отпускают. Если необходимо вывод компонента подключить к имеющемуся на схеме проводнику, то из вывода компонента проводник указателем мыши подводят к указанному проводнику и после появления точки соединения кнопку мыши отпускают. Отметим, что прокладка соединительных проводов производится автоматически, причем препятствия – компоненты и проводники огибаются по ортогональным направлениям (по горизонтали или вертикали).

Завершающим этапом является подключение электрической схемы к питанию. Для этого в правом верхнем углу диалогового окна расположена пиктограмма



0 – отключено питание; 1 – включено питание.

После включения питания на контрольно-измерительных приборах регистрируются характеристики и значения собранной модели электрической схемы.

2.3. Выбор и подключение контрольно-измерительных приборов

В программе EWB используется большой набор приборов для проведения измерений: амперметр, вольтметр, осциллограф, мультиметр, Боде Плоттер (*Bode Plotter*) (графопостроитель частотных характеристик схем), функциональный генератор, генератор слов, логический анализатор и логический преобразователь.

Простейшими приборами в *Electronics Workbench* являются вольтметр и амперметр, которые расположены в поле индикаторов (*Indicators*). Они не требуют настройки, автоматически изменяя диапазон измерений. В одной схеме можно применять несколько таких приборов одновременно, наблюдая токи в различных ветвях и напряжения на различных элементах.

Амперметр – используется для измерения переменного и постоянного тока рис. 2.6. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающего амперметр, соответствует отрицательной клемме. Двойным щелчком мыши на изображении амперметра открывается диалоговое окно для изменения параметров амперметра: вида измеряемого тока, величины внутреннего сопротивления.

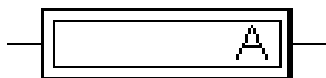


Рис. 2.6. Изображение амперметра

Величина внутреннего сопротивления вводится с клавиатуры в строке *Resistance*, вид измеряемого тока (опция *Mode*) выбирается из списка. При измерении переменного синусоидального тока (АС) амперметр будет показывать его действующее значение I

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}},$$

где I_m – амплитудное значение тока.

Внутреннее сопротивление 1 мОм, установленное по умолчанию, в большинстве случаев оказывает пренебрежимо малое влияние на работу схемы. Его значение можно изменить, однако использование амперметра с очень маленьким внутренним сопротивлением в схемах с высоким выходным импедансом может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы. В качестве амперметра можно использовать мультиметр.

Вольтметр используется для измерения переменного и постоянного напряжения (рис. 2.7).

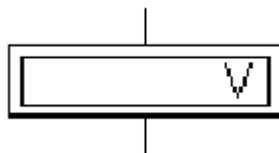


Рис. 2.7. Изображение вольтметра

Выделенная толстой линией сторона прямоугольника, изображающего вольтметр, соответствует отрицательной клемме. Двойным щелчком мыши на изображении вольтметра открывается диалоговое окно для изменения параметров вольтметра: вида измеряемого напряжения; величины внутреннего сопротивления. Величина внутреннего сопротивления вводится с клавиатуры в строке *Resistance*, вид измеряемого напряжения (опция *Mode*) выбирается из списка. При измерении переменного синусоидального напряжения (АС) вольтметр будет показывать действующее значение напряжения U , определяемое по формуле

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}},$$

где U_m – амплитудное значение напряжения.

Внутреннее сопротивление вольтметра 1 МОм, установленное по умолчанию, в большинстве случаев оказывает пренебрежимо малое влияние на работу схемы. Его значение можно изменить, однако использование вольтметра с очень высоким внутренним сопротивлением в схемах с низким выходным импедансом может привести к математической ошибке во время моделирования работы схемы. В качестве вольтметра можно использовать мультиметр.

Кроме описанных амперметра и вольтметра в *Electronics Workbench* имеется семь приборов, с многочисленными режимами работы, каждый из которых можно использовать в схеме только один раз. Эти приборы расположены на панели приборов. Слева на панели расположены приборы для формирования и наблюдения аналоговых величин: мультиметр, функциональный генератор, осциллограф, Боде-плоттер (рис. 2.8).

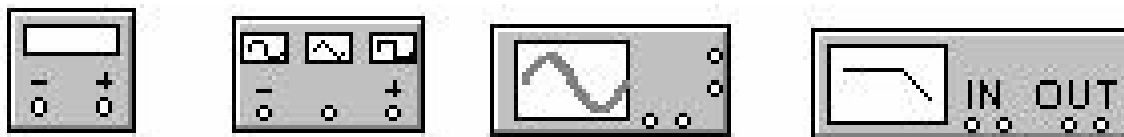


Рис. 2.8. Аналоговые измерительные приборы

Мультиметр используется для измерения: напряжения (постоянного и переменного), тока (постоянного и переменного), сопротивления, уровня напряжения в децибелах.

Для настройки мультиметра нужно двойным щелчком мыши на его уменьшенном изображении открыть его увеличенное изображение (рис. 2.9).

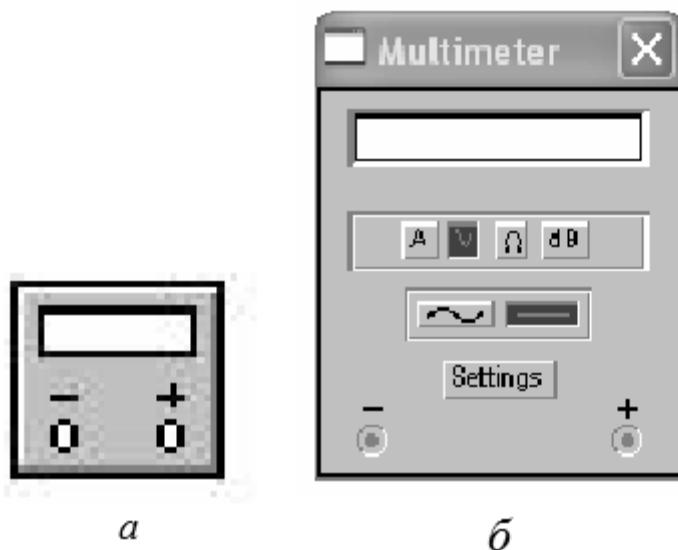


Рис. 2.9. Изображения мультиметра:
а – уменьшенное изображения для схем;
б – увеличенное изображение для настройки мультиметра

На увеличенном изображении нажатием левой кнопки мыши выбирается: измеряемая величина по единицам измерения – A , V , Ω или dB ; вид измеряемого сигнала – переменный или постоянный; режим установки параметров мультиметра. Установка вида измеряемой величины производится нажатием соответствующей кнопки на увеличенном изображении мультиметра. Нажатие кнопки с символом «~» устанавливает мультиметр для измерения действующего значения переменного тока и напряжения, постоянная составляющая сигнала при измерении не учитывается. Для измерения постоянного напряжения и тока нужно на увеличенном изображении мультиметра нажать кнопку с символом «-». В качестве амперметра и вольтметра мультиметр используется так же, как и стандартные приборы.

Мультиметр – единственный в Electronics Workbench стандартный прибор, предназначенный для измерения сопротивления. Для использования мультиметра в качестве омметра его следует подсоединить параллельно участку цепи, сопротивление которого нужно измерить, на увеличенном изображении мультиметра нажать кнопку Ω и кнопку с символом «-» переключения в режим измерения постоянного тока.

Включить схему. На табло мультиметра при этом появится измеренное значение сопротивления.

Чтобы избежать ошибочных показаний, схема должна иметь соединение с землей и не иметь контакта с источниками питания, которые должны быть исключены из схемы, причем идеальный источник тока должен быть заменен разрывом цепи, а идеальный источник напряжения – короткозамкнутым участком.

Осциллограф, имитируемый программой *Workbench*, представляет собой аналог двухлучевого запоминающего осциллографа и имеет две модификации:

1) простую модификацию с уменьшенным для создания схемы изображением (рис. 2.10, *а*) и увеличенным изображением для настройки осциллографа (рис. 2.10, *б*);

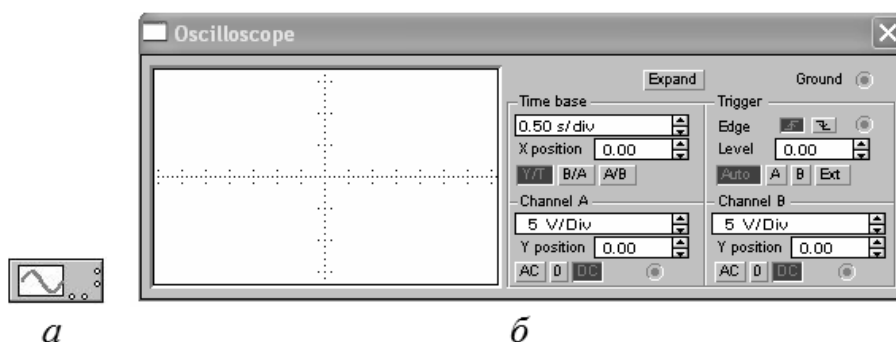


Рис. 2.10. Простая модификация осциллографа:

а – изображение осциллографа в схеме; *б* – панель осциллографа для настройки

2) расширенная модификация по своим возможностям приближается к лучшим цифровым запоминающим осциллографам (рис. 2.11).

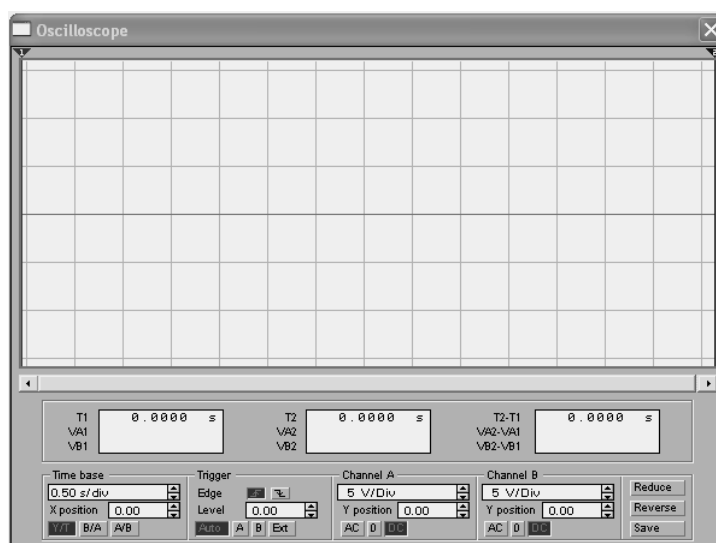


Рис. 2.11. Расширенная модификация осциллографа

Из-за того, что расширенная модель занимает много места на рабочем поле, рекомендуется начинать исследования простой моделью, а для подробного исследования процессов – использовать расширенную модель.



Осциллограф можно подключить к уже включенной схеме или во время работы схемы переставить выводы к другим точкам – изображение на экране осциллографа изменится автоматически. Двойным щелчком мыши по уменьшенному изображению открывается изображение передней панели простой модели осциллографа с кнопками управления, информационными полями и экраном.

Для проведения измерений осциллограф нужно настроить, для чего следует задать:

- расположение осей, по которым откладывается сигнал;
- нужный масштаб развертки по осям;
- смещение начала координат по осям;
- режим работы по входу: закрытый или открытый;
- режим синхронизации: внутренний или внешний.

Настройка осциллографа производится при помощи полей управления, расположенных на панели управления. Панель управления общая для обеих модификаций осциллографа и разделена на четыре поля управления:

- горизонтальной разверткой (*Time base*);
- синхронизацией (*Trigger*);
- каналом *A*;
- каналом *B*.

Поле управления горизонтальной разверткой (масштабом времени) служит для задания масштаба горизонтальной оси осциллографа при наблюдении напряжения на входах каналов *A* и *B* в зависимости от времени. Временной масштаб задается в: с/дел, мс/дел, мкс/дел, нс/дел (*s/div*, *ms/div*, *μs/div*, *ns/div* соответственно). Величина одного деления может быть установлена от 0,1 нс до 1 с. Масштаб может дискретно уменьшаться на один шаг при щелчке мышью на кнопке  справа от поля и увеличиваться при щелчке на кнопке .

Нажатие клавиши **Expand** на панели простой модели открывает окно расширенной модели осциллографа.

Панель расширенной модели осциллографа в отличие от простой модели расположена под экраном и дополнена тремя информационными табло, на которые выводятся результаты измерений. Кроме того, непосредственно под экраном находится линейка прокрутки, позво-

ляющая наблюдать любой временной отрезок процесса от момента включения до момента выключения схемы. В сущности, расширенная модель осциллографа это совершенно другой прибор, позволяющий намного удобнее и более точно проводить численный анализ процессов.

Чтобы вернуться к прежнему изображению осциллографа, следует нажать клавишу **Reduce**, расположенную в правом нижнем углу.

Бode-плоттер (графопостроитель) используется для получения амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик схемы (рис. 2.12).

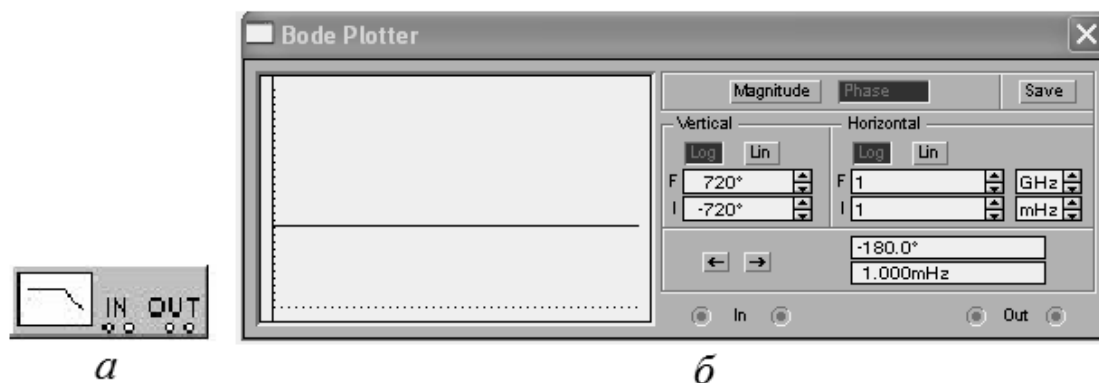


Рис. 2.12. Изображения Бode-плоттера:
a – уменьшенное изображение для отражения в схеме;
б – увеличенное для настройки прибора

Бode-плоттер измеряет отношение амплитуд сигналов в двух точках схемы и фазовый сдвиг между ними. Отношение амплитуд сигналов может измеряться в децибелах. Для измерения Бode-плоттер генерирует собственный спектр частот, диапазон которого может задаваться при настройке прибора. Частота любого переменного источника в исследуемой схеме игнорируется, однако схема должна включать какой-либо источник переменного тока.

Бode-плоттер имеет четыре зажима: два входных (*IN*) и два выходных (*OUT*). Для измерения отношения амплитуд или фазового сдвига нужно подключить положительные выводы входов *IN* и *OUT* (левые выводы соответствующих входов) к исследуемым точкам, а два других вывода заземлить. При двойном щелчке мышью по уменьшенному изображению Бode-плоттера (рис. 2.12, *a*) открывается его увеличенное изображение (рис. 2.12, *б*).

Верхняя панель плоттера задает вид получаемой характеристики: АЧХ или ФЧХ. Для получения АЧХ следует нажать кнопку *Magnitude*, для получения ФЧХ – кнопку *Phase*. Левая панель управления (*Vertical*) задает:

- начальное (I – initial) и конечное (F – final) значения параметров, откладываемых по вертикальной оси;
- вид шкалы вертикальной оси – логарифмическая (LOG) или линейная (LIN).

Правая панель управления (*Horizontal*) настраивается аналогично. При получении АЧХ по вертикальной оси откладывается отношение напряжений:

- в линейном масштабе от 0 до 10^9 ;
- в логарифмическом масштабе от -200 dB до 200 dB.

При получении ФЧХ по вертикальной оси откладываются градусы: от -720 до $+720$. По горизонтальной оси всегда откладывается частота в герцах или в производных единицах.

В начале горизонтальной шкалы расположен курсор. Его можно перемещать нажатием на кнопки со стрелками, расположенными справа от экрана, либо «тащить» с помощью мыши. Координаты точки пересечения курсора с графиком характеристики выводятся на информационных полях внизу справа. С помощью Бode-плоттера нетрудно построить топографическую диаграмму на комплексной плоскости для любой схемы.

Функциональный генератор является идеальным источником напряжения, вырабатывающим сигналы синусоидальной, прямоугольной или треугольной формы рис. 2.13.

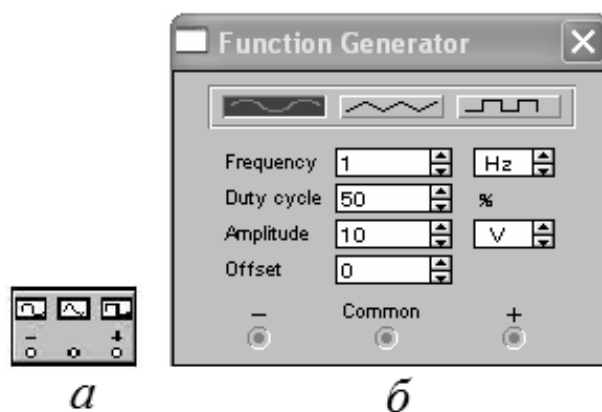


Рис. 2.13. Изображение функционального генератора:
a – уменьшенное изображение для формирования схемы;
б – увеличенное для настройки генератора

Средний вывод генератора при подключении к схеме обеспечивает общую точку для отсчета амплитуды переменного напряжения. Для отсчета напряжения относительно нуля общий вывод заземляют. Крайние правый и левый выводы служат для подачи переменного напряжения на

схему. Напряжение на правом выводе изменяется в положительном направлении, а напряжение на левом выводе – в отрицательном, относительно общего вывода.

При двойном щелчке мышью по уменьшенному изображению функционального генератора открывается его увеличенное изображение, с помощью которого осуществляют:

- установка формы сигнала.
- установка частоты сигнала.
- установка амплитуды выходного напряжения.
- установка постоянной составляющей выходного напряжения.

1. *Установка формы сигнала.* Для выбора требуемой формы выходного сигнала необходимо нажать на кнопку с соответствующим изображением. Форму треугольного и прямоугольного сигналов можно изменить, уменьшая или увеличивая значение в поле *Duty Cycle* (скважность). Этот параметр определяется для сигналов треугольной и прямоугольной формы. Для треугольной формы напряжения он задает длительность (в процентах от периода сигнала) между интервалом нарастания напряжения и интервалом спада.

Установив, например, значение 20, можно получить длительность интервала нарастания 20 % от периода, а длительность интервала спада – 80 %. Для прямоугольной формы напряжения этот параметр задает соотношение между длительностями положительной и отрицательной части периода.

2. *Установка частоты сигнала.* Частота генератора регулируется от 1 Hz до 999 MHz. Значение частоты устанавливается в строке *Frequency* с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, в правом – единица измерения (Hz, kHz, MHz – Гц, кГц, МГц соответственно).

3. *Установка амплитуды выходного напряжения.* Амплитуду выходного напряжения можно регулировать от 0 мВ до 999 кВ. Значение амплитуды устанавливается в строке *Amplitude* с помощью клавиатуры и кнопок со стрелками. В левом поле устанавливается численное значение, в правом – единица измерения (mV, mV, V, kV – мкВ, мВ, В, кВ соответственно).

4. *Установка постоянной составляющей выходного напряжения.* Постоянная составляющая переменного сигнала устанавливается в строке *Offset* при помощи клавиатуры или кнопок со стрелками. Она может иметь как положительное, так и отрицательное значение. Это позволяет получить, например, последовательность однополярных импульсов.

2.4. Решение типовых электротехнических задач

Программу *Electronics Workbench* наиболее целесообразно при решении электротехнических задач использовать для так называемых обратных задач и проверки полученных результатов расчета с помощью других прикладных программных пакетов, например *MathCAD*.

Рассмотрим пример использования программы *Electronics Workbench* при выполнении расчетно-графических работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

Цепь постоянного тока исходная схема изображена на рис. 2.14.

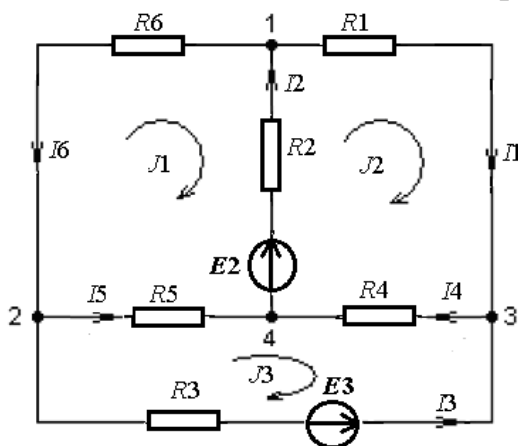


Рис. 2.14. Исходная схема для расчетно-графической работы

Для проверки результатов расчетов в программе *Electronics Workbench* разрабатывается виртуальная модель исходной схемы. Так как число неизвестных токов, исследуемой схеме равно числу ветвей, необходимо для измерения токов в ветвях, взять шесть амперметров. Для определения узловых потенциалов можно воспользоваться одним вольтметром, один зажим которого постоянно присоединён к точке, потенциал которой принят за нуль, например к точке 4, на модели схемы, представленной на рис. 2.16, а второй зажим вольтметра можно подключать поочередно, для определения потенциалов в узлах 1, 2, 3.

В качестве источников постоянного тока в библиотеке Sources выбирают источник постоянного напряжения.

Доступом к параметрам источника питания (двойное нажатие левой кнопки мышки на изображении) открывают диалоговое окно для установки требуемых параметров (*Value*) и обозначение источника (*Label*).

Аналогично выбирают из библиотеки *Basic* все сопротивления, обозначают их и настраивают требуемые параметры.

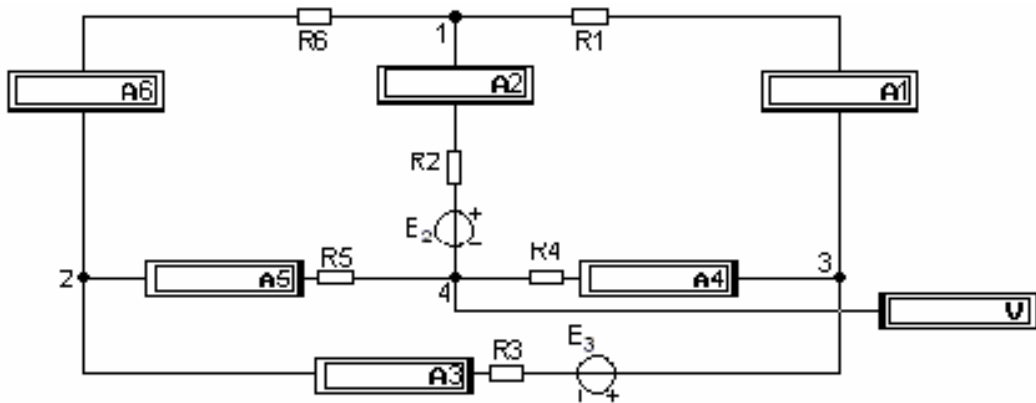


Рис. 2.15. Исследуемая схема, представленная на рабочем поле программы EWB

Из библиотеки *Indicators* на рабочем поле размещают амперметры и вольтметр. Устанавливают для них вид измеряемого напряжения и тока (опция *Mode*), для постоянного тока DC.

После того, как модель разработана и настроены все ее компоненты, нажатием кнопки выключателя в правом верхнем углу запускают ее, регистрируют показания приборов и делают выводы по работе в целом.

Для определения ЭДС эквивалентного генератора и его внутреннего сопротивления поступают следующим образом:

- удаляют из схемы резистор $R1$ (рис. 2.16);
- присоединяют к зажимам 1-3 мультиметр;
- измеряют напряжение $U13$;
- удаляют источники ЭДС $E2$ и $E3$ (закорачивая их);
- мультиметром измеряют сопротивление $R13$.

Замеренное напряжение мультиметром $U13$ принимают за ЭДС эквивалентного генератора, сопротивление $R13$ – это сопротивление эквивалентного генератора

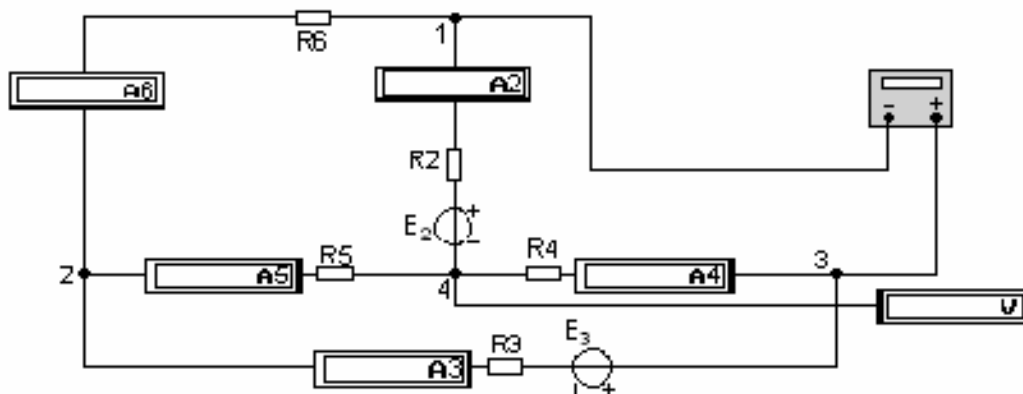


Рис. 2.16. Схема модели для определения параметров эквивалентного генератора

Для построения потенциальной диаграммы выбирают обход контура (рис. 2.15) $4-a-1-3-b-2-4$, приняв при этом потенциал точки 4, к которой присоединен постоянно один зажим вольтметра, равным нулю. Вторым зажимом вольтметра, в соответствии с обходом контура, определяют потенциалы остальных узлов. Данные заносят в таблицу и строят потенциальную диаграмму, выбрав графический редактор.

2.5. Проверка основных теоретических положений электротехники

Схемотехнические модели, разработанные в программе *Electronics Workbench*, представляют собой виртуальные лабораторные установки. Поэтому с их помощью можно изучить, к примеру, в теории цепей переменного тока такие явления как резонанс напряжений.

Схема лабораторной установки в этом случае имеет следующий вид (рис. 2.17).

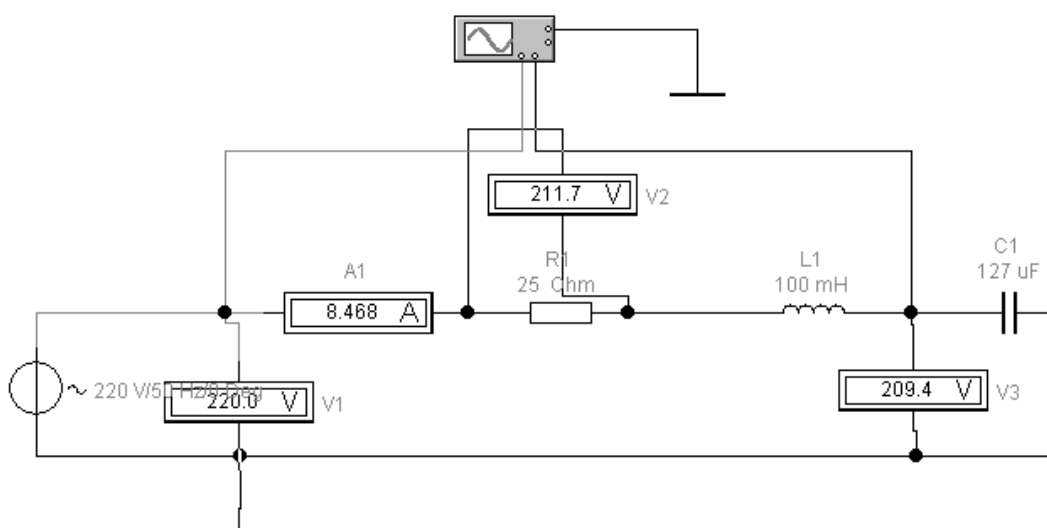


Рис. 2.17. Схема лабораторной установки

На рис. 2.18 представлен экран двулучевого осциллографа, с помощью которого можно увидеть синусоидально изменяющиеся величины во времени, входного напряжения U и на выходе схемы (емкости) U_C .

Основной причиной возникновения резонансных явлений, как известно из физики раздел электромагнетизма, является совпадение собственной частоты колебаний колебательных контуров с вынужденной частотой колебаний источника питания.

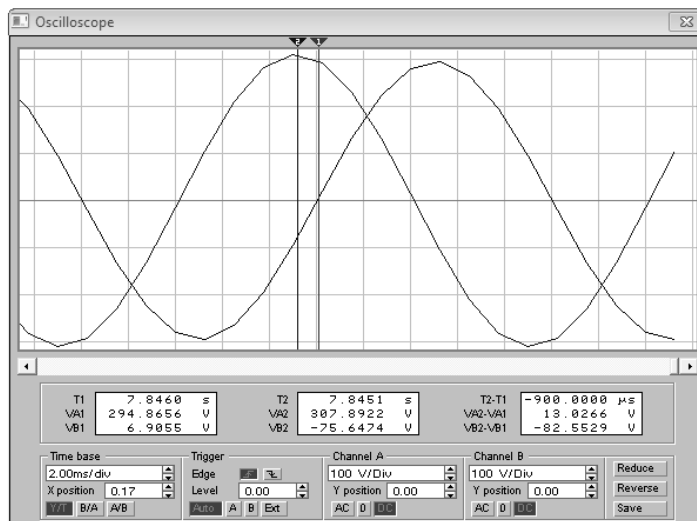


Рис. 2.18. Экран осциллографа

При исследовании резонансных явлений на экспериментальных физических установках явление резонанса достигают, изменяя величину емкости. Пределы изменений значения емкости устанавливаются так, чтобы исследовать предрезонансную область, резонанс и после резонансную область колебательного контура.

При наличии виртуальной лабораторной установки признаки резонанса можно определить, изменяя любой реактивный параметр схемы или изменяя частоту источника питания. Алгоритм проведения исследований можно реализовать следующим образом.

Определить резонансную частоту $\omega_p = \omega_c = 2\pi f$, после этого задать значение L или C , установить на схеме параметры резистивного, индуктивного и емкостного элементов. Параметры реактивных элементов определяются исходя из выражения для резонансной частоты

$$\omega_p = \omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2.1)$$

Значение сопротивления резистора R для установления характерных признаков резонанса необходимо выбирать из следующих соотношений

$$Q = \frac{X_L = X_C}{R} \geq 5, \quad (2.2)$$

где Q – добротность контура, а $X_L = \omega_p L$, $X_C = \frac{1}{\omega_p C}$.

После того как определены и установлены параметры виртуальной лабораторной установки, изменяя частоту источника питания в диапа-

зоне от 10–100 Гц с шагом в 10 Гц, исследуют явление резонанса напряжений в схеме. Основными признаками резонанса напряжений для данной схемы будут: максимальное значение тока (показания амперметра), значения напряжений $U_L = U_C \geq 5U_{ист}$, $U_R = U_{ист}$ (показания вольтметров).

Задание на исследование резонансных явлений с использованием программы *Electronics Workbench* содержит обычно следующие пункты:

1. Собрать виртуальную лабораторную установку.
2. Определить параметры и настроить схему.
3. Снять показания приборов изменяя в рекомендованном диапазоне изменения частоты источника питания и занести их в таблицу.
4. Определить зависимости параметров реактивных элементов и входного сопротивления от частоты.
5. Построить зависимости;

$$I = f(\omega), U_L = f(\omega), U_C = f(\omega), X_L = f(\omega), X_C = f(\omega), Z = f(\omega),$$

где $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – модуль общего сопротивления схемы.

6. Выводы.

На рис. 2.19 приведены зависимости параметров реактивных сопротивлений и входного сопротивления схемы от частоты. Анализ этих зависимостей показывает, что в дорезонансной области, когда $\omega < \omega_p$, общее сопротивление схемы имеет резистивно-емкостной характер нагрузки. При резонансе, когда $\omega = \omega_p$, общее сопротивление схемы имеет минимальное значение, равное активному сопротивлению резистивного элемента. В области после резонанса, когда $\omega > \omega_p$, общее сопротивление схемы имеет резистивно-индуктивный характер нагрузки.

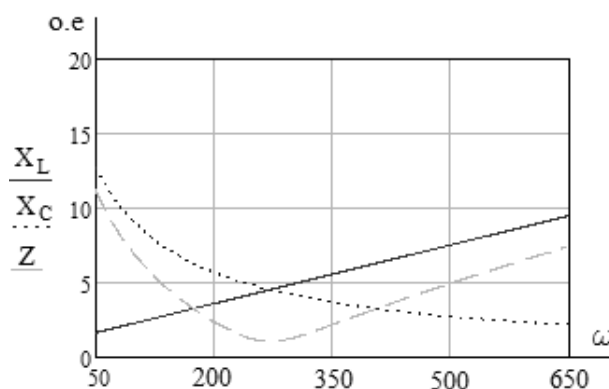


Рис. 2.19. Зависимости параметров схемы от частоты питающего напряжения

2.6. Моделирование типовых электрических и электронных устройств

К числу типовых электрических и электронных устройств можно отнести электрические фильтры, выпрямители и усилительные каскады, выполненные на полупроводниковых элементах. Имеющиеся в программе EWB инструменты позволяют спроектировать электрические и электронные устройства, исследовать режимы работы устройств во временной и определить их характеристики в частотной области.

В качестве примера рассмотрим снятие вольтамперных характеристик биполярного транзистора, исследование усилителя переменного тока на транзисторах и пассивного *RLC*-фильтра.

Характеристики биполярного транзистора

Для снятия вольтамперных характеристик биполярного транзистора в EWB формируется схема, представленная на рис. 2.20.

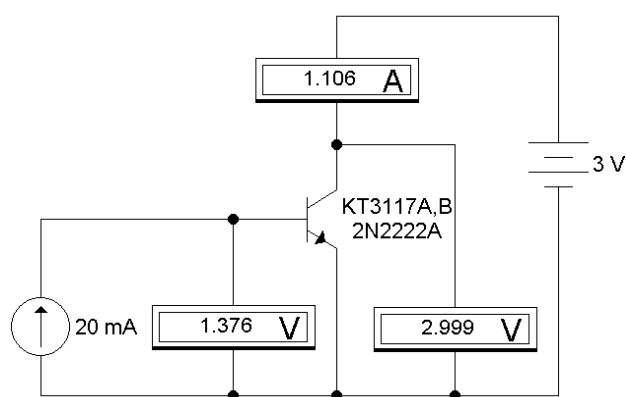


Рис. 2.20. Схема для снятия характеристик биполярного транзистора

Схема и результаты исследований приведены из учебного пособия кафедры электропривод и электрооборудование Томского политехнического университета [3].

В табл. 2.1 приведена выходная вольтамперная характеристика $U_{кэ}(I_к)$ транзистора 2N2222A (отечественный аналог КТ3117А,В), включенного по схеме с общим эмиттером. Ток базы принимает три значения (5, 10 и 20 мА) – цепь базы запитывается от источника тока. Напряжение $U_{кэ}$ изменяют в пределах от 0,1 до 3 вольт.

На рис. 2.21 приведены данные ВАХ из табл. 2.1, построенной в программе *Excel*.

Таблица 2.1

Экспериментальные данные

		$U_{кэ}, В$					
		0.1	0.3	0.5	1	2	3
$I_б = 5 \text{ мА}$	$I_{кэ}, А$	0.08007	0.3169	0.4619	0.4667	0.4708	0.475
$I_б = 10 \text{ мА}$	$I_{кэ}, А$	0.09365	0.3533	0.6104	0.7215	0.7279	0.7343
$I_б = 20 \text{ мА}$	$I_{кэ}, А$	0.1021	0.3769	0.6639	1.087	1.096	1.106

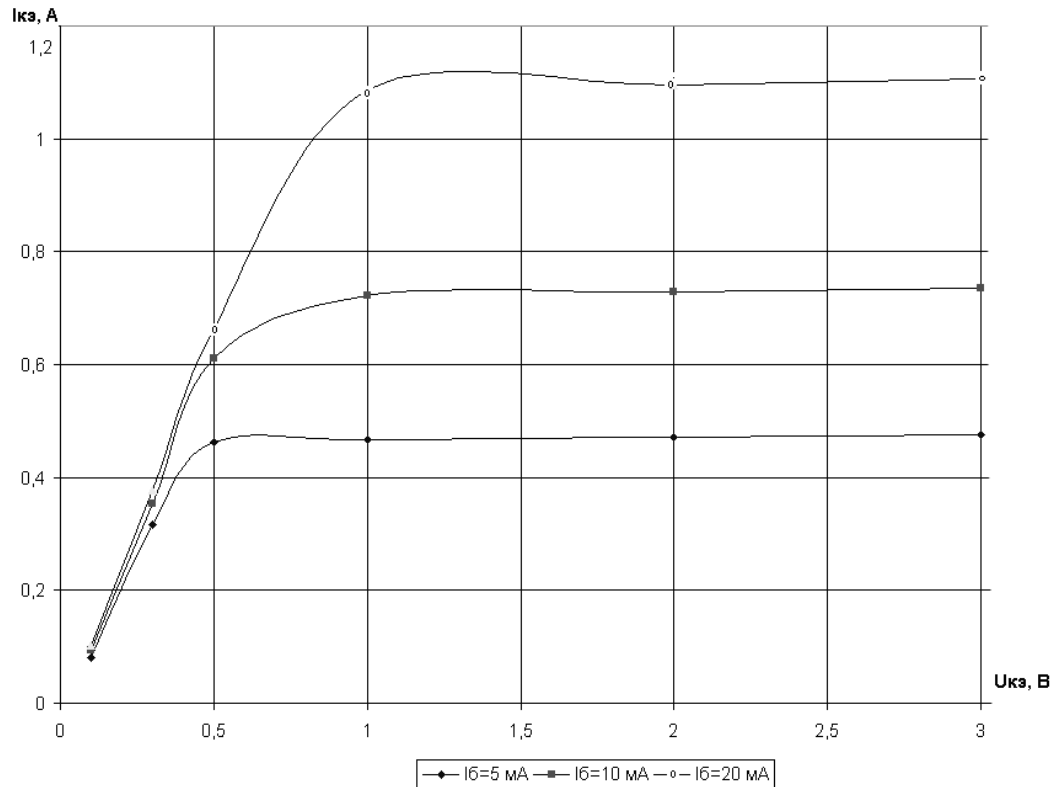


Рис. 2.21. Вольтамперные характеристики транзистора усилителя переменного тока

Для исследования усилителя переменного тока в программе EWB формируют схему рис. 2.22 [3]. В данном усилителе транзистор 2N2222A включен по схеме с общим эмиттером.

Напряжение питания усилителя в 12 В осуществляется от источника постоянного тока. На вход усилителя с функционального генератора *Function Generator* подаётся гармонический сигнал с амплитудой 20 мВ и частотой 10 кГц. Частота входного сигнала в дальнейшем меняется для снятия частотной характеристики *Bode Plotterom*.

На входе и выходе усилителя для отсеки постоянной составляющей включены конденсаторы ёмкостью 5 мкФ. Рабочая точка ВАХ транзистора обеспечивается резистивным делителем напряжения, со-

противления которого предварительно рассчитываются либо подбираются так, чтобы нелинейные искажения выходного сигнала были минимальными.

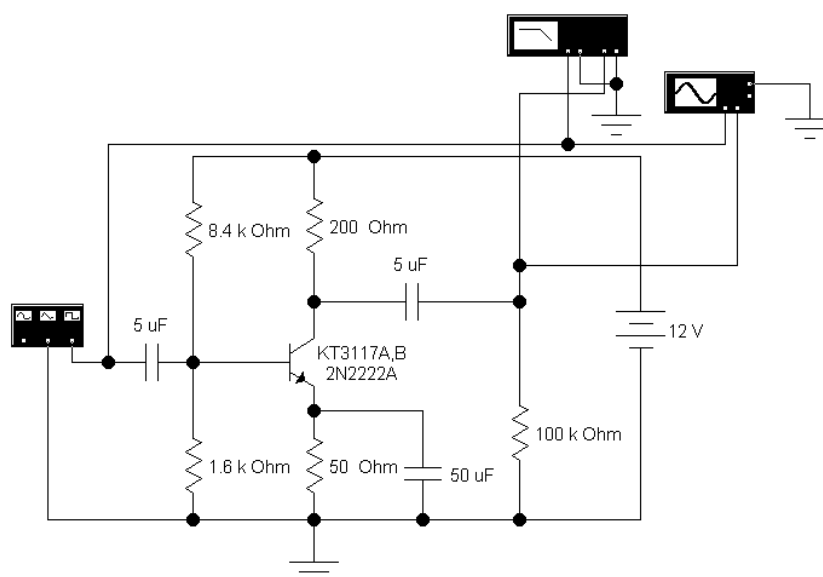


Рис. 2.22. Схема усилителя переменного тока на транзисторе

Для стабилизации рабочей точки в цепь эмиттера включено сопротивление 50 Ом. По переменному току эмиттер транзистора через шунтирующий конденсатор 50 мкФ подключается к общей точке. Сопротивление нагрузки составляет 100 кОм – усилитель работает в режиме холостого хода.

Построитель частотных характеристик *Bode Plotter* позволяет получить амплитудную частотную (АЧХ) и фазовую частотную (ФЧХ) характеристики усилителя.

Если на вход усилителя переменного тока подавать периодический сигнал заданной амплитуды и частоты, то на его выходе будет также периодический сигнал той же частоты, но в общем случае другой амплитуды со сдвигом по фазе. Взаимосвязь между параметрами периодических сигналов на входе и выходе усилителя определяют **частотные характеристики**. В общем, при анализе электронных устройств и систем в частотной области пользуются обобщенной частотной характеристикой, $W(j\omega)$. Из теории электрических цепей переменного тока известно, что обобщенная частотная характеристика имеет составляющие, обладающие самостоятельным значением [2]. К числу таких составляющих относят амплитудную частотную (АЧХ) и фазовую частотную (ФЧХ) характеристики. Компонентные уравнения этих характеристик имеют следующий вид:

$$A(\omega) = \sqrt{R^2(\omega) + I^2(\omega)} \quad (2.3)$$

– амплитудная частотная характеристика (АЧХ);

$$\varphi(\omega) = \arg(W(j\omega)) \quad (2.4)$$

– фазовая частотная характеристика (ФЧХ),

где $R(\omega)$, $I(\omega)$ – вещественная частотная характеристика (ВЧХ), мнимая частотная характеристика (МЧХ).

При использовании построителя частотных характеристик **Bode Plotter** в программе EWB амплитудную и фазовую частотные характеристики усилителя строят в логарифмическом масштабе. Диалоговые окна **Bode Plotter** для анализа этих характеристик приведены на рис. 2.23 и рис. 2.24.

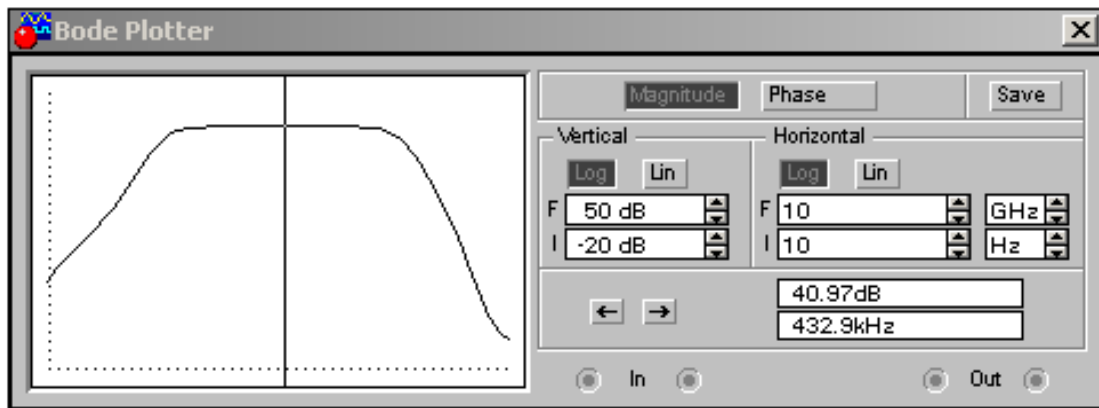


Рис. 2.23. Диалоговое окно для анализа АЧХ

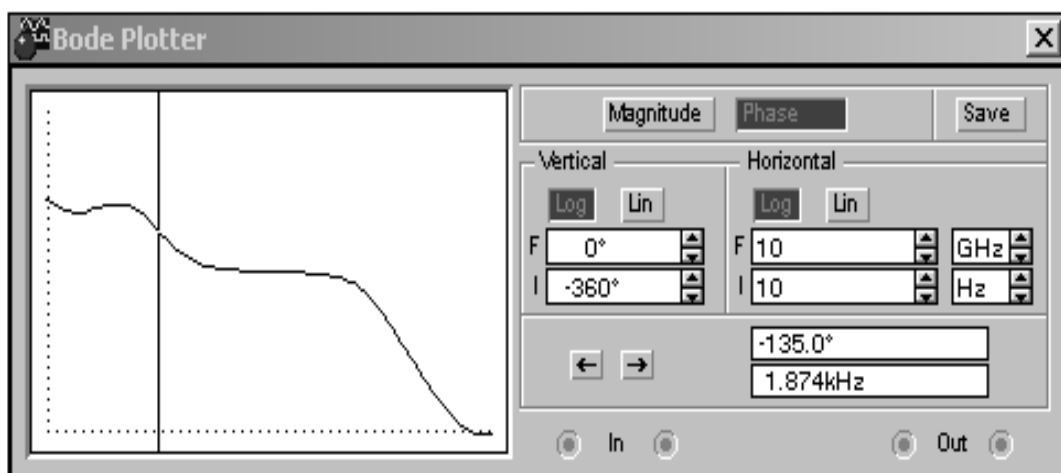


Рис. 2.24. Диалоговое окно для анализа ФЧХ

Для построения АЧХ (рис. 2.23) включают кнопку *Magnitude* и по вертикали (*Vertical*) и по горизонтали (*Horizontal*) устанавливают логарифмическую шкалу (*Log*). Затем устанавливают пределы по вертикали $I = -20$ дБ (*dB*) – нижний предел и $F = -50$ дБ – верхний предел. Пределы по горизонтали следующие: $I = 10$ Гц (*Hz*) – нижний предел и $F = 10$ ГГц (*GHz*) – верхний предел.

Для построения ФЧХ в диалоговом окне устройства *Bode Plotter* (рис. 2.24) включают кнопку *Phase*.

Анализируя полученные АЧХ и ФЧХ можно определить зависимость коэффициента усиления усилителя от частоты входного сигнала, зависимость сдвига фазы между входным и выходным напряжением от частоты и рабочий диапазон частот (полосу пропускания частот).

Для этого установим движок в точке с координатами 40.97 дБ и 432.9 кГц и примем эту точку за среднюю в полосе пропускания. На границах полосы пропускания амплитуда выходного сигнала снизится на 3 дБ, или в 1.414 раза, и составит $40.97 - 3 = 37.97$ дБ.

Перемещая движок от средней точки влево до тех пор, пока амплитуда выходного сигнала не примет значение 37.97 дБ, найдём нижнюю частоту полосы пропускания. Величине 37.97 дБ наиболее соответствуют две точки:

- 1) 37.79 дБ и 1.874 кГц;
- 2) 38.18 дБ и 2.074 кГц.

Величины абсолютных отклонений составят, соответственно, $\Delta A_1 = 37.97 - 37.79 = 0.18$ дБ и $\Delta A_2 = 37.97 - 38.18 = 0.21$ дБ. Принимаем первую точку с координатами $A_{\text{нижн}} = 37.79$ дБ и $f_{\text{нижн}} = 1.874$ кГц в качестве нижней границы полосы пропускания усилителя переменного тока, так как $\Delta A_1 < \Delta A_2$.

Перемещая движок от средней точки вправо до тех пор, пока амплитуда выходного сигнала не примет значение 37.97 дБ, найдём верхнюю частоту полосы пропускания. Величине 37.97 дБ наиболее соответствуют две точки:

- 1) 37.56 дБ и 81.11 МГц;
- 2) 38.06 дБ и 72.67 МГц.

Величины абсолютных отклонений составят, соответственно, $\Delta A_3 = 37.97 - 37.56 = 0.41$ дБ и $\Delta A_4 = 37.97 - 38.06 = 0.09$ дБ. Принимаем точку с координатами $A_{\text{верхн}} = 38.06$ дБ и $f_{\text{верхн}} = 72.67$ МГц в качестве верхней границы полосы пропускания усилителя переменного тока, так как $\Delta A_4 < \Delta A_3$.

Таким образом, полоса пропускания частот находится в пределах частот от $f_{\text{нижн}} = 1.874$ кГц до $f_{\text{верхн}} = 72.67$ МГц.

Среднегеометрическая частота полосы пропускания усилителя переменного тока определяется как

$$f_{\text{ср}} = \sqrt{f_{\text{нижн}} \cdot f_{\text{верхн}}}.$$

Подставив численные значения, определённые ранее, рассчитаем

$$f_{\text{ср}} = \sqrt{1.874 \cdot 10^3 \cdot 72.67 \cdot 10^6} = 369 \cdot 10^3 \text{ Гц} = 369 \text{ кГц}.$$

Анализируя ФЧХ можно отметить следующее: на нижней частоте $f_{\text{нижн}} = 1.874$ кГц выходной гармонический сигнал отстаёт по фазе от входного на величину $\varphi_{\text{нижн}} = -135^\circ$. На верхней границе полосы пропускания при частоте $f_{\text{верхн}} = 72.67$ МГц отставание по фазе составляет: $\varphi_{\text{верхн}} = -230.7^\circ$.

Коэффициент усиления УПТ L_U , выраженный в децибелах (дБ или dB), можно представить через k_U следующим образом:

$$L_U = 20 \lg k_U, \quad (2.5)$$

где коэффициент усиления является безразмерной величиной, так как определяется в виде отношения

$$k_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}. \quad (2.6)$$

Для этого в диалоговом окне построителя частотных характеристик **Bode Plotter** (рис. 2.25) включают кнопку *Magnitude*. В подразделе *Vertical* устанавливают линейную шкалу *Lin*. Пределы по вертикали $I = 0$ – нижний предел, $F = 500$ – верхний предел. В подразделе *Horizontal* включают логарифмическую шкалу *Log*. Пределы такие же, как предлагаются по умолчанию (рис. 2.24). Данная характеристика является зависимостью $k_U(f)$ или АЧХ УПТ в безразмерных единицах.

На нижней границе полосы пропускания УПТ при $f = 1.874$ кГц коэффициент усиления $k_U = 77.5$ (рис. 2.25), а на верхней при $f = 72.67$ МГц коэффициент усиления $k_U = 80.1$. При среднегеометрической частоте полосы пропускания $f = 369$ кГц коэффициент усиления $k_U = 112$.

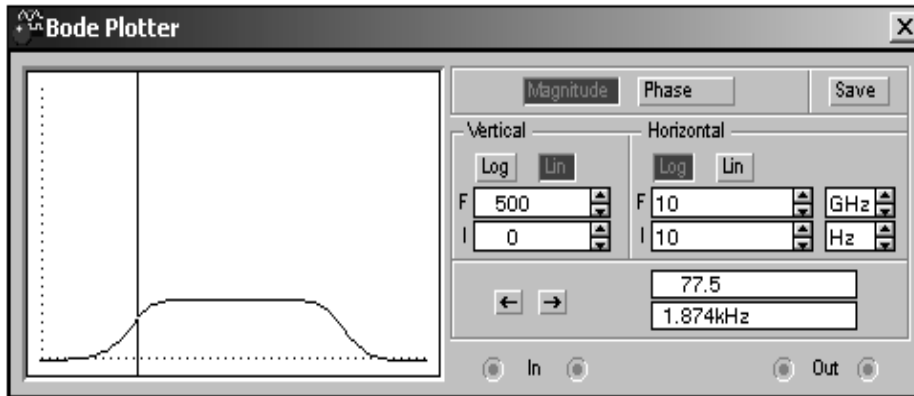


Рис. 2.25. Диалоговое окно для определения коэффициента усиления

Таким образом, с помощью построителя частотных характеристик *Bode Plotter* определены параметры k_U , L_U , f_{cp} , $f_{нижн}$, $f_{верхн}$. Эти параметры УПТ можно получить и при помощи осциллографа (*Oscilloscope*).

В диалоговом окне функционального генератора *Function Generator* выставим параметры входного гармонического сигнала (напряжения): амплитуду $U_{вх.а} = 20$ мВ и частоту $f = 1.9$ кГц $\approx f_{нижн}$ (рис. 2.26).

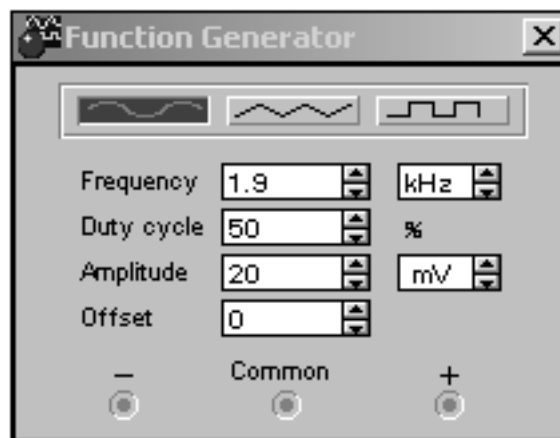


Рис. 2.26. Диалоговое окно функционального генератора

Диалоговое окно осциллографа представлено на рис. 2.27.

Как видно из рис. 2.27, осциллограф имеет два движка.

Первый движок установим в такой момент времени ($T_1 = 22.2435$ мс), когда входной сигнал принимает наибольшее (амплитудное) значение

$$V_{A1} = U_{вх.а} = 19.8274 \text{ мВ} \approx 20 \text{ мВ}.$$

Значения V_{A1} и T_1 индицируются в первом окне.

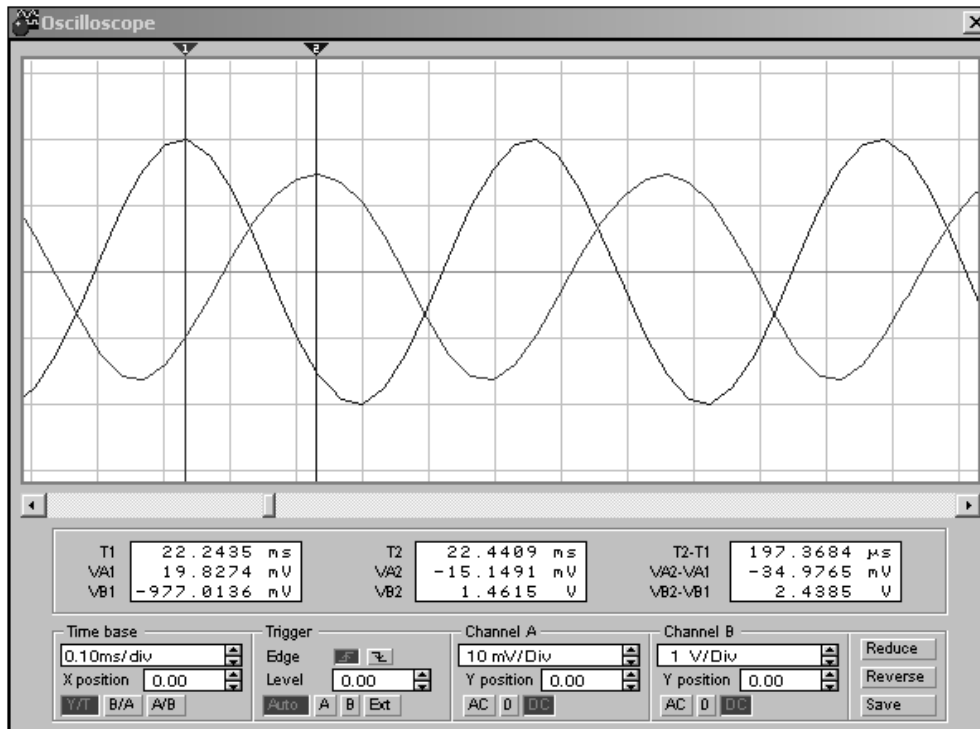


Рис. 2.27. Диалоговое окно осциллографа

Второй движок установим в момент времени $T_2 = 22.4409$ мс, когда выходной сигнал принимает наибольшее (амплитудное) значение

$$V_{B2} = U_{\text{вых.а}} = 1.4615 \text{ В.}$$

Значения V_{B2} и T_2 индицируются во втором окне.

Коэффициент усиления УПТ по напряжению k_U на частоте $f_H = 1.9$ кГц по показаниям осциллографа рассчитаем следующим образом:

$$k_U = \frac{U_{\text{вых.а}}}{U_{\text{вх.а}}} = \frac{V_{B2}}{V_{A1}} = \frac{1.4615}{19.8274 \cdot 10^{-3}} = 73.711.$$

Вычислим коэффициент усиления УПТ в децибелах на частоте $f_H = 1.9$ кГц по показаниям осциллографа

$$L_U = 20 \lg 73.711 = 37.351.$$

Отставание по фазе выходного сигнала УПТ относительно входного на частоте $f_H = 1.9$ кГц по показаниям осциллографа рассчитаем следующим образом:

$$\varphi = -\frac{T_2 - T_1}{\frac{1}{f_H}} \cdot 360 = -\frac{(22.4409 - 22.2435) \cdot 10^{-3}}{\frac{1}{1.9 \cdot 10^3}} \cdot 360 = -135.022^\circ.$$

Необходимо отметить, что параметры k_U , L_U и φ , измеренные и вычисленные с помощью инструментов *Bode Plotter* и *Oscilloscope*, примерно совпадают, а расхождения обусловлены дискретностью числовых величин, задаваемых в генераторе *Functional Generator* и индицируемых в инструментах *Bode Plotter* и *Oscilloscope*.

По вышеописанной процедуре можно с помощью осциллографа (*Oscilloscope*) вычислить параметры k_U , L_U и φ на верхней граничной частоте полосы пропускания УПТ

$$f_{\text{верхн}} = 72.67 \text{ МГц}$$

и на среднегеометрической частоте полосы пропускания

$$f_{\text{ср}} = 369 \text{ кГц.}$$

Схемы выпрямления и сглаживание пульсаций с помощью емкостных фильтров

Диод является одним из наиболее простых полупроводниковых элементов современной микроэлектроники. Диод представляет собой два соединенных между собой полупроводниковых слоя. Один слой обладает электронной проводимостью и обозначается как *n*-полупроводник, а другой – дырочной проводимостью и обозначается как *p*-полупроводник. Вследствие такой структуры диод обладает существенной односторонней проводимостью, т.е. хорошо проводит электрический ток в одном направлении и практически не проводит его в другом направлении. Это свойство диода широко используется для выпрямления переменного тока, когда требуется преобразовать переменное напряжение, получаемое, например, из электросети, в постоянное напряжение, необходимое для работы большинства электронных схем.

Сглаживание пульсаций – первоочередная задача после выпрямления тока. Эту задачу выполняет фильтр, состоящий из конденсатора (конденсаторов), который включен в цепь между выпрямителем и нагрузкой. Ёмкость конденсатора фильтра зависит от тока нагрузки. Чем больше ток нагрузки, тем большую ёмкость должен иметь конденсатор сглаживающего фильтра. Принцип работы сглаживающего фильтра выпрямителей можно проанализировать с помощью однополупериодной схемы. Простейший однополупериодный выпрямитель состоит из одного диода, включенного в цепь, как показано на приведенной схеме виртуальной лабораторной установки (рис. 2.28), собранной в программе *Electronics Workbench*.

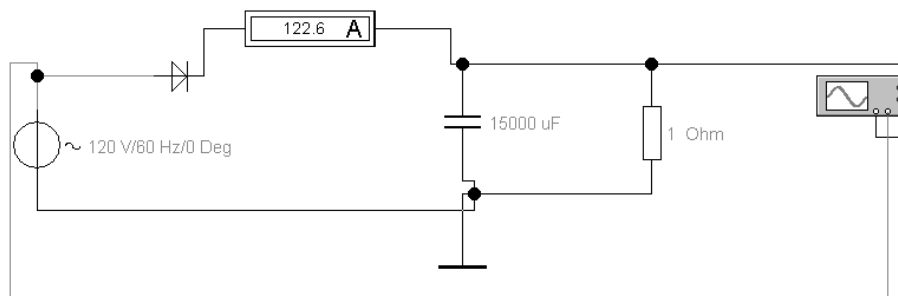


Рис. 2.28. Схема однополупериодного выпрямителя

На рис. 2.29 приведены осциллограммы напряжения на источнике *1* и напряжения *2* на выходном сопротивлении после фильтра.

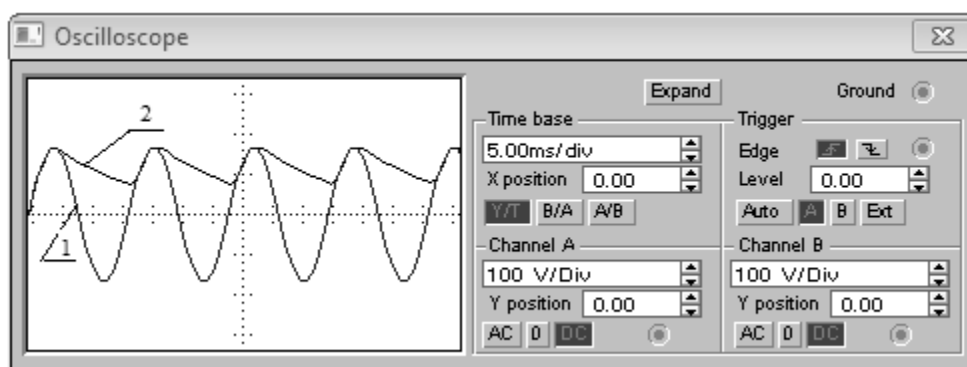


Рис. 2.29. Осциллограммы напряжений однополупериодного выпрямителя

Анализ осциллограмм напряжений показывает, что в промежутки времени между импульсами напряжения с выпрямителя напряжение на выходном сопротивлении нагрузки формируется за счет разряда конденсатора. В то время, когда есть импульс, конденсатор заряжается, когда импульса нет или он ниже напряжения источника питания конденсатор отдаёт своё напряжение в нагрузку. После сглаживания напряжение на выходе фильтра выпрямителя (без нагрузки) превышает среднее значение напряжения. Оно практически равно амплитуде выпрямленного напряжения. Точное значение – переменное напряжение вторичной обмотки трансформатора умноженное на 1,4.

Пульсации напряжения на выходе фильтра выпрямителя можно уменьшить, увеличив ёмкость конденсатора. При однополупериодной схеме выпрямления ёмкость конденсаторов надо как минимум удваивать.

Однако эффективность однополупериодного выпрямителя невысока, так как в формирование выходного напряжения используется только один полупериод переменного напряжения источника.

Более эффективный метод выпрямления переменного тока состоит в использовании схемы двухполупериодного выпрямителя, представленного в виде виртуальной установки рис. 2.30.

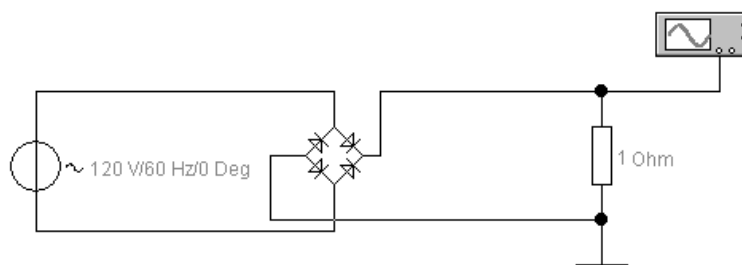


Рис. 2.30. Схема двух полупериодного выпрямителя

Для сравнения на рис. 2.31 приведены осциллограммы выходных напряжений двухполупериодного 2 и однополупериодного 1 выпрямителей без фильтров.

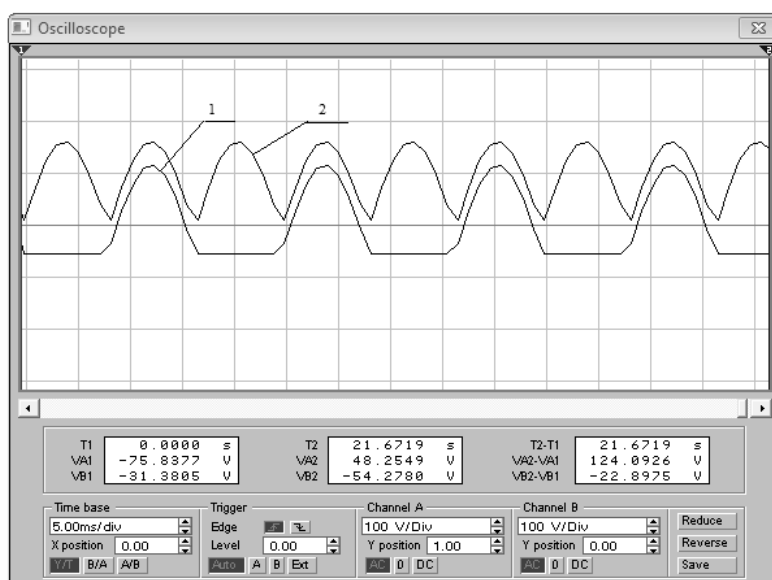


Рис. 2.31. Осциллограммы выходных напряжений двухполупериодного 2 и однополупериодного 1 выпрямителя

Задание: Сравните форму выходного напряжения, полученного в первой и во второй схемах. Разберитесь в принципе действия двухполупериодного выпрямителя, для чего покажите, как проходит ток через нагрузку во время положительного и отрицательного полупериодов.

Глава 3

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИКЛАДНОГО ПРОГРАММНОГО ПАКЕТА *MATHCAD*

MathCAD – это мощная и в то же время простая универсальная среда для решения задач в различных отраслях науки и техники, финансов и экономики, физики и астрономии, строительства и архитектуры, математики и статистики, организации производства и управления.

MathCAD является самой современной, универсальной массовой математической системой. Ее аббревиатура **Mathematical Computer Aided Design** (математическое автоматизированное проектирование) говорит о ее назначении – решение различных вычислительных задач.

Она позволяет выполнять как численные, так и аналитические (символьные) вычисления, имеет удобный математически-ориентированный интерфейс и прекрасные средства графики. Внедрение в систему символьной математики превратило ее в универсальный инструмент для решения математических задач.

Как интегрированная система *MathCAD* содержит следующие основные компоненты:

- *Редактор документов* – редактор с возможностью вставки математических выражений, шаблонов графиков и текстовых комментариев;
- *MathConnex* – системный интегратор, обеспечивающий интеграцию *MathCAD* с рядом иных программных продуктов;
- *Центр ресурсов* – система управления ресурсами *MathCAD*;
- *Электронные книги* – электронные книги с описанием типовых расчетов в различных областях науки и техники;
- *Справочная система* – система для получения справочных данных по тематическому и индексному каталогу, а также для поиска нужных данных по ключевому слову или фразе;
- «*Быстрые шпаргалки*» QuickShhtts – короткие примеры с минимальными комментариями, описывающими применение всех встроенных операторов и функций системы;
- *Браузер Интернета* – собственное средство выхода в Интернет.

3.1. Интерфейс программы *MathCAD*

В *MathCAD* интерфейс пользователя интуитивен и сходен с другими приложениями *Windows*. Главное окно системы *MathCAD* в развернутом состоянии с рабочим листом показано на рис. 3.1.

В первой строке (строке заголовка) главного окна системы MathCAD отображено название окна. Во второй строке главного окна системы расположены пункты главного меню. В третьей, четвертой и пятой строках размещены наиболее часто используемые панели инструментов, которые желательно всегда иметь на экране. В третьей строке – панель инструментов **Стандартная**, во второй – **Форматирование**, в четвертой – **Математика** и **Ресурсы**. В нижней строке главного окна располагается строка состояния системы.

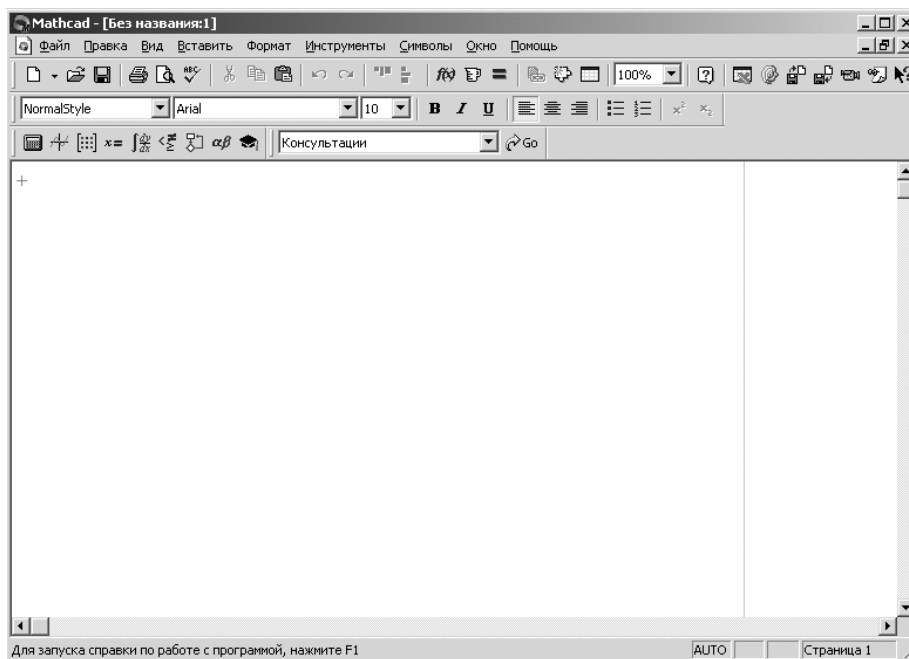


Рис. 3.1. Главное окно системы MathCAD

Если щелкнуть в панели инструментов **Стандартная** по первой кнопке – кнопке с изображением чистого листка бумаги, то появится рабочий лист с названием **Без названия:N (Untitled: N)**, где N – порядковый номер документа.

Чтобы сохранить рабочий лист (документ) под нужным именем:

- щелкните мышью в панели инструментов **Стандартная** по третьей кнопке – кнопке с изображением дискеты. Появится диалоговое окно **Сохранить как (Save as)**;
- в диалоговом окне **Сохранить как** в текстовом поле **Имя файла (File name)** введите имя файла;
- щелкните по кнопке **Сохранить**. Система сохранит файл под введенным именем и автоматически добавит расширение **.mcd**.

Основную часть экрана занимает рабочий лист. В правой и нижней части экрана расположены полосы прокрутки. Они предназначены для

горизонтального и вертикального перемещения по рабочему листу. Для плавного перемещения необходимо установить курсор мыши на полосу прокрутки (кнопка со стрелкой, указывающей направление движения) и нажать левую кнопку мыши. Можно также щелкнуть мышью на полосу прокрутки между кнопкой со стрелкой и бегунком. Тогда передвижение будет значительно быстрее – с каждым щелчком на величину экрана.

Щелкните левой кнопкой мыши по пункту **Вид (View)** для вызова выпадающего меню. Щелкните левой кнопкой мыши по пункту **Панели инструментов (ToolBars)** для вызова всплывающего меню. Целесообразно, чтобы во всплывающем меню перед пунктами – **Стандартная, Форматирование, Математика, Ресурсы (Standard, Formatting, Math, Resources)** – стояли галочки. Это означает, что соответствующие панели инструментов будут находиться в главном окне.

Панель *Math* (Математика) предназначена для вызова на экран девяти панелей, с помощью которых, собственно, и происходит вставка математических операций в документы рис. 3.2.

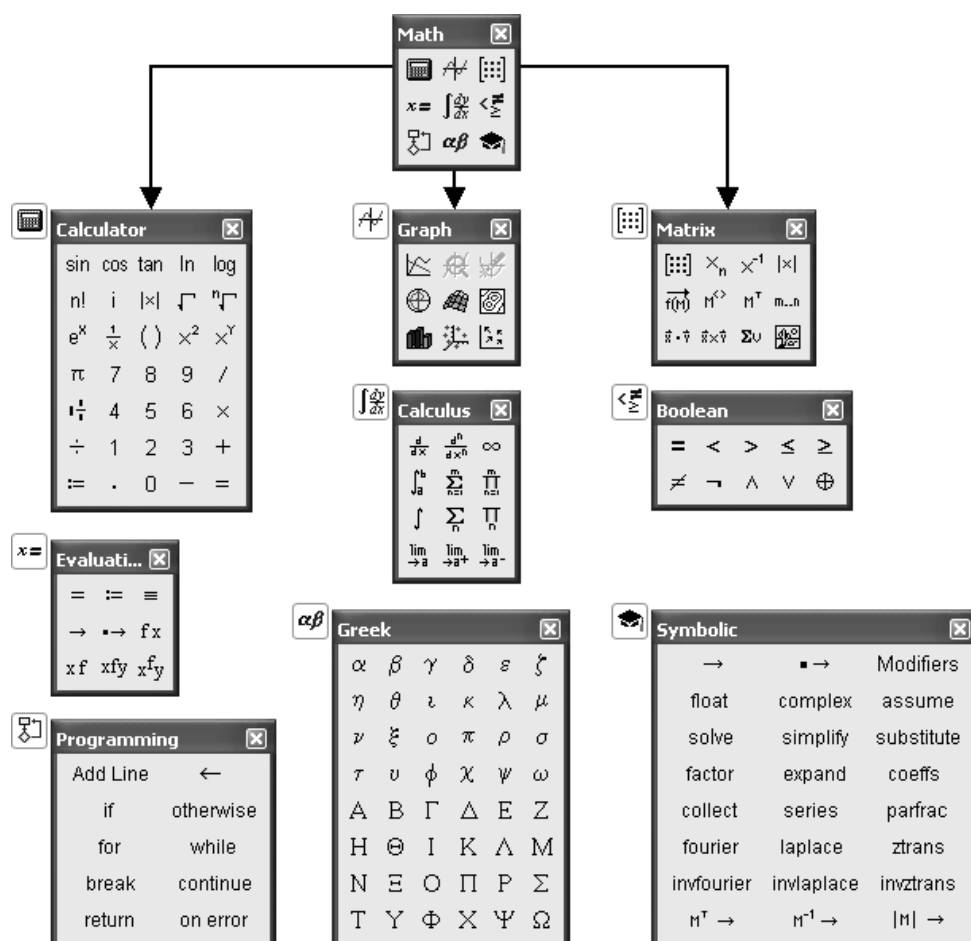


Рис. 3.2. Палитра математических знаков

С их помощью можно вводить в документы практически все известные математические символы и операторы. Палитры математических знаков можно располагать в удобном месте окна редактирования и очень удобно ими пользоваться, поскольку не нужно запоминать разнообразные сочетания клавиш, используемых для ввода специальных математических знаков.

MathCAD имеет систему оперативной памяти, одним из элементов которой являются всплывающие подсказки – небольшие текстовые поля, появляющиеся при наведении указателя мыши на многие (но не все) элементы интерфейса и блоки в окне редактирования.

3.2. Решение типовых электротехнических задач

Типовые электротехнические задачи – это задачи, решение которых связано с анализом и исследованием электромагнитных явлений в электротехнических устройствах. В электротехнике для описания процессов в таких устройствах пользуются методами *теории электромагнитного поля* и упрощенными методами, так называемыми *методами теории цепей*.

В теории электромагнитного поля оперируют с векторными величинами, такими как плотности токов, напряженности электрического и магнитного полей. Поэтому методы теории поля дают возможность описать процессы в каждой точке электромагнитного поля с помощью дифференциальных уравнений в частных производных (уравнения Максвелла) и рассмотреть разнообразные явления в любых электротехнических устройствах. Однако эти методы достаточно сложны, трудоемки и на практике позволяют решить ограниченное число задач.

Чаще всего для решения широкого круга электротехнических задач применяют методы теории цепей, основанные на замене реального устройства некоторой упрощенной моделью, например в виде схемы замещения [2].

При решении таких задач, пользуются системами топологических и компонентных уравнений, с помощью которых описывают процессы в модели электротехнического устройства. При этом можно выделить два основных направления, именно: исследования связанные с расчетом и анализом статических (установившихся) и динамических (переходных) режимов работы электротехнических устройств и систем.

В первом случае для расчета и анализа статических режимов работы электротехнических устройств с использованием первого и второго законов Кирхгофа записывают систему алгебраических топологических уравнений. В общем, такая система уравнений имеет вид:

3.2.1. Расчет и анализ стационарных режимов работы

Для расчета и анализа стационарных режимов с использованием пакета *MathCAD* воспользуемся схемами замещения для электрических цепей постоянного тока.

Пользовательская программа (модель для расчета стационарных режимов) в пакете *MathCAD* разрабатывается в соответствии с алгоритмом (рис. 3.3). На рис. 3.4 приведена трехконтурная схема электрической цепи постоянного тока.

Разработка пользовательской программы для любого прикладного программного пакета, как и для *MathCAD*, необходимо начинать с анализа исходных данных технического задания. Техническое задание, как правило, определяет цели и задачи, которые необходимо достичь и решить при исследовании объекта, процесса, явления или системы.

При этом учитывая основные законы, определяющие функционирование и принцип работы исследуемого объекта, получают дополнительные данные, необходимые для решения конкретной задачи на том или ином этапе исследования.

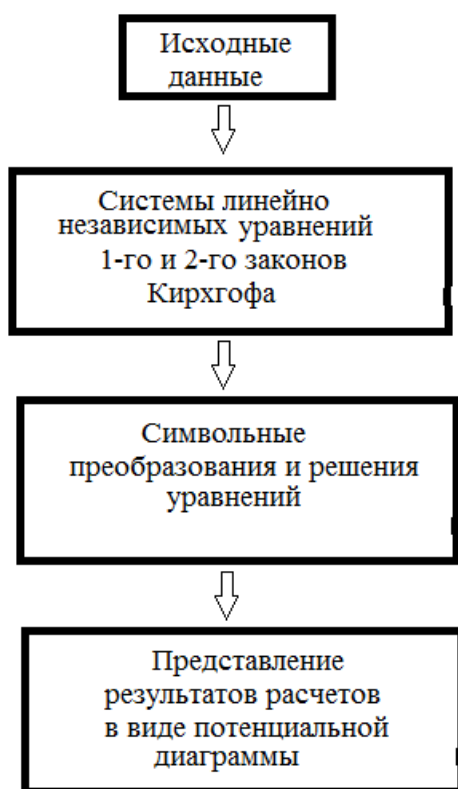


Рис. 3.3. Блок-схема алгоритма пользовательской программы

При решении данной задачи в качестве исходных данных принимают параметры схемы рис. 3.4., а именно: значения сопротивлений $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ и ЭДС E_1, E_2, E_3 . При этом в зависимости от поставленной задачи на этапе составления системы линейных независимых уравнений можно:

1. Составить на основании законов Кирхгофа систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях схемы.
2. Составить систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы методом контурных токов.
3. Составить систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы методом узловых потенциалов.
4. Результаты расчёта токов, проведенного двумя методами свести в таблицу и сравнить их.
5. Составить баланс мощностей в исходной схеме.
6. Определить ток I_1 (см. схему), используя теорему об эквивалентном генераторе.
7. Рассчитать и построить потенциальную диаграмму для любого замкнутого контура, включающего ЭДС.

Перед тем как составить систему уравнений, используя первый и второй законы Кирхгофа, надо произвольно выбрать:

- положительные направления токов в ветвях и обозначить их на схеме;
- положительные направления обхода контуров.

Для удобства направление обхода для всех контуров должно быть одинаковым, например, по часовой стрелке, а положительные направления токов, такие как показано на схеме.

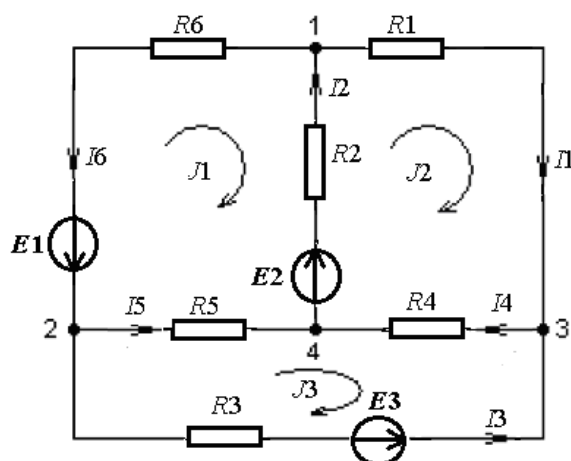


Рис. 3.4. Схема электрической цепи постоянного тока

Чтобы получить линейно независимые уравнения, по первому закону Кирхгофа составим уравнения, число которых равно числу узлов без единицы, в данном случае три уравнения. Остальные уравнения составляют по второму закону. Следует помнить что, составляя уравнения по второму закону, следует исключить те контуры, которые содержат источники тока.

Этап составления уравнений и определение направлений токов и напряжений желательно выполнить на листке бумаги. После чего воспользовавшись прикладным программным пакетом *MathCAD* разработать пользовательскую программу для расчета токов, напряжений и баланса мощностей, указанных в расчетно-графическом задании.

При составлении уравнений и записи их в пользовательскую программу необходимо использовать (жирный) знак равенства. В качестве примера приведен фрагмент программы (рис. 3.5) для записи системы уравнения контурных токов (схема рис. 3.4).

$$\begin{aligned} J_1 \cdot (R_6 + R_2 + R_5) - J_2 \cdot R_2 - J_3 \cdot R_5 &= -(E_1 + E_2) \\ -J_1 \cdot R_2 + J_2 \cdot (R_1 + R_2 + R_4) - J_3 \cdot R_4 &= E_2 \\ -J_1 \cdot R_5 - J_2 \cdot R_4 + J_3 \cdot (R_4 + R_5 + R_3) &= -E_3 \end{aligned}$$

Рис. 3.5. Фрагмент программы

В этом случае представленная в пользовательской программе запись уравнений несет информационный характер. На основании этой записи составляются матрица параметров схемы и вектор столбец свободных членов. Предварительно сформировав блок исходных данных (рис. 3.6).

$$\begin{aligned} R_1 := 3 \quad R_2 := 8 \quad R_3 := 5 \quad R_4 := 10 \quad R_5 := 9 \quad R_6 := 15 \\ E_1 := 10 \quad E_2 := 15 \quad E_3 := 20 \end{aligned}$$

Рис. 3.6. Блок исходных данных

Тогда матрицу параметров A можно записать в виде рис. 3.7.

$$A := \begin{bmatrix} (R_6 + R_2 + R_5) & -R_2 & -R_5 \\ -R_2 & (R_1 + R_2 + R_4) & -R_4 \\ -R_5 & -R_4 & (R_5 + R_4 + R_3) \end{bmatrix}$$

Рис. 3.7. Матрица параметров исследуемой схемы

А вектор столбец свободных членов имеет следующий вид рис. 3.8.

$$B := \begin{bmatrix} -(E1 + E2) \\ E2 \\ -E3 \end{bmatrix}$$

Рис. 3.8. Вектор столбец свободных членов

Далее в соответствии с алгоритмом составления программы (модели) выбирают метод решения записанной системы уравнений. Наиболее простой метод – это методом обратной матрицы.

$$J := A^{-1} \cdot B$$

Тогда значения контурных токов записывают в виде:

$$J1 := J_0 \quad J2 := J_1 \quad J3 := J_2$$

При расчете токов в ветвях схемы электрической цепи, решение системы линейных уравнений чаще всего осуществляют с помощью блока встроенных функций **Given – Find** (Дано – Найти).

В качестве примера рассмотрим решение системы линейных уравнений такого вида [5]:

$$\begin{cases} 1.2 \cdot x1 + 2.8 \cdot x2 + 0.5 \cdot x3 = 3 \\ 3.2 \cdot x1 - 1.6 \cdot x2 - 0.3 \cdot x3 = 2.2 \\ -0.2 \cdot x1 + 9.0 \cdot x2 + 0.5 \cdot x3 = 10.8 \end{cases} \quad (3.4)$$

Для этого начальные приближения искомых решений можно принять на начальном этапе поиска равными нулю:

$$x1 := 0 \quad x2 := 0 \quad x3 := 0$$

Далее вводят ключевое слово **Given** (Дано).

Затем правее и ниже вводят решаемую систему уравнений в виде:

$$\begin{aligned} 1.2 \cdot x1 + 2.8 \cdot x2 + 0.5 \cdot x3 &= 3 \\ 3.2 \cdot x1 - 1.6 \cdot x2 - 0.3 \cdot x3 &= 2.2 \\ -0.2 \cdot x1 + 9.0 \cdot x2 + 0.5 \cdot x3 &= 10.8 \end{aligned}$$

При этом следует обратить внимание на знак равенства.

Введя имя вектора–столбца результатов решения, например $R(x1,x2,x3)$, знак присваивания и функцию поиска решения – **Find** с искомым аргументом в скобках, Она определяет вектор ответов – решений. Это будет выглядеть так:

$$R(x1,x2,x3) := \text{Find}(x1,x2,x3)$$

Пример листинга данного фрагмента пользовательской программы представлен на рис. 3.9.

```
x1 := 0   x2 := 0   x3 := 0
Given
  1.2·x1 + 2.8·x2 + 0.5·x3 = 3
  3.2·x1 - 1.6·x2 - 0.3·x3 = 2.2
  -0.2·x1 + 9.0·x2 + 0.5·x3 = 10.8
R(x1,x2,x3) := Find(x1,x2,x3)
R(x1,x2,x3) =  $\begin{pmatrix} 0.99 \\ 1.482 \\ -4.674 \end{pmatrix}$ 
```

Рис. 3.9. Решение системы линейных уравнений с применением блока встроенных функций *Given – Find*

3.2.2. Расчет характеристик эквивалентного генератора

При анализе стационарных режимов работы в ряде случаев возникает необходимость найти ток в отдельно взятой ветви электрической цепи. В этом случае нет необходимости использовать громоздкие методы расчетов определения токов во всех ветвях. В таких случаях следует использовать метод эквивалентного генератора (МЭГ). МЭГ позволяет не только рассчитать характеристики, но позволяет определить сопротивление нагрузки двухполюсника, при котором выделяется максимальная мощность, что очень важно при последовательном включении каскадов, согласованных по мощности.

Иногда этот метод называют методом холостого хода и короткого замыкания. Суть метода заключается в том, что в схеме выделяется ветвь, в которой нужно найти ток, а вся оставшаяся часть схемы заменяется активным двухполюсник – эквивалентным генератором.

Схема замещения активного двухполюсника (рис. 3.10) состоит из источника напряжения, ЭДС – E_{Γ} и сопротивления R_{Γ} .

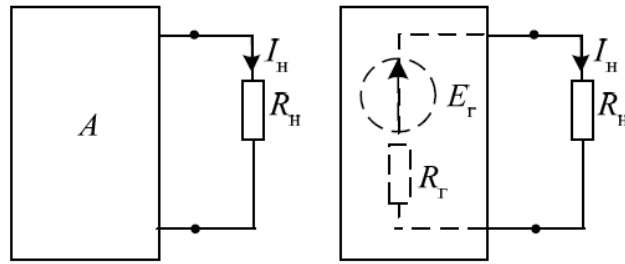


Рис. 3.10. Схема замещения активного двухполюсника

Чтобы определить ЭДС генератора E_G , следует найти напряжение холостого хода – U_{xx} относительно выходных зажимов эквивалентного генератора, это и будет искомая ЭДС. Для того чтобы найти сопротивление генератора R_G , следует найти сопротивление относительно выходных зажимов генератора.

При известных параметрах эквивалентного генератора тогда можно найти ток в нагрузке:

$$I_H = \frac{E_G}{R_G + R_H}. \quad (3.5)$$

Для более глубокого понимания рассмотрим пример (рис. 3.11).

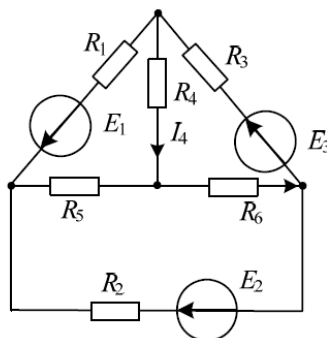


Рис. 3.11. Схема электрической цепи

В этой схеме необходимо определить ток I_4 в четвёртой ветви, используя метод эквивалентного генератора.

В соответствии с поставленной задачей, прежде всего, необходимо преобразовать схему в двухполюсник. Для этого выделяем ветвь с сопротивлением R_4 , а всю оставшуюся часть заменяем двухполюсником – эквивалентным генератором (рис. 3.12). Затем находим напряжение холостого хода и сопротивление эквивалентного генератора.

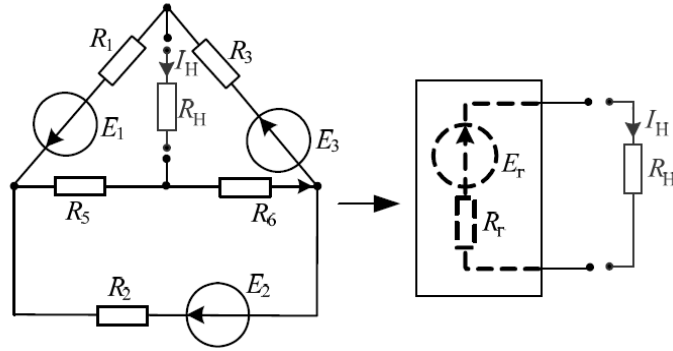


Рис. 3.12. Преобразование схемы в двухполюсник

Чтобы найти напряжение холостого хода, необходимо найти токи во всех ветвях схемы рис. 3.13. Задав направление обхода в контурах схемы рис. 3.13 по часовой стрелке, определяют контурные токи J_1 и J_2 решив систему уравнений:

$$\begin{aligned} J_1(R_1 + R_3 + R_5 + R_6) - J_2(R_5 + R_6) &= -(E_1 + E_3); \\ -J_1(R_5 + R_6) + J_2(R_2 + R_5 + R_6) &= E_2. \end{aligned} \quad (3.6)$$

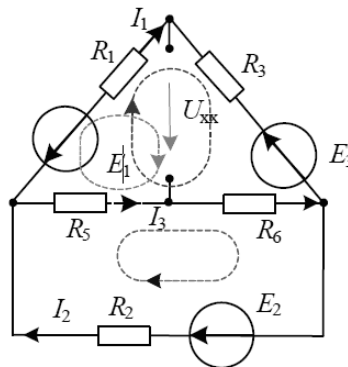


Рис. 3.13. Схема для определения напряжения U_{xx}

Анализ схемы показывает, что ток I_1 протекает по ветви $E_1 \rightarrow R_1 \rightarrow E_3 \rightarrow R_3$ и в соответствии с направлением обхода контура $I_1 = J_1$. Ток I_2 в ветви $E_2 \rightarrow R_2$ равен контурному току J_2 , а ток $I_3 = J_2 - J_1$.

Тогда напряжение холостого хода можно определить в виде:

$$U_{xx} = -E_1 - I_3 \cdot R_5 + I_1 \cdot R_3. \quad (3.7)$$

Для определения R_r преобразуем схему рис. 3.13, закоротив все ЭДС, к следующему виду (рис. 3.14):

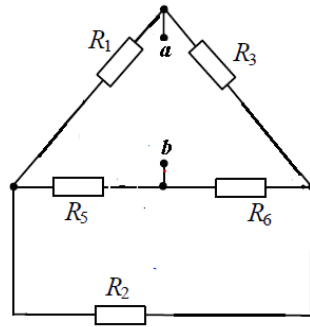


Рис. 3.14. Схема для определения сопротивления эквивалентного генератора

Сопротивление определенное относительно клемм a и b будет внутренним сопротивлением эквивалентного генератора.

Пример листинга пользовательской программы для определения E_{Γ} и R_{Γ} представлен в приложении 1.

Важной характеристикой эквивалентного генератора (ЭГ) является выходная характеристика, представляющая собой зависимость выходного напряжения от тока нагрузки:

$$U(I_H) = E_{\Gamma} - I_H \cdot R_{\Gamma}. \quad (3.8)$$

На рис. 3.15 приведена, рассчитанная по уравнению (3.8), характеристика ЭГ, при следующих данных. Ток нагрузки изменяется в пределах $I_H \in (0, I_{кз} = 10 \text{ А})$, а напряжение в пределах $U \in (0, U_{хх} = 100 \text{ В})$, $R_{\Gamma} = 10 \text{ Ом}$.

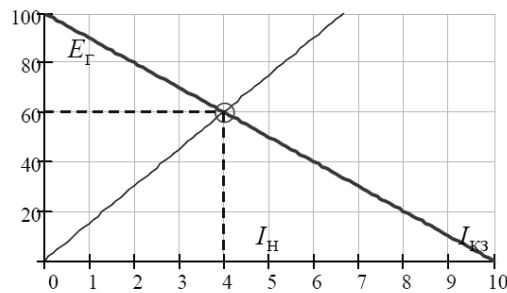


Рис. 3.15. Выходная и нагрузочная характеристики ЭГ

Выходная характеристика позволяет определить ток нагрузки I_H при любой величине нагрузочного сопротивления R_H . Для того, чтобы определить ток нагрузки I_H , достаточно умножить произвольное значение тока на величину сопротивления нагрузки $U_H = I \cdot R$ (рис. 3.15), затем отложить найденное значение на графике и соединить с началом координат (на графике это сделано для нагрузки $R_H = 15 \text{ Ом}$). Опустив

перпендикуляр на ось токов с точки пересечения полученной кривой и выходной характеристики, получаем значение интересующего нас тока. В данном случае $I_H = 4$ А, $U_H = 60$ В.

Наряду с выходной характеристикой можно выделить несколько других важных характеристик генератора – мощность нагрузки $P(R_H)$, в зависимости от величины сопротивления нагрузки, и мощность нагрузки $P(I_H)$ в зависимости от величины тока нагрузки.

Определим мощность в нагрузке как функцию сопротивления нагрузки $P(R_H)$

$$P(R_H) = I_H^2 \cdot R_H = \frac{E_\Gamma^2}{(R_\Gamma + R_H)^2} \cdot R_H. \quad (3.9)$$

Рассчитанный график данной функции по выражению (3.9) имеет следующий вид (рис. 3.16).

Определим, в каком случае выделяется максимальная мощность в нагрузке. Для этого нужно взять производную выражения $P(R_H)$ по R_H и приравнять ее нулю:

$$\frac{dP(R_H)}{dR_H} = \frac{d}{dR_H} \frac{E_\Gamma^2 \cdot R_H}{(R_H + R_\Gamma)^2} = \frac{E_\Gamma^2}{(R_H + R_\Gamma)^2} - \frac{2 \cdot E_\Gamma^2 \cdot (R_\Gamma - R_H)}{(R_H + R_\Gamma)^3} = 0.$$

Из полученного выражения следует, что для выделения максимальной мощности необходимо выполнение условия $R_H = R_\Gamma$.

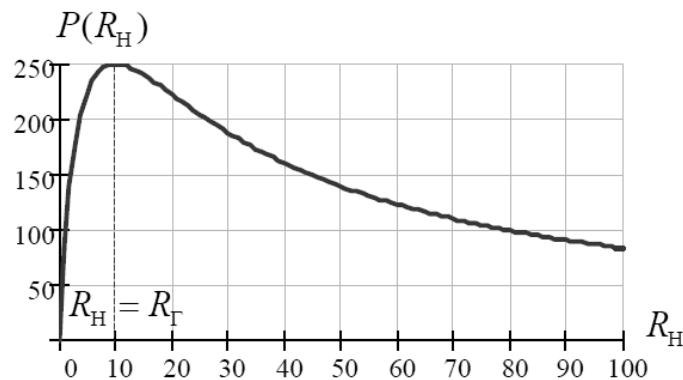


Рис. 3.16. Зависимость мощности от нагрузочного сопротивления

Определим мощность в нагрузке как функцию тока нагрузки $P(I_H)$. После несложных преобразований получаем:

$$P(I_H) = I_H \cdot U_H = I_H \cdot (E_\Gamma - I_H \cdot R_\Gamma) = -I_H^2 \cdot R_\Gamma + E_\Gamma \cdot I_H. \quad (3.10)$$

Дополняя это выражение до полного квадрата, получаем:

$$P(I_H) = -R_\Gamma \cdot \left(I_H - \frac{E_\Gamma}{2 \cdot R_\Gamma}\right)^2 + \frac{E_\Gamma^2}{4 \cdot R_\Gamma}. \quad (3.11)$$

Рассчитанный график данной функции по выражению (3.11) имеет следующий вид (рис. 3.17).

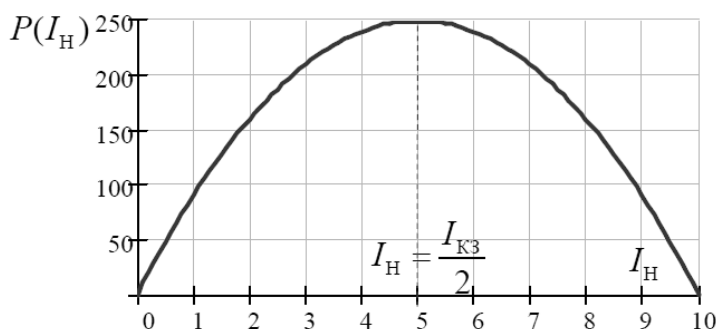


Рис. 3.17. Зависимость мощности от тока нагрузки

Таким образом, максимум $P(I_H)$ приходится на величину тока $I_H = \frac{I_{кз}}{2}$ равного половине тока короткого замыкания, при этом мощность равна величине

$$P(I_H) = \frac{E_\Gamma^2}{4 \cdot R_\Gamma}. \quad (3.12)$$

Пример листинга пользовательской программы для определения зависимости $P(R_H)$ приведен в приложении 2.

3.2.3. Метод комплексных амплитуд

Ток, изменяющийся во времени называется переменным током. Ток может иметь различные формы, он может быть пилообразным, импульсным, синусоидальным. Все это переменный ток.

Традиционно в электротехнике при знакомстве со свойствами электрических цепей переменного тока и с методами их анализа используют синусоидальную форму записи гармонической функции, а в радиотехнике косинусоидальную. Обе формы записи являются равноценными и отличаются только началом отсчета значений функций.

При этом считают, что линейная электрическая цепь с сосредоточенными параметрами, находится под монохроматическим (одночастотным) гармоническом воздействии. Токи всех неуправляемых источ-

ников тока и ЭДС неуправляемых источников напряжений такой цепи есть гармонические функции времени частоты ω [12]. Где ω угловую частоту гармонической функции при заданной частоте f или периоде T определяют в виде:

$$\omega = 2\pi / T = 2\pi f. \quad (3.13)$$

Таким образом, задача анализа линейной электрической цепи с сосредоточенными параметрами при гармоническом воздействии сводится к решению линейного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами, правая часть которого является гармонической функцией времени:

$$a_n \cdot \frac{d^n i}{dt^n} + a_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} i}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \cdot \frac{di}{dt} + a_0 \cdot i = E_m \sin(\omega t + \varphi_u). \quad (3.14)$$

где φ_u – начальная фаза гармонической функции ЭДС.

Рассматривая установившийся режим, при котором переходные процессы в цепи полностью прекратились, решение (3.14) из теории дифференциальных уравнений имеет единственное решение,

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i), \quad (3.15)$$

которое является гармонической функцией времени, с начальной фазой φ_i .

Решение дифференциального уравнения (3.14) для относительно простых цепей при $t \rightarrow \infty$ оказывается весьма трудоемким. Поэтому на практике анализ таких цепей выполняют с помощью *метода комплексных амплитуд*.

Метод комплексных амплитуд основан на идее функционального преобразования, когда исходные функции (оригиналы) заменяют новыми функциями (изображениями) или (символами), а именно гармоническую функцию времени представляют в виде комплексной функции времени.

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i) \rightarrow I_m \cdot e^{j\varphi_i} \cdot e^{j\omega t} = \dot{I} \cdot e^{j\omega t}, \quad (3.16)$$

где $\dot{I} = I_m \cdot e^{j\varphi_i}$ – комплексная амплитуда.

Так как в электрических цепях переменного тока приборы, с помощью которых измеряют токи и напряжения, определяют действующие значения, то при расчете и анализе этих цепей оперируют комплексными числами.

Комплексное значение тригонометрических функций напряжения и тока в этом случае записывают в следующем виде:

$$\underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_i} = I e^{j\varphi_i} \quad \underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\varphi_u} = U e^{j\varphi_u}, \quad (3.17)$$

где I, U – действующие значения тока и напряжения; $\underline{I}, \underline{U}$ – комплексные значения тока и напряжения.

Например, для того, чтобы сложить два тока одной частоты и разных фазовых сдвигов согласно первому закону Кирхгофа (рис. 3.18) нужно проделать следующие операции, а именно:

1) представить тригонометрическую функцию (мгновенное значение) первого тока, подтекающего к узлу, в виде комплексной функции времени

$$i_1(t) = I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) \rightarrow I_{m1} e^{j\varphi_1} e^{j\omega t} \rightarrow \dot{I}_1 e^{j\omega t};$$

2) представить тригонометрическую функцию (мгновенное значение) второго тока, подтекающего к узлу, в виде комплексной функции времени

$$i_2(t) = I_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2) \rightarrow I_{m2} e^{j\varphi_2} e^{j\omega t} \rightarrow \dot{I}_2 e^{j\omega t};$$

3) сложить тригонометрические функции токов, используя их комплексные изображения

$$I_{m1} \sin(\omega t + \varphi_1) + I_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2) \rightarrow (I_{m1} e^{j\varphi_1} + I_{m2} e^{j\varphi_2}) e^{j\omega t} \rightarrow (\dot{I}_1 + \dot{I}_2) e^{j\omega t}.$$

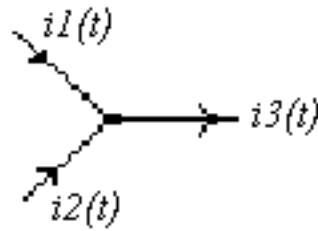


Рис. 3.18. Схема узла в цепи переменного тока

Тогда значение третьего тока, оттекающего от узла можно представить в виде комплексного значения, а затем преобразовать в тригонометрическую функцию

$$\underline{I} = \dot{I} e^{j\omega t} = I_m e^{j\varphi} e^{j\omega t} \rightarrow I_m \sin(\omega t + \varphi).$$

Аналогично осуществляются все другие операции – умножение, деление, разность и даже дифференцирование и интегрирование:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow \frac{di(t)}{dt} \rightarrow j\omega I_m e^{j\varphi} = j\omega \dot{I};$$

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi) \rightarrow \int i(t) dt \rightarrow \frac{I_m e^{j\varphi}}{j\omega} \rightarrow -j \frac{I_m}{\omega} e^{j\varphi} \rightarrow -j \frac{\dot{I}}{\omega}.$$

Таким образом, линейные операции над гармоническими функциями времени соответствуют операциям над их комплексными амплитудами, причем операции дифференцирования и интегрирования заменяются операциями умножения и деления. Это свойство комплексных изображений гармонических функций позволяет существенно упростить анализ линейных цепей переменного тока [12]. При этом систему интегро-дифференциальных уравнений электрического равновесия цепи можно записать в виде системы алгебраических уравнений для комплексных изображений соответствующих токов и напряжений.

3.2.4. Расчет и анализ стационарных режимов в цепях переменного тока

Рассмотрим и проведем анализ режима работы электрической цепи переменного тока (рис. 3.19).

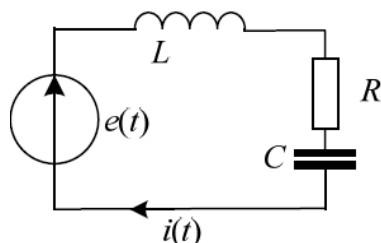


Рис. 3.19. Схема цепи переменного тока

Запишем второй закон Кирхгофа для замкнутого контура представленной схемы. Сумма напряжений на пассивных элементах равно величине воздействующей ЭДС:

$$u_R + u_L + u_C = e(t), \quad (3.18)$$

где $e(t) = E_m \sin(\omega t)$ – мгновенное значение ЭДС источника напряжения

Напряжения на активном, индуктивном и емкостном элементе схемы можно записать в виде:

$$u_R = iR, \quad u_L = \frac{d\psi}{dt}, \quad u_C = \frac{q}{C}, \quad (3.19)$$

где потокосцепление $\psi = Li$, а заряд на емкостном элементе $q = idt$.

Учитывая компонентные выражения (3.19), отражающие физические свойства элементов схемы, топологическое уравнение (3.18) можно записать в виде:

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt = e(t). \quad (3.20)$$

Для решения этого уравнения представим его в комплексной форме:

$$\underline{I}R + j\omega L\underline{I} - j\frac{1}{\omega C}\underline{I} = \underline{E}. \quad (3.21)$$

Обозначим коэффициенты пропорциональности перед токами \underline{I} через $X_L = \omega L$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$. Данные коэффициенты, имеют размерность сопротивлений, и в электротехнике называются соответственно индуктивным и емкостным сопротивлением. Алгебраическую сумму этих сопротивлений называют полным реактивным сопротивлением $X = (X_L - X_C)$, а $\underline{Z} = [R + j(X_L - X_C)]$ – полным комплексным сопротивлением схемы (рис. 3.15).

Тогда уравнение (3.21) можно записать в виде:

$$\underline{I} \cdot [R + j(X_L - X_C)] = \underline{E}. \quad (3.22)$$

Решение данного уравнения можно представить в виде отношения комплексных чисел:

$$\underline{I} = \frac{\underline{E}}{[R + j(X_L - X_C)]} = \frac{\underline{E}}{\underline{Z}}. \quad (3.23)$$

Уравнение (3.23) позволяет проанализировать влияние значений активного R , индуктивного X_L и емкостного X_C сопротивления на стационарный режим работы цепи переменного тока, исследовать явление резонанса напряжений и изменение фазового сдвига между напряжением и током.

На рис. 3.20 приведена зависимость действующего значения тока \underline{I} в схеме рис. 3.19 от изменения индуктивного сопротивления X_L .

На рис. 3.21 приведена зависимость фазового сдвига тока $\varphi(XL)$ относительно фазы ЭДС источника питания.

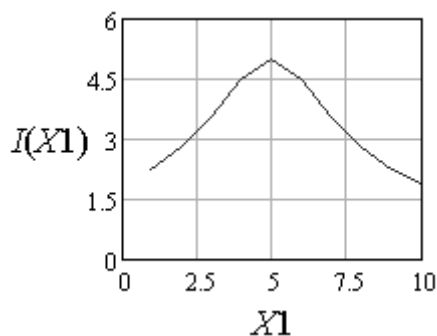


Рис. 3.20. Зависимость тока $I(XL)$

Анализ этих зависимостей позволяет сделать вывод о том, что при индуктивном сопротивлении $Xl = Xc = 5$ Ом возникает резонанс напряжений, что подтверждается максимальным значением тока (см. рис. 3.16). При этом анализ зависимости $\varphi(Xl)$ показывает, что в дорезонансной области при значениях $Xl < Xc$ характер нагрузки емкостной и напряжение отстает по фазе от тока, а при $Xl > Xc$ характер нагрузки индуктивный и напряжение опережает ток по фазе. В первом случае $\varphi(Xl)$ имеет отрицательные значения, а во втором положительные значения.

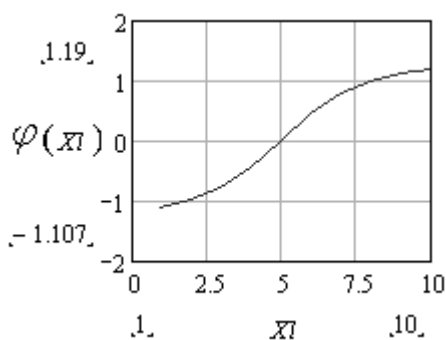


Рис. 3.21. Зависимость $\varphi(Xl)$

Листинг пользовательской программы для расчета и анализа стационарного режима работы цепи переменного тока, с использованием прикладного программного пакета MathCAD приведен в приложении 3.

Внимание

Для работы с комплексными числами указывается используемое в документе обозначение мнимой единицы – либо $i = \sqrt{-1}$, либо $j = \sqrt{-1}$.

Примеры работы с комплексными числами представлены на рис. 3.16.

Операции с комплексными данными			
$i := \sqrt{-1}$	задание мнимой единицы		
$Z := -3 + 2i$	$ Z = 3.606$	определение модуля (амплитуды) комплексного числа	
$\phi := \arg(Z)$	$\phi = 2.554$	определение аргумента (фазы) комплексного числа (радиан)	
$\sqrt{2} = 0.55 + 1.817i$	$\sqrt{-5} = 2.236i$	$2 \cdot Z = -6 + 4i$	
$Z1 := (1 + 2i)$	$Z2 := (3 - 4i)$	$Z1 \cdot Z2 = 11 + 2i$	$\frac{Z1}{Z2} = -0.2 + 0.4i$
$VC_0 := Z1$	$VC_1 := Z2$	$VC = \begin{pmatrix} 1 + 2i \\ 3 - 4i \end{pmatrix}$	формирование матрицы

Рис. 3.22. Примеры арифметических операций с комплексными числами

Для определения мгновенного значения тока, т.е. $i(t) = I_m \sin(\omega t + \varphi_i)$, необходимо:

1) определить амплитуду мгновенного значения тока, а именно $I_m = I \cdot \sqrt{2}$, где I действующее значение тока;

2) определить фазовый сдвиг тока по отношению фазы напряжения, а именно $\varphi_i = \varphi_e - \varphi_z$, так как в показательной форме комплексное значение тока записывается в виде:

$$\underline{I} = \frac{E \cdot e^{j\varphi_e}}{Z \cdot e^{j\varphi_z}} = \frac{E}{Z} \cdot e^{j(\varphi_e - \varphi_z)} = I \cdot e^{j\varphi_i}. \quad (3.24)$$

3.2.5. Расчет и анализ динамических режимов работы

Возможности прикладного программного пакета *MathCAD* позволяют при решении систем дифференциальных уравнений провести расчет и анализ динамических режимов работы электрических цепей, переходных процессов в электроустановках, в энергетических и электромеханических системах. Системы дифференциальных уравнений для их решения в среде *MathCAD* должны быть представлены в форме Коши. При этом аналогично решению одиночного дифференциального уравнения система уравнений может быть решена в векторной форме.

Расчет переходных процессов рассмотрим на примере простейшей RC-цепочки (рис. 3.23).

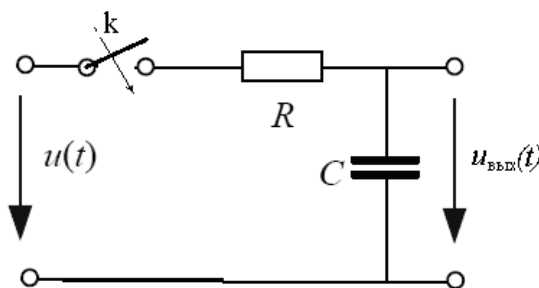


Рис. 3.23. схема RC-цепи

При подключении данной цепи к источнику напряжения постоянного тока, когда $u(t) = U \cdot 1(t)$ представляет собой единичную ступенчатую функцию времени, можно проанализировать процесс зарядки конденсатора. При питании данной цепи от источника переменного тока, изменяющегося по синусоидальному закону, частота которого регулируется, можно изучить свойства этой цепи, как фильтра низких частот.

Задание. Листинг программы для расчета и исследования процесса заряда конденсатора приведен в приложении 4. Используя данную программу, студенты должны определить влияние сопротивления R на время заряда $t_{\text{зар}}$ конденсатора при неизменном значении емкости C и наоборот определить влияние C на $t_{\text{зар}}$ при неизменном значении R .

При разработке программы с помощью программного пакета *MathCAD* для решения обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ) используют:

- классический метод решения, пример такого решения приведен в приложении 4;
- операторный метод решения, при использовании прямого и обратного преобразования Лапласа;
- численные методы решения, которыми пользуются когда аналитическое решение нелинейных дифференциальных уравнений невозможно.

Алгоритм классического метода решения дифференциального уравнения рассмотрим на примере следующего уравнения

$$a_2 \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dx}{dt} + a_0 \cdot x = f(t), \quad (3.25)$$

где $f(t)$ – временная зависимость управляющего воздействия (для электрической цепи напряжение питания); a_2, a_1, a_0 – коэффициенты уравнения, определяемые внутренними параметрами исследуемого объекта (для электрической цепи реактивными и активными параметрами схемы); x – координаты переменных величин (для электрических цепей значения искомых токов или напряжений).

Из математики известно, что решение данного уравнения имеет три составляющие [1], а именно одну принужденную и две свободных составляющих. Свободные составляющие реакции исследуемого объекта (для электрической цепи токи или напряжения) на входное управляющее воздействие с течением времени затухают. Принужденная составляющая реакции представляет собой установившееся значение. Поэтому общее решение уравнения (3.25) записывают в виде [1, 2]:

$$x(t) = x_{\text{пр}}(t) + A_1 \cdot e^{p_1 \cdot t} + A_2 \cdot e^{p_2 \cdot t}, \quad (3.26)$$

где значение принужденной составляющей при $t \rightarrow \infty$ определяется в виде:

$$x_{\text{пр}}(t) = \frac{f(t)}{a_0}. \quad (3.27)$$

Значение принужденной составляющей – это частное решение уравнения (3.25), которое при $t \rightarrow \infty$ имеет следующий вид:

$$a_0 \cdot x = f(t). \quad (3.28)$$

Свободные составляющие процессов в исследуемом объекте протекают за счет разности энергий соответствующих установившимся режимам до и после коммутации. Они определяются из решения однородного дифференциального уравнения, которое представляет уравнение (3.25) без правой части, т.е. $f(t) = 0$

$$a_2 \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + a_1 \cdot \frac{dx}{dt} + a_0 \cdot x = 0. \quad (3.29)$$

Для определения свободных составляющих необходимо найти корни p_i характеристического уравнения соответствующего однородному уравнению (3.29).

$$a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p + a_0 = 0, \quad (3.30)$$

Определение корней одного простейшего характеристического уравнения в *MathCAD* осуществляют с помощью функций *root*.

При нахождении корней полинома имеющего вид

$$a_n \cdot p^n + \dots + a_2 \cdot p^2 + a_1 \cdot p^1 + a_0 = 0 \quad (3.31)$$

лучше использовать функцию *polyroots*, нежели *root*. В отличие от функции *root*, функция *polyroots* не требует начального приближения и возвращает сразу все корни, как вещественные, так и комплексные. Вычисление корней кубического полинома приведено на рис. 3.24.

Значения постоянных интегрирования определяются с использованием нулевых начальных условий для момента времени $t = 0$, когда $x(t) = 0$, $\frac{dx(t)}{dt} = 0$. Уравнение (3.26) при этих условиях можно представить в виде:

$$\text{для } x(t) = 0 \quad 0 = x_{\text{пр}}(t) + A_1 \cdot e^0 + A_2 \cdot e^0, \quad (3.32)$$

$$\text{для } \frac{dx(t)}{dt} = 0 \quad 0 = \dot{x}_{\text{пр}}(t) + A_1 \cdot p_1 + A_2 \cdot p_2. \quad (3.33)$$

Представим уравнения (3.32) и (3.33) в следующем виде:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 \\ p_1 & p_2 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} A_1 \\ A_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -x_{\text{пр}}(t) \\ -\dot{x}_{\text{пр}}(t) \end{vmatrix}. \quad (3.34)$$

```

    ПРИМЕНЕНИЕ ФУНКЦИЙ root И polyroots
a3 := 2  a2 := -8  a1 := 25  a0 := -64  Коэффициенты полинома
F(x) := a3·x3 + a2·x2 + a1·x + a0  Задание полинома
Вычисление действительного корня
x := 0  x1 := root(F(x), x)  x1 = 3.211
Вычисление двух других корней
i := √-1  x2 := 1 + 1·i  x2 := root(F(x)/(x - x1), x)  x2 = 0.395 + 3.132i
x3 := root(F(x)/((x - x1)·(x - x2)), x)  x3 = 0.395 - 3.132i
Пример применения функции polyroots
V := (a0
      a1
      a2
      a3)  polyroots(V) = (0.395 + 3.132i
                          0.395 - 3.132i
                          3.211)

```

Рис. 3.24. Вычисление корней кубического полинома

Решение системы уравнений (3.34) позволяет определить значения постоянных интегрирования A_1 и A_2 , где

$$A_1 = \frac{\dot{x}_{\text{пр}}(t) - p_2 \cdot x_{\text{пр}}(t)}{p_2 - p_1} \quad \text{а} \quad A_2 = \frac{p_1 \cdot x_{\text{пр}}(t) - \dot{x}_{\text{пр}}(t)}{p_2 - p_1}.$$

Тогда в окончательном виде уравнение (3.26) в пользовательской программе *MathCAD* можно представить в виде:

$$x(t) = x_{\text{пр}}(t) + \frac{\dot{x}_{\text{пр}}(t) - p_2 \cdot x_{\text{пр}}(t)}{p_2 - p_1} \cdot e^{p_1 \cdot t} + \frac{p_1 \cdot x_{\text{пр}}(t) - \dot{x}_{\text{пр}}(t)}{p_2 - p_1} \cdot e^{p_2 \cdot t}. \quad (3.35)$$

3.3. Символьные вычисления в системе *MathCAD*

Символьные вычисления в системе *MathCAD* позволяют решить многие задачи математики аналитически, без применения численных методов и, соответственно, без погрешностей вычислений. Символьные вычисления в *MathCAD* можно реализовать тремя способами:

- с использованием команд подменю позиции **Symbolics** (Символика) главного меню (рис. 3.24);

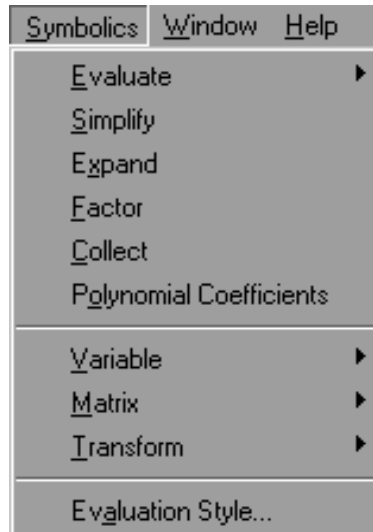



Рис. 3.24. Команды подменю позиции Symbolics

- с использованием команд панели **Symbolic**, включаемой кнопкой  на математической панели инструментов (рис. 3.25);

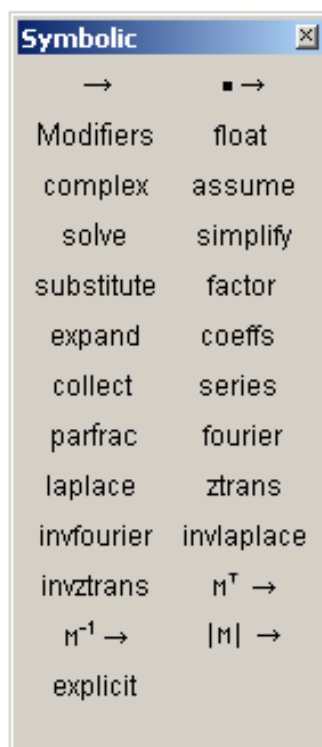


Рис. 3.25. Математическая панель инструментов Symbolics

- с использованием команды **Optimization** позиции главного меню **Math**.

Символьные вычисления в *Mathcad* можно осуществлять в двух различных вариантах:

- с помощью команд меню;
- с помощью оператора символьного вывода \rightarrow , ключевых слов символьного процессора и обычных формул.

Чтобы символьные операции выполнялись, процессору необходимо указать, над каким выражением эти операции должны производиться, т.е. выделить выражение. Для ряда операций следует не только указать выражение, к которому они относятся, но и наметить переменную, относительно которой выполняется та или иная символьная операция.

Первым способом символьных вычислений пользуются, когда необходимо осуществить аналитическое преобразование выражения не сохраняя сам ход вычислений. При этом аналитические преобразования, проводимые через меню, касаются одного выделенного выражения, выделенной части выражения или отдельной переменной. На эти преобразования не влияют формулы, находящиеся в пользовательской программе *MathCAD* выше выделенного выражения. Данный способ наиболее приемлем при изучении разделов математики, связанных с преобразованием компонентных уравнений. В качестве примера рассмотрим разложение на сомножители выражения $\sin 2x$.

Алгоритм преобразования данного выражения следующий:

1. Введите выражение $\sin 2x$.
2. Выделите его целиком.
3. Выберите в главном меню пункт **Symbolics** (Символика)/ **Expand** (Разложить).

Фрагмент данного преобразования в программе *MathCAD* приведен на (рис. 3.26).

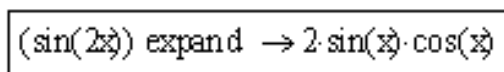

$$(\sin(2x)) \text{ expand} \rightarrow 2 \cdot \sin(x) \cdot \cos(x)$$

Рис. 3.26. Разложение на сомножители

Второй способ позволяет записывать выражения в традиционной математической форме и сохраняет символьные вычисления в документе *MathCAD*. Оператор символьного вывода учитывает все предыдущее содержимое документа и выдает результат с его учетом. Второй способ символьных вычислений достаточно широко используется в инженерных расчетах и при разработке математических моделей в *MathCAD*.

В целом символьные вычисления можно использовать при решении *задач алгебры*, осуществляя следующие преобразования: упрощение выражений (Simplify), разложение выражений (Expand), разложение

на множители (Factor), приведение подобных слагаемых (Collect), определение коэффициентов полинома (Polynomial Coefficients), вычисление в символьном виде конечную или бесконечную сумму рядов или произведение, разложение на элементарные дроби (Convert to Partial Fractions), подстановку переменной (Substitute), матричная алгебра.

При решении задач, связанных с математическим анализом, символьные вычисления позволяют осуществлять: дифференцирование (Differentiate), интегрирование (Integrate), разложение в ряд (Expand to Series), решение уравнений (Solve).

Интегральные преобразования, а именно преобразование Фурье (Fourier), преобразование Лапласа (Laplace), Z-преобразование (Z) в основном используют при разработке математических моделей на старших курсах при выполнении курсовых проектов, индивидуальных заданий и выпускных квалификационных работ. При исследовании процессов и явлений в электрических цепях переменного тока наиболее часто пользуются преобразованиями Лапласа [1, 3].

В табл. 1 приведены основные команды панели **Symbolic**.

Таблица 1

Команды панели Symbolic (символы)		
Команда	Функция	Пример
$\int \rightarrow$	Символьное вычисление	$\frac{d}{dt} \sin(t) \rightarrow \cos(t)$
$\int \rightarrow$	Символьное вычисление с ключевым словом	$x^2 + 2 \cdot x + 1 \text{ factor} \rightarrow (x + 1)^2$
Modifier	Дополнительные модификаторы	assume – вводное слово для приведенных далее определений; real – для var=real означает вещественное значение var; RealRange – для var=RealRange(a,b) означает принадлежность вещественной var к интервалу [a,b]; trig – задает направление тригонометрических преобразований
float	Численное вычисление	$\ln(2) \cdot x^2 \text{ float} \rightarrow .69314718055994530942 \cdot x^2$
complex	Комплексное вычисление	$\frac{1}{a + i \cdot b} \text{ complex} \rightarrow \frac{a}{(a^2 + b^2)} - i \cdot \frac{b}{(a^2 + b^2)}$
assume	Символьное вычисление с некоторыми предположениями	$\left(\sqrt{M^2} \right) \left \begin{array}{l} \text{simplify} \\ \text{assume, } M > 0 \end{array} \right. \rightarrow \text{csgn}(M) \cdot M$
solve	Решение уравнения (системы уравнений) относительно переменной (переменных)	$\left(\begin{array}{l} x + y = 2 \\ 2 \cdot x - y = 1 \end{array} \right) \text{ solve, } \left(\begin{array}{l} x \\ y \end{array} \right) \rightarrow (1 \ 1)$

simplify	Упрощение выражений	$\sin(x)^2 + \cos(x)^2 \text{ simplify} \rightarrow 1$
substitute	Замена переменной	$\sqrt{1-x^2} \text{ substitute, } x = \cos(v) \rightarrow (1 - \cos(v)^2)^{\frac{1}{2}}$
factor	Разложение на множители	$x^3 + x \text{ factor, } 2 \rightarrow x \cdot (x^2 + 1)$
expand	Перемножение степеней и произведений	$\frac{x^2 + 1}{x} \text{ expand, } x \rightarrow x + \frac{1}{x}$
coeffs	Определение коэффициентов полинома	$a \cdot x + b \text{ coeffs, } x \rightarrow \begin{pmatrix} b \\ a \end{pmatrix}$
collect	Группировка слагаемых по степеням переменной	$(3 \cdot x + y)^2 \text{ collect, } y \rightarrow y^2 + 6 \cdot x \cdot y + 9 \cdot x^2$
series	Разложение в ряд Тейлора или Лорана	$\cos(x) \text{ series, } x, 5 \rightarrow 1 - \frac{1}{2} \cdot x^2 + \frac{1}{24} \cdot x^4$
parfac	Разложение на элементарные дроби	$\frac{2}{(x^2 - 1)} \text{ convert, parfrac, } x \rightarrow \frac{1}{(x - 1)} - \frac{1}{(x + 1)}$
fourier	Преобразование Фурье	$e^{-2x} \left \begin{array}{l} \text{fourier, } t \\ \text{complex} \end{array} \right. \rightarrow 2 \cdot \exp(-2 \cdot x) \cdot \pi \cdot \text{Dirac}(\omega)$
invfourier	Обратное преобразование Фурье	$2 \cdot \exp(-2 \cdot x) \cdot \pi \cdot \text{Dirac}(\omega) \left \begin{array}{l} \text{invfourier, } \omega \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow \exp(-2 \cdot x)$
laplace	Преобразование Лапласа	$\cos(a \cdot t) \text{ laplace, } t \rightarrow \frac{s}{(s^2 + a^2)}$
invlaplace	Обратное преобразование Лапласа	$\frac{s}{(s^2 + a^2)} \text{ invlaplace, } s \rightarrow \cos(a \cdot t)$
ztrans	Z-преобразование	$1 \text{ ztrans, } n \rightarrow \frac{z}{(z - 1)}$
invztrans	Обратное Z-преобразование	$\frac{z}{(z - 1)} \text{ invztrans, } z \rightarrow 1$
M^T	Транспонирование матрицы	$A := \begin{pmatrix} r & 1 \\ 2 & 3 \end{pmatrix} \quad A^T \rightarrow \begin{pmatrix} r & 2 \\ 1 & 3 \end{pmatrix}$
M⁻¹	Нахождение обратной матрицы	$A^{-1} \rightarrow \begin{bmatrix} \frac{3}{(3-r-2)} & \frac{-1}{(3-r-2)} \\ \frac{-2}{(3-r-2)} & \frac{r}{(3-r-2)} \end{bmatrix}$
 M 	Нахождение определителя матрицы	$ A \rightarrow 3 \cdot r - 2$

Ключевые слова команд необходимо набирать только строчными буквами (кроме **Modifier** – первая буква в этом слове должна быть прописной).

Блоки системы **SmartMath** имеют следующие отличительные свойства:

- дают хорошее визуальное представление операций;
- имеют шаблоны для задания параметров и опций;
- обеспечивают работу с функциями пользователя;
- обеспечивают передачу данных от формулы к формуле;
- допускают расширение, позволяющее использовать сразу несколько директив;

- имеют конструкцию, схожую с конструкцией программных блоков.

Необходимо помнить:

- директива упрощения **simplify** не имеет параметров;
- директива разложения в ряд Тейлора **series** требует указания двух параметров: задания начального значения переменной x и указания числа членов ряда;
- директивы преобразования Лапласа **laplace** и решения уравнений **solve** требуют одного параметра – указания имени переменной (в нашем случае x);
- с помощью директивы **solve** можно решать и системы уравнений – тогда ее параметр будет вектором неизвестных.

Выполнение матричных операций в символьной форме особой специфики не имеет.

Глава 4

РЕШЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ПРОГРАММЕ *MICROSOFT EXCEL*

Microsoft Office являются незаменимым ежедневным инструментом с помощью, которого решаются многие повседневные задачи студентов, бухгалтеров, инженеров, менеджеров. Как любой программный пакет Microsoft Office имеет ряд приложения в виде дополнительных программ. Одной из таких программ, входящих в этот пакет, является программа Excel.

Excel представляет собой редактор электронных таблиц, аналогов которому нет, и предназначен для математической обработки и визуализации числовых массивов данных.

4.1. Интерфейс программы *Excel*

Excel – это мощнейший вычислительный инструмент, хранилище упорядоченных данных, средство для создания различных графиков, расписаний, диаграмм и т.д. Программа Excel может частично или даже полностью автоматизировать многие процессы в работе студентов, избавив их от рутинных операций, расчетов, тем самым освободив время и увеличив производительность их труда.

Для многих инженерных расчётов в *Excel* полезно использовать пакет анализа, доступный по пути: *Сервис / Надстройки / Пакет анализа* (рис. 4.1). Данный пакет рекомендуется включить перед началом работы с *Excel*.

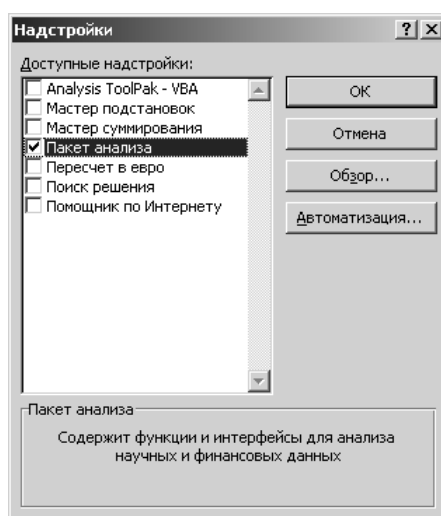


Рис. 4.1. Пакет анализа

С переходом компании Microsoft на новые версии своих ключевых программных продуктов – Windows Vista и Office 2007 были внесены изменения и в пакет Microsoft Office Excel 2007. В первую очередь это отразилось на его интерфейсе (рис. 4.2).

Основную часть главного окна программы Excel занимает так называемый **лист** – белая область, разделенная на прямоугольные ячейки. Это и есть рабочая область, то есть область создаваемого или редактируемого документа. Над листом находится **строка формул** (поле, расположенное слева от значка *fx*), в которую вводят различные постоянные значения, а также формулы и функции, используемые при работе с документом.

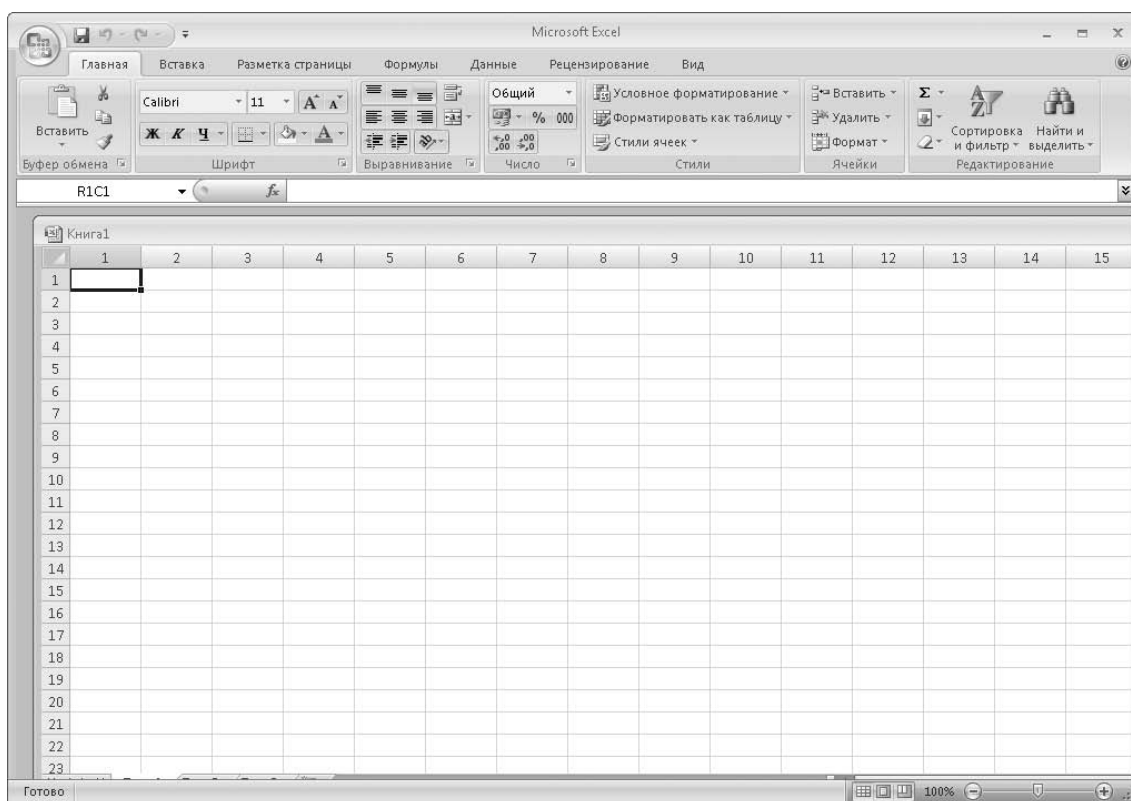


Рис. 4.2. Главное окно программы Excel

Выше расположена так называемая **лента** – новый элемент интерфейса программы Excel 2007. На ней имеются различные кнопки, раскрывающиеся списки и флажки, которые используют для осуществления различных операций. В левом верхнем углу окна программы расположена круглая кнопка, которая называется **Кнопка «Office»**. Она вызывает меню с некоторыми важными командами, такими как открытие, сохранение или создание файла, печать и т.д.

Справа от Кнопки «Office» расположена **Панель быстрого доступа**. По умолчанию на ней находятся кнопки **Сохранить**, **Отменить** и **Вернуть**. В нижней части окна программы (под листом) размещается **строка состояния**, в которой отображается различная информация, а в ее правой части имеются кнопки режима просмотра документа и ползунок для изменения масштаба.

Рассмотрение интерфейса начнем с ленты, поскольку данная область окна программы претерпела существенные изменения по сравнению с предыдущими версиями Excel. Сверху на рис. 4.3 изображена верхняя часть окна программы Excel XP (2002), а снизу – Excel 2007.

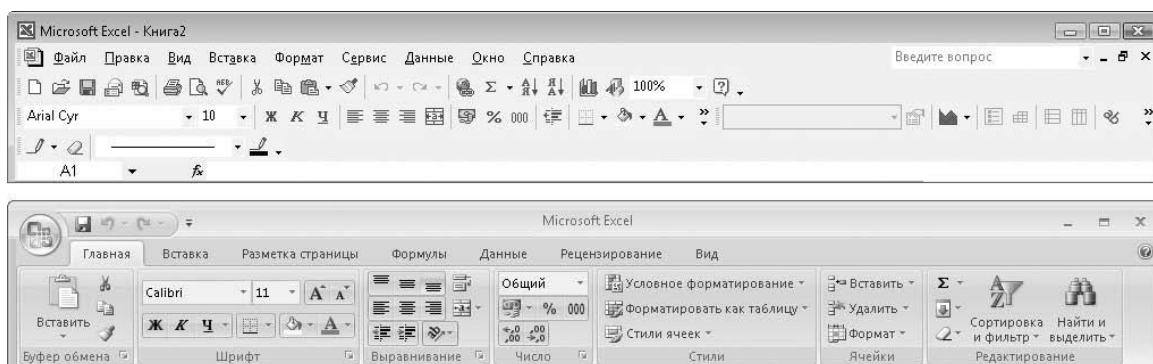


Рис. 4.3. Верхняя часть окна Excel XP (вверху) и Excel 2007 (внизу)

Во всех версиях Excel до версии 2007 окно программы содержало строку меню, а также панели инструментов, кнопки и элементы управления которые дублировали часто используемые команды меню. Пользователь мог самостоятельно создать новые панели, добавить на панель определенные кнопки или удалить их. Вообще, можно было добавить все команды на панели инструментов в виде кнопок и иных элементов управления, но тогда панели инструментов заняли бы основную часть окна программы, что существенно уменьшило бы рабочую область.

В Excel 2007 реализован совершенно иной подход. Меню в данной версии отсутствует полностью. Все команды, некогда размещавшиеся в меню, теперь расположены именно на ленте. Лента теперь содержит вкладки. Ярлыки вкладок вы видите над лентой (**Главная**, **Вставка**, **Разметка страницы**, **Формулы**, **Данные**, **Рецензирование** и **Вид**). Попробуйте щелкнуть кнопкой мыши на любом ярлыке, например **Вставка**. Вид ленты изменится (рис. 4.4). Теперь на ней расположены совершенно другие кнопки и элементы управления, которые относятся к командам вставки. С их помощью можно вставить в документ таблицу, рисунок, диаграмму и т.д.

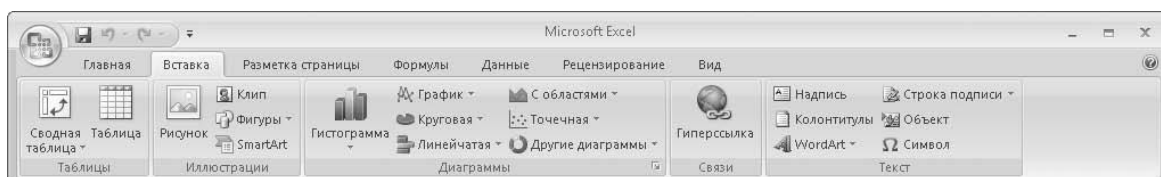


Рис. 4.4. Вкладка *Вставка*

Теперь щелкните кнопкой мыши на вкладке **Разметка страницы** (рис. 4.5). Вид ленты снова изменится. Теперь стали доступными элементы управления для изменения вида страницы, настройки ее ориентации, задания областей печати и т.д.

Таким образом, на вкладках ленты находятся элементы управления для осуществления разных операций. Это позволило сэкономить экранное пространство и избавиться от строки меню.

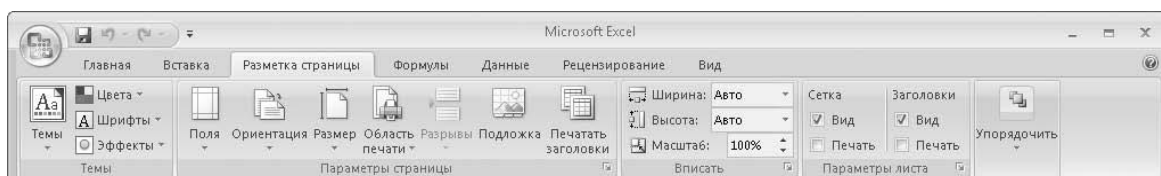


Рис. 4.5. Вкладка *Разметка страницы*

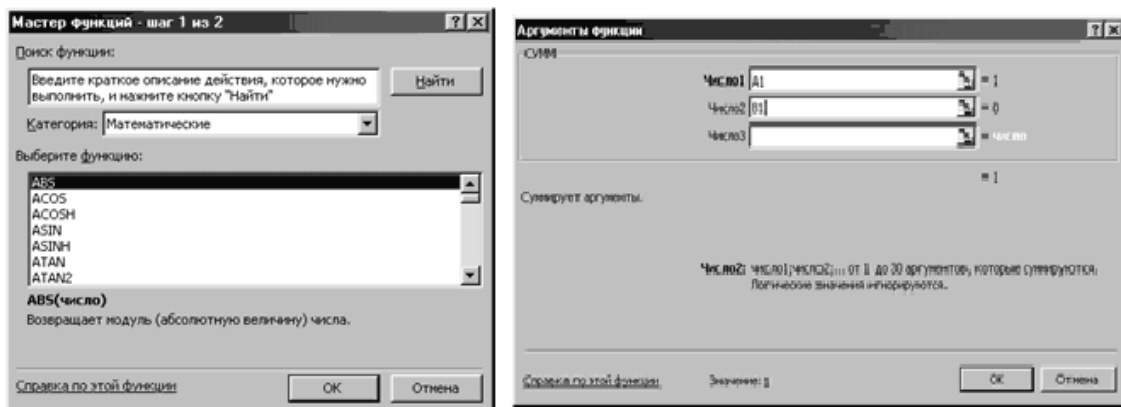
4.2. Применение функций Excel в электротехнических расчетах

Основным средством анализа и обработки, вводимых в таблицу данных являются формулы. С их помощью данные можно складывать, умножать и сравнивать, производить над ними другие операции. Для выполнения стандартных вычислений – как сложных, так и простых – Excel предлагает большое количество встроенных функций, которые можно вызывать в формулах.

В Excel используется более 400 встроенных функций, которые разделены на категории, каждая из которых включает в себя определенный набор функций (тематические группы): математические, финансовые, статистические, текстовые, логические, даты и времени и т.д. Для упрощения ввода функций в Excel предусмотрен **Мастер функций**, который имеет два окна – два шага (рис. 4.6).

Вызов **Мастер функций** осуществляют следующим образом:

- делают активной ячейку, в которую хотят поместить результат;
- выбирают команду **Вставка – Функция** или нажимают пиктограмму f_x в строке формул.



Шаг 1 из 2

Шаг 2 из 2

Рис. 4.6. Внешний вид *Мастера функций*

1. В первом окне **Мастера функций** выбирают категорию и название конкретной функции. Для каждой категории функций справа в окне (или внизу) показан их состав.

2. После нажатия кнопки ОК появляется следующее второе диалоговое окно, и осуществляется построение функции, т.е. указание ее аргументов.

Каждый аргумент вводится в специально предназначенную для него строку.

Правила построения формул с помощью Мастера функций следующие:

- состав аргументов функций, порядок задания и типы значений фиксированы и не подлежат изменению;
- аргументы вводятся в специальных строках ввода;
- для формирования аргумента, как результата промежуточного вычисления по функциям, нажимается кнопка вызова функций в строке ввода; глубина вложенности – произвольная;
- для построения ссылки следует установить курсор в поле ввода, а затем перевести указатель мыши на требуемый рабочий лист для выделения ячейки или блока;
- очень длинные формулы рекомендуется разбивать на отдельные строки внутри ячейки, используя клавиши Alt+Enter.

Некоторые функции не входят в ядро Excel и доступны только при загрузке дополнительного **Пакета анализа** из меню **Сервис Надстройки**.

Формула в Excel – это выражение, которое начинается знаком равенства «=» и определяет, какие расчеты нужно произвести на рабочем листе. Формула в ячейке может включать следующие элементы: числовые и текстовые значения, ссылки на другие ячейки, знаки математиче-

ских и логических операций, а также обращения к функциям, как уже было отмечено выше. При вычислении формул используется порядок действий, принятый в математике, а именно при вычислении значения арифметического выражения операции выполняются слева направо с соблюдением трех уровней приоритета. Сначала выполняется возведение в степень, затем умножение и деление, затем сложение и вычитание. Последовательность выполнения операций можно изменить с помощью круглых скобок. При наличии скобок сначала вычисляются значения выражений, записанных внутри скобок низшего уровня (в самых внутренних скобках), и т.д.

4.3. Решение типовых электротехнических задач

При решении задач, связанных с расчетом электрических схем и с составлением систем линейных алгебраических уравнений по законам Кирхгофа, наиболее широко пользуются методом обратных матриц или методом Крамера [2, 14].

4.3.1. Расчет электрической цепи постоянного тока

Метод обратных матриц. Пусть необходимо рассчитать электрическую цепь постоянного тока, схема которой представлена на рис. 4.7. Для этого необходимо составить систему уравнений, используя 1-й и 2-й законы Кирхгофа. В каждое уравнение системы формально входят все токи с соответствующими коэффициентами и знаками. Для отсутствующих в ветвях и контурах схемы токов коэффициенты равны 0.

При составлении систем уравнений необходимо помнить *первое условие*, что число уравнений, входящих в систему, равно числу неизвестных токов. Поэтому в схеме, представленной на рис. 4.7, необходимо определить пять токов.

Второе условие, которое требуется соблюдать, это необходимо определить число уравнений составленных по первому и второму законам Кирхгофа. Как известно по первому закону Кирхгофа число уравнений равно числу узлов в схеме без одного узла, т.е. [2, 14]:

$$n = m - 1, \quad (4.1)$$

где n – число уравнений по первому закону Кирхгофа, а m – число неизвестных токов, равное числу ветвей в схеме электрической цепи.

Тогда число уравнений k , которые необходимо составить по второму закону Кирхгофа, равно:

$$k = m - n. \quad (4.2)$$

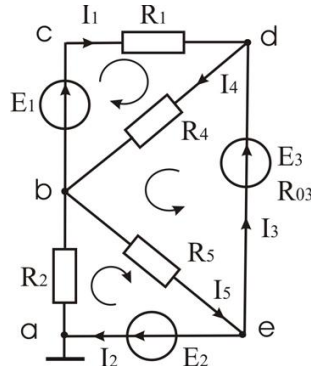


Рис. 4.7. Схема электрической цепи постоянного тока

Соблюдая эти условия полную систему уравнений для рассматриваемой схемы можно представить в виде:

$$\begin{cases} 1 \cdot I_1 + 0 \cdot I_2 + 1 \cdot I_3 - 1 \cdot I_4 + 0 \cdot I_5 = 0; \\ 0 \cdot I_1 - 1 \cdot I_2 - 1 \cdot I_3 + 0 \cdot I_4 + 1 \cdot I_5 = 0; \\ R_1 \cdot I_1 + 0 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 + R_4 \cdot I_4 + 0 \cdot I_5 = E_1; \\ 0 \cdot I_1 + R_2 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 + 0 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = E_2; \\ 0 \cdot I_1 + 0 \cdot I_2 + R_{03} \cdot I_3 + R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 = E_3. \end{cases} \quad (4.3)$$

С использованием понятия матрицы и матричных операций система (4.3) может быть представлена в виде матричного уравнения [15]:

$$[A] \cdot \bar{x} = \bar{B}, \quad (4.4)$$

где $[A]$ – матрица коэффициентов (параметров схемы) системы уравнений (4.3); \bar{x} – вектор неизвестных токов; \bar{B} – вектор свободных членов.

Для решения матричного уравнения (4.4) запишем исходные данные для схемы (рис. 4.7):

$$E_1 = 60 \text{ В}; E_2 = 80 \text{ В}; E_3 = 70 \text{ В};$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом}; R_2 = 50 \text{ Ом}; R_{03} = 5 \text{ Ом}; R_4 = 65 \text{ Ом}; R_5 = 85 \text{ Ом}.$$

Тогда матрицу коэффициентов $[A]$, вектор неизвестных токов \bar{x} и вектор свободных членов \bar{B} можно записать, как

$$[A] = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 20 & 0 & 0 & 65 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 & 85 \\ 0 & 0 & 5 & 65 & 85 \end{vmatrix}, \quad \bar{x} = \begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \end{vmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 60 \\ 80 \\ 70 \end{vmatrix}.$$

Решение системы методом обратной матрицы может быть получено умножением правой и левой части системы уравнения на матрицу, обратную к матрице коэффициентов системы:

$$[A]^{-1} \cdot [A] \cdot \bar{x} = [A]^{-1} \cdot \bar{B} . \quad (4.5)$$

Учитывая, что произведение обратной матрицы на прямую матрицу дает единичную матрицу, получаем

$$\bar{x} = [A]^{-1} \cdot \bar{B} . \quad (4.6)$$

Таким образом, решение системы сводится к нахождению обратной матрицы $[A]^{-1}$ и затем вычислению произведения этой матрицы на вектор \bar{B} . Этот метод удобно применять в тех случаях, когда несколько раз решается система с разными правыми частями. В этом случае достаточно один раз вычислить обратную матрицу $[A]^{-1}$ и затем умножать ее на разные векторы \bar{B} .

Для решения системы (4.3) в Excel нужно:

1. Создать новый лист и присвоить ему имя «Система».
2. В ячейке A1 ввести текст «Решение систем уравнений; обращение матрицы».
3. В ячейку B3 ввести текст $A \cdot x = B$. Теперь ввести матрицу коэффициентов $[A]$ и вектор правой части \bar{B} , для этого:

- в ячейку A5 ввести текст «Исходная матрица (A)»;
- в ячейки A6:E10 ввести элементы матрицы $[A]$;
- в ячейку G5 ввести текст «Правая часть (B)»;
- в ячейки G6:G10 ввести компоненты вектора правой части.

Далее необходимо обратить матрицу $[A]$ и умножить вектор \bar{B} на обратную матрицу $[A]^{-1}$. Применяемая для обращения матрицы функция МОБР, вызывают с помощью **Мастера функций**. Она возвращает массив значений, который вставляется сразу в целый столбец ячеек.

4. Для вычисления обратной матрицы необходимо:
 - в ячейку A12 ввести текст «Обратная матрица (1/A)»;
 - выделить ячейки A13:E17, куда будет помещена обратная матрица;
 - щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций fx**;
 - *в первом окне Мастера функций* выбрать категорию *Математические* функцию МОБР;

- во втором окне Мастера функций ввести адрес массива исходной матрицы A6:E10. Нажать одновременно клавиши Ctrl+ Shift+Enter для вставки этой формулы во все выбранные ячейки A13:E17.

5. Для умножения обратной матрицы на столбец свободных членов необходимо:

- в ячейку G12 ввести текст «Вектор решения $x=(1/A)b$ »;
- выделить ячейки G13:G17;
- щелкнуть по пиктограмме Мастер функций;
- выбрать категорию *Математические*, функцию МУМНОЖ;
- ввести формулу =МУМНОЖ(A13:E17; G6:G10);
- затем нажать «Ctrl + Shift + Enter» для вставки формулы во все выделенные ячейки.

Рабочий лист к этому моменту должен выглядеть так, как показано на рис. 4.8 (режим показа формул – рис. 4.9). В ячейках G13:G17 должны стоять значения компонентов вектора решения x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 (в данном примере это значение неизвестных токов ($I_1=0,936$ А; $I_2= 0,9118$ А; $I_3= -0,507$ А; $I_4= 0,5866$ А; $I_5= 0,4048$ А)).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Решение систем уравнений; обращение матрицы									
2										
3		Ax=b								
4										
5	Исходная матрица (A)					Правая часть (b)				
6	1	0	1	-1	0		0			
7	0	-1	-1	0	1		0			
8	20	0	0	65	0		60			
9	0	50	0	0	85		80			
10	0	0	5	65	85		70			
11										
12	Обратная матрица (1/A)					Вектор решения $x=(1/A)/b$				
13	0,5388	0,465	0,0231	0,0093	-0,015		1,0936			
14	-0,186	-0,247	0,0093	0,0151	-0,012		0,9118			
15	0,2954	-0,608	-0,015	-0,012	0,0193		-0,507			
16	-0,166	-0,143	0,0083	-0,003	0,0045		0,5866			
17	0,1094	0,1452	-0,005	0,0029	0,0072		0,4048			
18										

Рис. 4.8. Рабочий лист Excel с решением системы уравнений

Для системы (4.3) составляются следующие определители

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 20 & 0 & 0 & 65 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 & 85 \\ 0 & 0 & 5 & 65 & 85 \end{vmatrix}, \quad |A_1| = \begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 60 & 0 & 0 & 65 & 0 \\ 80 & 50 & 0 & 0 & 85 \\ 70 & 0 & 5 & 65 & 85 \end{vmatrix},$$

$$|A_2| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 20 & 60 & 0 & 65 & 0 \\ 0 & 80 & 0 & 0 & 85 \\ 0 & 70 & 5 & 65 & 85 \end{vmatrix}, \quad |A_3| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 20 & 0 & 60 & 65 & 0 \\ 0 & 50 & 80 & 0 & 85 \\ 0 & 0 & 70 & 65 & 85 \end{vmatrix},$$

$$|A_4| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 1 \\ 20 & 0 & 0 & 60 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 80 & 85 \\ 0 & 0 & 5 & 70 & 85 \end{vmatrix}, \quad |A_5| = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 20 & 0 & 0 & 65 & 60 \\ 0 & 50 & 0 & 0 & 80 \\ 0 & 0 & 5 & 65 & 70 \end{vmatrix}.$$

Затем производится вычисление определителей и определение неизвестных токов согласно (4.7).

Для использования Excel при решении системы (4.3) методом Крамера нужно:

1. Создать новый лист и присвоить ему имя «Система».
2. В ячейку A1 ввести текст «Решение системы уравнений методом Крамера».
3. В ячейку B3 ввести текст «Основная матрица».
4. В ячейки A4:E8 ввести элементы основной матрицы системы уравнений.
5. В ячейки A10:E14, A16:E20, A22:E26, A28:E32, A34:E38 ввести элементы новых матриц с заменой соответствующих столбцов матрицы столбцом свободных членов.
6. Далее вычисляют определители полученных матриц. Для этого:
 - в ячейку G7 необходимо ввести знак «=» и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций fx**;
 - на первом шаге выбрать функцию МОПРЕД, возвращающей определитель квадратной матрицы;

- на втором шаге указать адрес массива матрицы A4:E8 и нажать Enter;

- далее проделать аналогичные операции для всех матриц.

В ячейках G12,G18, G24, G30, G36 вычисляют определители соответствующих матриц A10:E14, A16:E20, A22:E26, A28:E32, A34:E38;

7. Для получения неизвестных делают следующие операции:

- в ячейку H7 ввести название искомой переменной «I1», в ячейку H8 ввести название «I2», и т.д. H9 – «I3», H10 – «I4», H11 – «I5»;

- в ячейку I7 ввести формулу = G12/\$G\$6, в ячейку I8 ввести формулу = G18/\$G\$6, и т.д. в ячейку I9 – = G24/\$G\$6, в ячейку I10 – = G30/\$G\$6, в ячейку I11 – = G36/\$G\$6;

- в ячейки J7:J11 ввести размерность искомой величины «А».

Рабочий лист после выполнения всех операций должен выглядеть так, как показано на рис. 4.10 (режим показа формул – рис. 4.11).

В ячейках I7:I9 при этом должны стоять значения неизвестных токов $I_1 = 1,09$ А; $I_2 = 0,91$ А; $I_3 = -0,51$; $I_4 = 0,59$ А; $I_5 = 0,40$ А.

4.3.2. Расчет электрической цепи переменного тока

При решении задач, связанных с расчетом электрических цепей переменного тока, пользуются аналитическим символическим методом расчета цепей переменного тока [2, 14]. Основой этого метода являются комплексные числа, использование которых позволяет изображения синусоидальных величины представить в виде векторов на комплексной плоскости. При этом дифференциальные уравнения, с помощью которых описывают процессы в электрических цепях переменного тока, приводят к алгебраическим уравнениям.

В качестве примера использования Excel при расчете электрических цепей переменного тока выберем один из наиболее сложных и практически значимых разделов электротехники – «Трехфазные цепи» и рассмотрим следующую типовую задачу.

В электрической цепи, схема которой приведена на рис. 4.12, по заданным значениям ЭДС трехфазного источника и сопротивлениям нагрузки, имеющим различный характер в каждой фазе, требуется определить фазные токи нагрузки и ток в нейтральном проводе. Действующее значение ЭДС каждой фазы трехфазного генератора равно 220 В. Комплексные значения ЭДС в фазах можно в этом случае записать в виде:

$$\dot{E}_A = 220 \text{ В}; \quad \dot{E}_B = (-110 - 190,5) \text{ В}; \quad \dot{E}_C = (-110 + 190,5) \text{ В};$$

Сопротивления фаз нагрузки равны: $Z_A = 100$ Ом; $Z_B = (86,6 + 50j)$ Ом; $Z_C = (86,6 - 50j)$ Ом.

Расчет такой цепи можно произвести с помощью встроенных функций программы Excel категории «Инженерные», таких как КОМПЛЕКСН, МНИМ.ДЕЛ, МНИМ.СУММ, МНИМ.ABS, МНИМ.АРГУМЕНТ, МНИМ.ПРОИЗВЕД.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Решение систем уравнений методом Крамера										
2											
3	Основная матрица										
4	1	0	1	-1	0						
5	0	-1	-1	0	1						
6	20	0	0	65	0	Δ	-594125				
7	0	50	0	0	85			I1	1,09	A	
8	0	0	5	65	85			I2	0,91	A	
9								I3	-0,51	A	
10	0	0	1	-1	0			I4	0,59	A	
11	0	-1	-1	0	1			I5	0,40	A	
12	60	0	0	65	0	$\Delta 1$	-649750				
13	80	50	0	0	85						
14	70	0	5	65	85						
15											
16	1	0	1	-1	0						
17	0	0	-1	0	1						
18	20	60	0	65	0	$\Delta 2$	-541750				
19	0	80	0	0	85						
20	0	70	5	65	85						
21											
22	1	0	0	-1	0						
23	0	-1	0	0	1						
24	20	0	60	65	0	$\Delta 3$	301250				
25	0	50	80	0	85						
26	0	0	70	65	85						
27											
28	1	0	1	0	0						
29	0	-1	-1	0	1						
30	20	0	0	60	0	$\Delta 4$	-348500				
31	0	50	0	80	85						
32	0	0	5	70	85						
33											
34	1	0	1	-1	0						
35	0	-1	-1	0	0						
36	20	0	0	65	60	$\Delta 5$	-240500				
37	0	50	0	0	80						
38	0	0	5	65	70						

Рис. 4.10. Рабочий лист Excel с решением системы уравнений методом Крамера

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Решение систем уравнений методом Крамера									
2										
3	Основная матрица									
4	1	0	1	-1	0					
5	0	-1	-1	0	1					
6	20	0	0	65	0	Δ =МОПРЕД(A4:E8)				
7	0	50	0	0	85			I1 =G12/\$G\$6	A	
8	0	0	5	65	85			I2 =G18/\$G\$6	A	
9								I3 =G24/\$G\$6	A	
10	0	0	1	-1	0			I4 =G30/\$G\$6	A	
11	0	-1	-1	0	1			I5 =G36/\$G\$6	A	
12	60	0	0	65	0	Δ1 =МОПРЕД(A10:E14)				
13	80	50	0	0	85					
14	70	0	5	65	85					
15										
16	1	0	1	-1	0					
17	0	0	-1	0	1					
18	20	60	0	65	0	Δ2 =МОПРЕД(A16:E20)				
19	0	80	0	0	85					
20	0	70	5	65	85					
21										
22	1	0	0	-1	0					
23	0	-1	0	0	1					
24	20	0	60	65	0	Δ3 =МОПРЕД(A22:E26)				
25	0	50	80	0	85					
26	0	0	70	65	85					
27										
28	1	0	1	0	0					
29	0	-1	-1	0	1					
30	20	0	0	60	0	Δ4 =МОПРЕД(A28:E32)				
31	0	50	0	80	85					
32	0	0	5	70	85					
33										
34	1	0	1	-1	0					
35	0	-1	-1	0	0					
36	20	0	0	65	60	Δ5 =МОПРЕД(A34:E38)				
37	0	50	0	0	80					
38	0	0	5	65	70					

Рис. 4.11. Рабочий лист Excel с решением системы уравнений в режиме показа формул

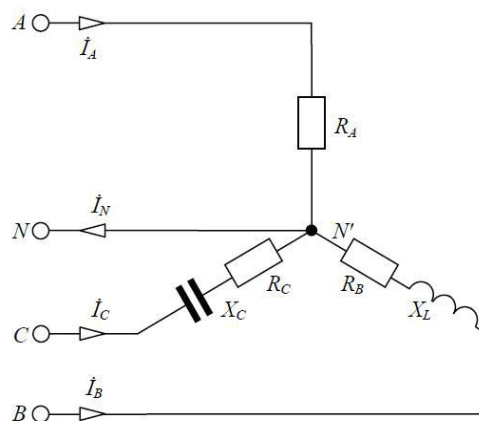


Рис. 4.12. Электрическая трехфазная цепь

Для расчета данной электрической трехфазной цепи нужно:

1. Создать новый лист.
2. В ячейке A1 ввести текст «Расчет электрической цепи комплексным методом».
3. В ячейке A3 ввести текст «Расчет источника», в ячейку D3 – «Расчет нагрузки».
4. В ячейках A5:A7 ввести обозначение ЭДС источника E_A , E_B , E_C , в ячейках D5:D7 ввести обозначения полных сопротивлений фаз Z_A , Z_B , Z_C , в ячейках G5:G7 ввести обозначения токов фаз I_a , I_b , I_c .
5. Установить курсор в ячейку B5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций, f_x** .
6. Выбрать категорию *Инженерные*, функцию КОМПЛЕКСН.
7. На втором шаге ввести действительную и вещественную часть ЭДС, а также указать символ мнимой единицы «j».
8. Установить курсор в ячейку E5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций, f_x** .
9. Выбрать категорию *Инженерные*, функцию КОМПЛЕКСН.
10. На втором шаге ввести в качестве действительной части значение активного сопротивления фазы A, вещественной части – величину реактивного сопротивления фазы A с учетом знака, а также указать символ мнимой единицы «j».
11. Повторить пункты 5–10 в ячейках B6, B7 (для ввода ЭДС фазы B и фазы с генератора) и в ячейках E6, E7 (для ввода сопротивления фазы B и фазы C).
12. Установить курсор в ячейку H5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций f_x** .
13. Ввести формулу =МНИМ.ДЕЛ(B5; E5) из категории *Инженерные*.

14. Затем нажать «Enter» для вставки формулы в ячейку.
 15. Скопировать формулу из ячейки N5 в ячейки N6 и N7. Получили значение фазных токов в виде комплексных чисел;
 16. В ячейку M3 ввести «Ток в нейтральном проводе»;
 17. Установить курсор в ячейку N5 и щелкнуть по пиктограмме **Мастер функций**.
 18. Ввести формулу =МНИМ.СУММ(N5;N6;N7) из категории *Инженерные*.
 19. Затем нажать «Enter» для вставки формулы в ячейку. Получили значение тока в нейтральном проводе в виде комплексного числа.
 20. Для определения значений ЭДС, полного сопротивления, фазных токов нагрузки и тока в нейтральном проводе необходимо воспользоваться функцией, МНИМ.ABS.
 21. Для определения сдвигов фаз можно воспользоваться функцией МНИМ.АРГУМЕНТ, которая возвращает значение угла в радианах.
 22. Для перевода значения углов из радиан в градусы можно воспользоваться функцией ГРАДУСЫ.
- Рабочий лист после выполнения всех операций должен выглядеть, как показано на рис. 4.13 (режим показа формул – рис. 4.14).
- Изменение режима нагрузки позволяет автоматически пересчитать нужные параметры электрической цепи.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q		
1	Расчет электрической цепи комплексным методом																		
2																			
3	Расчет источника			Расчет нагрузки														Ток в нейтральном проводе	
4																			
5	Ea	220	B	za	100	Ом	Ia	2,2	A				IN	-1,61036765617688					
6	Eb	-110-190,5j	B	zb	86,6+50j	Ом	Ib	-1,90518382808844-1,09977839024917j											
7	Ec	-110+190,5j	B	zc	86,6-50j	Ом	Ic	-1,90518382808844+1,09977839024917j											
8																			
9	Действительное значение величин																		
10																			
11	Ea	220,00	B	za	100,00	Ом	Ia	2,20 A					IN	1,61					
12	Eb	219,98	B	zb	100,00	Ом	Ib	2,20 A											
13	Ec	219,98	B	zc	100,00	Ом	Ic	2,20 A											
14																			
15	Сдвиги фаз																		
16	генератора			нагрузки			между током и напряжением фаз												
17	фа	0,00 рад		0,00 рад		0,00 рад									3,14 рад				
18	фb	-2,09 рад		0,52 рад		-2,62 рад													
19	фc	2,09 рад		-0,52 рад		2,62 рад													
20																			
21	фа	0,00 °C		0,00 °C		0,00 °C									180,00 °C				
22	фb	-120,00 °C		30,00 °C		-150,00 °C													
23	фc	120,00 °C		-30,00 °C		150,00 °C													

Рис. 4.13. Рабочий лист Excel с комплексным методом расчета электрических цепей переменного тока

При обрыве нейтрального провода необходимо рассчитывать напряжение смещения нейтрали U_{Nn} по формуле

$$\dot{U}_{Nn} = \frac{\dot{E}_A \cdot \frac{1}{Z_A} + \dot{E}_B \cdot \frac{1}{Z_B} + \dot{E}_C \cdot \frac{1}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}}. \quad (4.9)$$

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Расчет электрической цепи комплексным методом																
2																	
3	Расчет источника				Расчет нагрузки				Ток в нейтральном проводе								
4																	
5	Ea	=КОМПЛЕКСН(220;0;"j")	za	=КОМПЛЕКСН(100;0;"j")	Ia	=МНИМ.ДЕЛ(B5;E5)	I _N	=МНИМ.СУММ(H5;H6;H7)									
6	Eb	=КОМПЛЕКСН(-110;-190,5;"j")	zb	=КОМПЛЕКСН(86,6;50;"j")	Ib	=МНИМ.ДЕЛ(B6;E6)											
7	Ec	=КОМПЛЕКСН(-110;190,5;"j")	zc	=КОМПЛЕКСН(86,6;-50;"j")	Ic	=МНИМ.ДЕЛ(B7;E7)											
8																	
9	Действительное значение величин																
10																	
11	Ea	=МНИМ.АВС(B5)	za	=МНИМ.АВС(E5)	Ia	=МНИМ.АВС(H5)	I _N	=МНИМ.АВС(N5)									
12	Eb	=МНИМ.АВС(B6)	zb	=МНИМ.АВС(E6)	Ib	=МНИМ.АВС(H6)											
13	Ec	=МНИМ.АВС(B7)	zc	=МНИМ.АВС(E7)	Ic	=МНИМ.АВС(H7)											
14																	
15	Сдвиги фаз																
16	генератора				нагрузки			между током и напряжением фаз									
17	φa	=МНИМ.АРГУМЕНТ(B5)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(E5)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(H5)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(N5)												
18	φb	=МНИМ.АРГУМЕНТ(B6)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(E6)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(H6)													
19	φc	=МНИМ.АРГУМЕНТ(B7)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(E7)	=МНИМ.АРГУМЕНТ(H7)													
20																	
21	φa	=ГРАДУСЫ(B17)	=ГРАДУСЫ(E17)	=ГРАДУСЫ(H17)	=ГРАДУСЫ(N17)												
22	φb	=ГРАДУСЫ(B18)	=ГРАДУСЫ(E18)	=ГРАДУСЫ(H18)													
23	φc	=ГРАДУСЫ(B19)	=ГРАДУСЫ(E19)	=ГРАДУСЫ(H19)													

Рис. 4.14. Рабочий лист Excel с комплексным методом расчета электрических цепей переменного тока в режиме показа формул

Для вычисления комплексных проводимостей $Y_k = \frac{1}{Z_k}$ необходимо

воспользуемся функцией МНИМ.ДЕЛ, а для вычисления произведения $E_k \cdot Y_k$ – функцией МНИМ.ПРОИЗВЕД.

Часть рабочего листа с расчетом напряжения смещения нейтрали выглядит так, как показано на рис. 4.15 (режим показа формул – рис. 4.16).

	A	B	C	D	E	F	G
24							
25	Напряжение смещения нейтрали для трехпроводной цепи						
26							
27	U_{Nn}	-58,9429990819767					
28							
29	Y_a	0,01					
30	Y_b	0,0086603810567665-0,00500022000968043j					
31	Y_c	0,0086603810567665+0,00500022000968043j					
32							
33	$E_a * Y_a$	2,2					
34	$E_b * Y_b$	-1,90518382808844-1,09977839024917j					
35	$E_c * Y_c$	-1,90518382808844+1,09977839024917j					
36							

Рис. 4.15. Часть рабочего листа Excel с комплексным методом расчета напряжения смещения нейтрали в трехпроводной трехфазной электрической цепи

	A	B	C	D	E	F	G	H
24								
25	Напряжение смещения нейтрали для трехпроводной цепи							
26								
27	U_{Nn}	=МНИМ,ДЕЛ(МНИМ,СУММ(B33;B34;B35);МНИМ,СУММ(B29;B30;B31))						
28								
29	Y_a	=МНИМ,ДЕЛ(1;E5)						
30	Y_b	=МНИМ,ДЕЛ(1;E6)						
31	Y_c	=МНИМ,ДЕЛ(1;E7)						
32								
33	$E_a * Y_a$	=МНИМ,ПРОИЗВЕД(B5;B29)						
34	$E_b * Y_b$	=МНИМ,ПРОИЗВЕД(B6;B30)						
35	$E_c * Y_c$	=МНИМ,ПРОИЗВЕД(B7;B31)						

Рис. 4.16. Часть рабочего листа Excel с комплексным методом расчета напряжения смещения нейтрали в режиме показа формул

4.4. Анализ и расчет электротехнических устройств в программе *Excel*

Электротехническое устройство – это совокупностью компонентов, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока. При анализе и расчете электротехнических устройств осуществляется решение определенного вида задач.

4.4.1. Расчет электротехнических устройств в *Excel*

Расчет электротехнических устройств это задачи, связанные с определением напряжений, токов и мощностей различных элементов электрических цепей устройства при заданных их параметрах. Нередко возникает и другая задача, когда бывает необходимо найти значения параметров тех или иных элементов, например электродвижущих сил (ЭДС) источников, обеспечивающих получение требуемых напряжений, токов или мощностей.

В качестве примера рассмотрим задачу, связанную с расчетом числа витков W катушки индуктивности, намотанной на тороидальный магнитопровод (рис. 4.17).

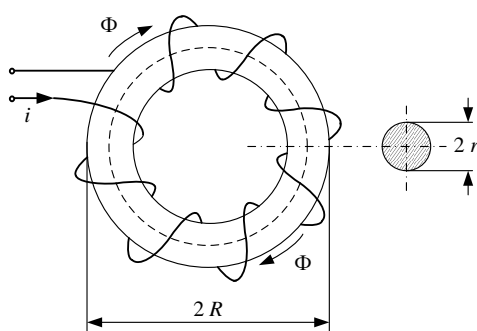


Рис. 4.17. Катушка индуктивности

Исходными данными при решении этой задачи являются геометрические размеры магнитопровода: $R = 160 \cdot 10^{-6}$ м, $r = 32 \cdot 10^{-6}$ м; относительная магнитная проницаемость магнитопровода $\mu = 160$.

При этом необходимо рассчитать число витков катушки для того, чтобы получить требуемую индуктивность L_0 равную 0.05 Гн.

Основой для решения данной задачи является компонентное уравнение, определяющее индуктивность катушки в виде отношения потокосцепления к току

$$L = \frac{\Psi}{i}, \quad (4.10)$$

где потокосцепление катушки пропорционально произведению числа витков W на средний поток Φ через сечение магнитопровода площадью S .

$$\Psi = W \cdot \Phi. \quad (4.11)$$

Площадь сечения тороидального магнитопровода определяется в виде

$$S = \pi \cdot r^2. \quad (4.12)$$

Согласно закону полного тока $i \cdot w = H \cdot l$ можно выразить ток в катушке

$$i = \frac{H \cdot l}{W}, \quad (4.13)$$

где H – напряжённость магнитного поля; l – длина средней силовой линии магнитопровода.

$$l = 2 \cdot \pi \cdot (R - r). \quad (4.14)$$

Поток Φ через поперечное сечение магнитопровода пропорционален произведению магнитной индукции B на площадь сечения S :

$$\Phi = B \cdot S. \quad (4.15)$$

Магнитная индукция B связана с напряжённостью магнитного поля H :

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H, \quad (4.16)$$

где $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная.

Учитывая (4.10) – (4.16), индуктивность катушки определяется как

$$\begin{aligned} L(W) &= \frac{\Psi}{i} = \frac{W \cdot \Phi}{\frac{H \cdot l}{W}} = \frac{W^2 \cdot S \cdot B}{H \cdot l} = \\ &= W^2 \cdot \frac{S}{l} \cdot \frac{\mu \cdot \mu_0 \cdot H}{H} = \frac{W^2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \mu \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi \cdot (R - r)}, \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$L(W) = \frac{W^2 \cdot r^2 \cdot \mu \cdot \mu_0}{2 \cdot (R - r)}.$$

Согласно условиям задачи составим нелинейное уравнение

$$L(W) - L_0 = 0. \quad (4.18)$$

Для графического решения полученного нелинейного уравнения определяем нелинейную функцию

$$f(W) = L(W) - L_0. \quad (4.19)$$

Построив график знакопеременной функции $f(W)$, определим искомое число витков W , при котором функция меняет знак.

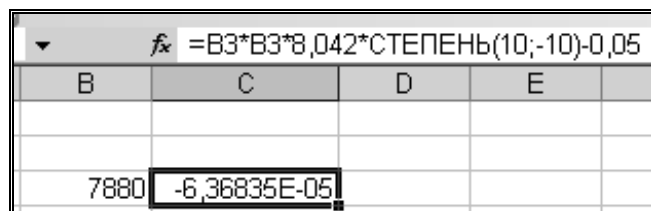
Подставив численные данные из условия задачи, функцию $f(W)$ можно записать в виде

$$f(W) = \frac{W^2 \cdot r^2 \cdot \mu \cdot \mu_0}{2 \cdot (R - r)} - L_0 = \frac{W^2 \cdot 32^2 \cdot 10^{-12} \cdot 160 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 10^{-6} \cdot (160 - 32)} - 0.05;$$

$$f(W) = W^2 \cdot 8.042 \cdot 10^{-10} - 0.05.$$

4.4.2. Численное решение задачи в Excel

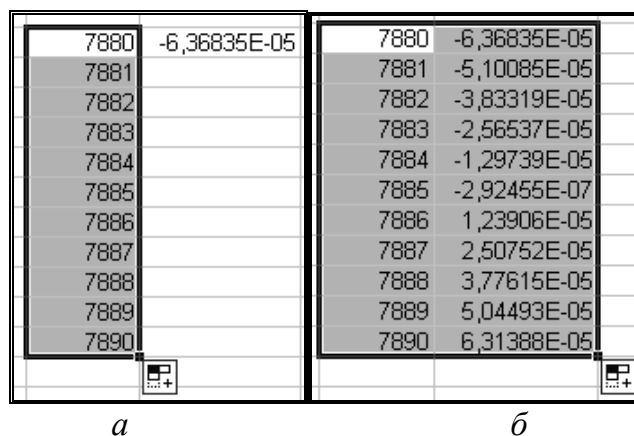
Начальное приближение $W = W_{\text{нач}} = 7880$ найдём из последнего уравнения для функции $f(W)$. Введём начальное приближение в ячейку B3. В ячейку C3 введём формулу $W^2 \cdot 8.042 \cdot 10^{-10} - 0.05$ (рис. 4.18). В ячейке C3 отобразится значение функции $-6.36835E-05$. В ячейку B4 введём следующее значение переменной 7881, отличающееся от предыдущей на шаг $\Delta W = 1$.



fx =B3*B3*8,042*СТЕПЕНЬ(10;-10)-0,05				
B	C	D	E	
7880	-6,36835E-05			

Рис. 4.18. Определение начального приближения

Выделить массив ячеек B3–B4. Поместить курсор на правый нижний угол выделенного массива. Нажать левую кнопку мышки и, не отпуская кнопку, протянуть курсор вниз, а затем выделить полный массив ячеек переменных B3–B13 (рис. 4.19, а).



B	C	B	C
7880	-6,36835E-05	7880	-6,36835E-05
7881		7881	-5,10085E-05
7882		7882	-3,83319E-05
7883		7883	-2,56537E-05
7884		7884	-1,29739E-05
7885		7885	-2,92455E-07
7886		7886	1,23906E-05
7887		7887	2,50752E-05
7888		7888	3,77615E-05
7889		7889	5,04493E-05
7890		7890	6,31388E-05

Рис. 4.19. Определение массивов функции $f(W)$

Выделить ячейку C3. Поместить курсор на правый нижний угол выделенной ячейки. Нажать левую кнопку мышки и, не отпуская кнопку, протянуть курсор вниз, а затем выделить полный массив ячеек функции C3–C13 (рис. 4.19, б). Теперь необходимо построить график функции. Выделить полный массив B3–C13. В верхнем меню программы Excel выбрать раздел Вставка и этом разделе выбрать опцию Диа-

грамма (рис. 4.20, а). В появившемся диалоговом окне выбрать точечную диаграмму со значениями, соединёнными сглаживающими линиями (рис. 4.20, б).

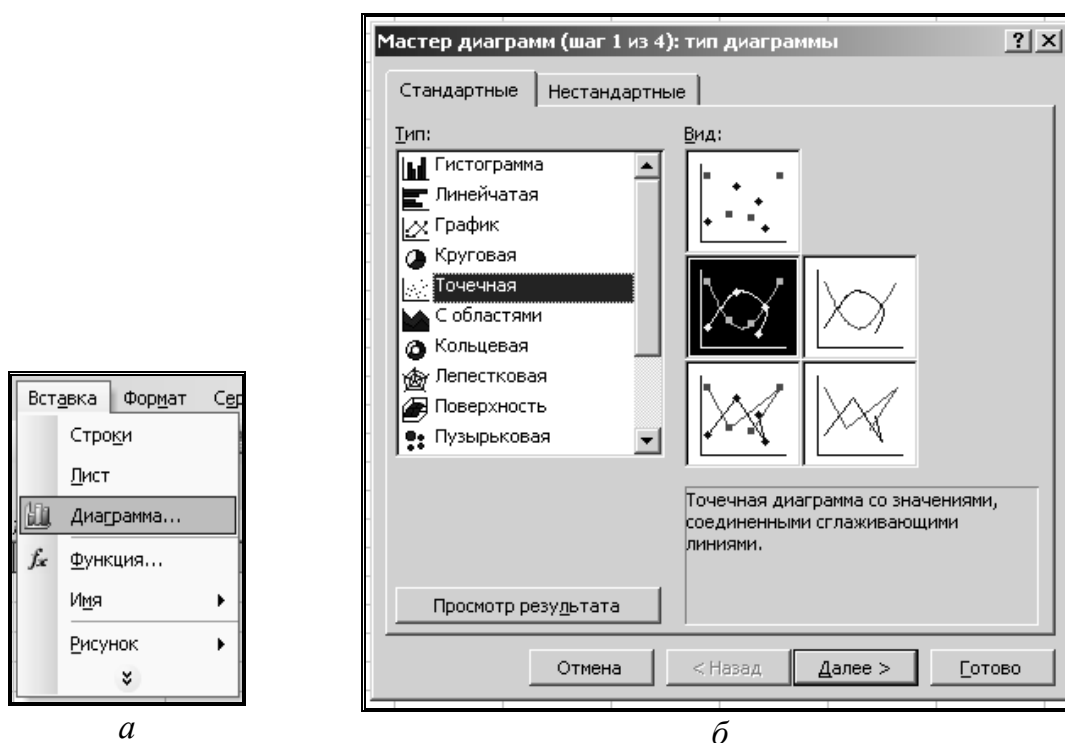


Рис. 4.20. Построение диаграмм в Excel

На диаграмме необходимо выполнить прозрачную заливку, подписи осей и координатную сетку (рис. 4.21).

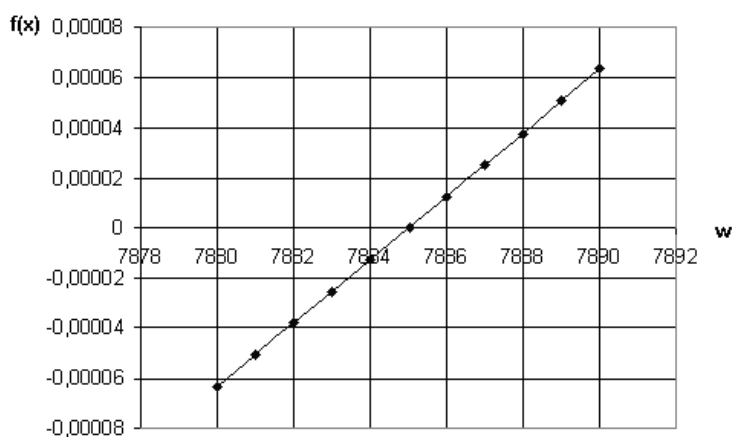


Рис. 4.21. Диаграмма функции $f(W)$

Как видно из диаграммы, при $W = 7885$ функция меняет знак, это и есть искомый ответ на поставленную задачу.

4.4.3. Анализ динамики электротехнических устройств в *Excel*

При решении задач анализа полностью известны структура электротехнического устройства и его электрические схемы, заданы все параметры схем, и требуется оценить какое-либо статическое или динамическое свойство этого устройства.

В качестве примера рассмотрим переходный процесс пуска вхолостую двигателя постоянного тока независимого возбуждения (ДПТ НВ). Для решения данной задачи воспользуемся схемой замещения двигателя, подключенной к источнику постоянного тока (рис. 4.22).

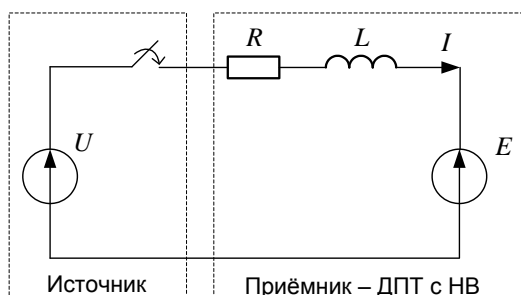


Рис. 4.22. Схема подключения двигателя постоянного тока

На рис. 4.22 приведены идеальный источник напряжения U и схема замещения ДПТ НВ, которая представлена в виде последовательно соединенных резистора с сопротивлением R , индуктивности L и ЭДС обмотки якоря E . Основным допущением в данной модели двигателя является постоянство магнитного потока обмотки возбуждения $\Phi_0 = \text{const}$. Поэтому схема обмотки возбуждения ДПТ НВ на рис. 4.22 не приведена.

ЭДС обмотки якоря ДПТ с НВ рассчитывается как

$$E = \omega \cdot c, \quad (4.20)$$

где c – электромеханический коэффициент ДПТ с НВ.

Электромеханический коэффициент определяется как

$$c = \frac{U_H - I_H \cdot R}{\omega_H}, \quad (4.21)$$

где U_H, I_H, ω_H – номинальные напряжение якоря, ток якоря и скорость вала ДПТ с НВ.

Система дифференциальных уравнений, описывающих процесс пуска ДПТ с НВ вхолостую, выглядит как

$$\begin{cases} U = I \cdot R + L \cdot \frac{dI}{dt} + \omega \cdot c; \\ I \cdot c = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \end{cases} \quad (4.22)$$

где J – момент инерции вала двигателя.

Выделим правые части дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dI}{dt} = \frac{U - I \cdot R - \omega \cdot c}{L}; \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{I \cdot c}{J}. \end{cases} \quad (4.23)$$

В качестве индексной переменной выберем переменную j . Зададим нулевые начальные условия $t_0 = 0, \omega_0 = 0, I_0 = 0$.

Согласно методу Эйлера, на шаге расчёта $j+1$ имеем следующие соотношения:

$$\begin{cases} t_{j+1} = t_j + \Delta t; \\ I_{j+1} = I_j + \Delta t \cdot \frac{U - I_j \cdot R - \omega_j \cdot c}{L}; \\ \omega_{j+1} = \omega_j + \Delta t \cdot \frac{I_j \cdot c}{J}. \end{cases} \quad (4.24)$$

Шаг интегрирования рассчитаем следующим образом:

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\frac{J \cdot R}{c^2} \cdot \frac{L}{R}}}{40}. \quad (4.25)$$

Зададимся численными параметрами для решения задачи в Excel (табл. 3.2).

Таблица 3.2

Величина	Значение	Размерность
U_H	220	В
I_H	20	А
R	1	Ом
ω_H	157	рад/с
U	220	В
L	0.1	Гн
J	0.25	кг·м ²

В ячейке A1 рассчитаем коэффициент c (рис. 4.23).

A1		fx =(220-20*1)/157			
	A	B	C	D	
1	1,273885				

Рис. 4.23. Расчет электромеханического коэффициента

В ячейке B1 рассчитаем шаг интегрирования (рис. 4.24).

B1		fx =КОРЕНЬ(0,25*0,1/1,273885^2)/40				
	B	C	D	E	F	G
1	0,003103					

Рис. 4.24. Расчет шага интегрирования

В столбце A, начиная с ячейки A3, поместим массив времени. В столбце B, начиная с ячейки B3, поместим массив тока. В столбце C, начиная с ячейки C3, будет размещён массив скорости. В массив A3–C3 внесем нули, так как переходный процесс рассчитывается с нулевыми начальными условиями (рис. 4.25).

A3		fx 0		
	A	B	C	
3	0	0	0	

Рис. 4.25. Начальные условия

Выделим ячейку B1, скопируем содержимое ячейки в буфер с помощью сочетания клавиш <Ctrl> + <C>. Вставим содержимое буфера в ячейку A4 с помощью сочетания клавиш <Ctrl> + <V>. В правом нижнем углу выберем раскрывающийся маркированный список и в нём отметим пункт *Значения и форматы чисел*. Аналогично внесём скопированную информацию из B1 в E3. Содержимое ячейки E3 удвоим (рис. 4. 26).

E3		fx =0,00310298580736132*2				
	E	F	G	H	I	
3	0,006206					

Рис. 4.26. Содержимое ячейки E3

Удвоенное значение шага интегрирования внесём в ячейку A5, выделив в параметрах вставки пункт *Значения и форматы чисел*. Выделим ячейки A4–A5 и продолжим выделение до ячейки A250.

В ячейку B4 внесём формулу для второй итерации расчёта тока (рис. 4.27).

B4		fx = B3+\$B\$1*(220-B3*1-\$A\$1*C3)/0,1				
	B	C	D	E	F	G
4	6,826569					

Рис. 4.27. Формула для второй итерации расчёта тока

В ячейку C4 внесём формулу для второй итерации расчёта скорости (рис. 4.28).

C4		fx = C3+\$B\$1*B3*\$A\$1/0,25				
	C	D	E	F	G	
4	0					

Рис. 4.28. Формула для второй итерации расчёта скорости

Выделим массив ячеек A4–C4 и продолжим выделение до A250–C250. Получен числовой массив решения системы дифференциальных уравнений. Выделим массив A3–C250. Вызовем *Мастер диаграмм*, по аналогии с предыдущими диаграммами построим графики переходных процессов тока и скорости (рис. 4.28).

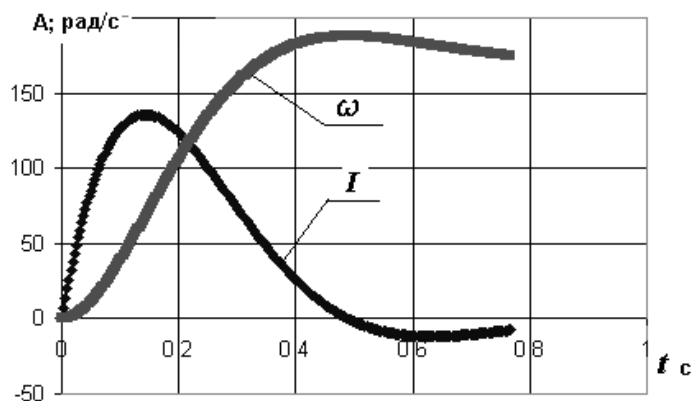


Рис. 4.28. Временные зависимости скорости и тока при пуске двигателя постоянного тока

Определим величину броска тока. Для этого в ячейку F3 вставим функцию МАКС из категории *Статистические*. В меню функции введём диапазон значений тока: B3–B250.

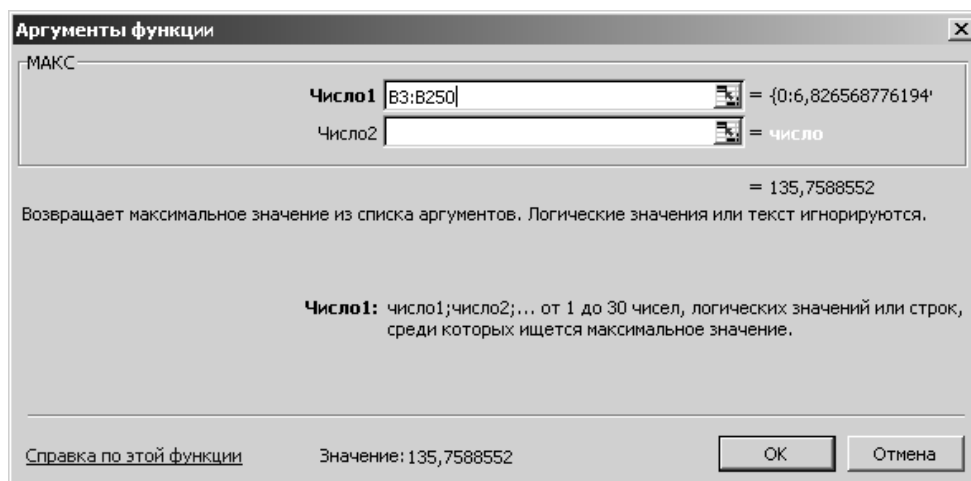


Рис. 4.29. К определению максимума броска тока

В ячейке F3 получим величину броска тока якоря: 135,7589 А (рис. 4.30).

	F3			
	F	G	H	I
3	135,7589			

Рис. 4.30. Максимальное значение броска тока якоря

Определим минимум тока и запишем его в ячейке G3. Для этого воспользуемся функцией МИН из категории *Статистические*. В меню функции выделяем диапазон B3–B250 (рис. 4.31).

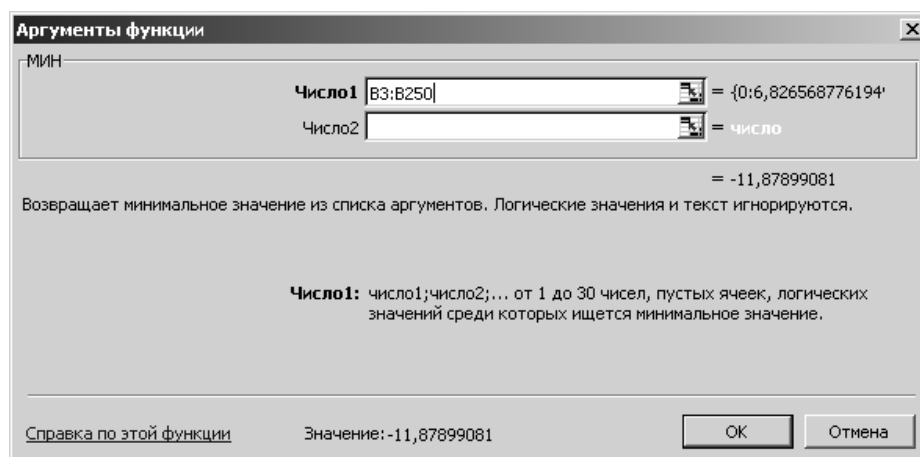


Рис. 4.31. К определению минимума тока

Величина противотока составит –11.879 А (рис. 4.32).

G3		fx =МИН(B3:B250)		
	G	H	I	J
3	-11,879			

Рис. 4.32. Значение минимального тока

Определим перерегулирование по скорости:

$$\Delta\omega \% = \frac{\omega_M - \omega_Y}{\omega_Y} \cdot 100 \%, \quad (4.26)$$

где ω_M – максимальная скорость во время переходного процесса; ω_Y – установившаяся скорость.

Установившаяся скорость в данной задаче равна номинальной $\omega_Y = 157$ рад/с.

Для определения максимальной скорости в ячейку H3 введём функцию МАКС с диапазоном C3–C250 (рис. 4.33).

H3		fx =МАКС(C3:C250)		
	H	I	J	K
3	187,8128			

Рис. 4.33. Значение максимальной скорости

В ячейке I3, согласно (4.26), рассчитаем, что перерегулирование по скорости при пуске ДПТ с НВ составит 19.626 % (рис. 4.34).

I3		fx =100*(H3-157)/157		
	I	J	K	L
3	19,626			

Рис. 4.34. Значение перерегулирования

Таким образом, в данной главе средствами *Excel* рассчитан переходный процесс пуска ДПТ с НВ, определено, что бросок тока и противоток составят, соответственно, 135,7589 А и –11.879 А, перерегулирование составит 19.626 %.

Глава 5

ВИЗУАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРИКЛАДНОМ ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ *MATLAB/SIMULINK*

Пакет расширения Simulink системы MATLAB является ядром интерактивного программного комплекса, предназначенного для *математического моделирования* линейных и нелинейных динамических систем и устройств, представленных своей функциональной блок-схемой, именуемой *S-моделью*, или просто *моделью*.

Пакет *Matlab/Simulink* является библиотекой системы *Matlab* и включает в себя набор стандартных функциональных блоков для моделирования математических моделей различных объектов управления, логических схем, различных преобразований, источников сигналов и отображения выходной информации.

5.1. Операционная среда Simulink

Для запуска программы Simulink необходимо предварительно запустить пакет MATLAB. Рабочий стол системы MATLAB с командным окном показан на рис. 5.1. Там же показана подсказка, появляющаяся в окне при наведении указателя мыши на ярлык Simulink в панели инструментов.

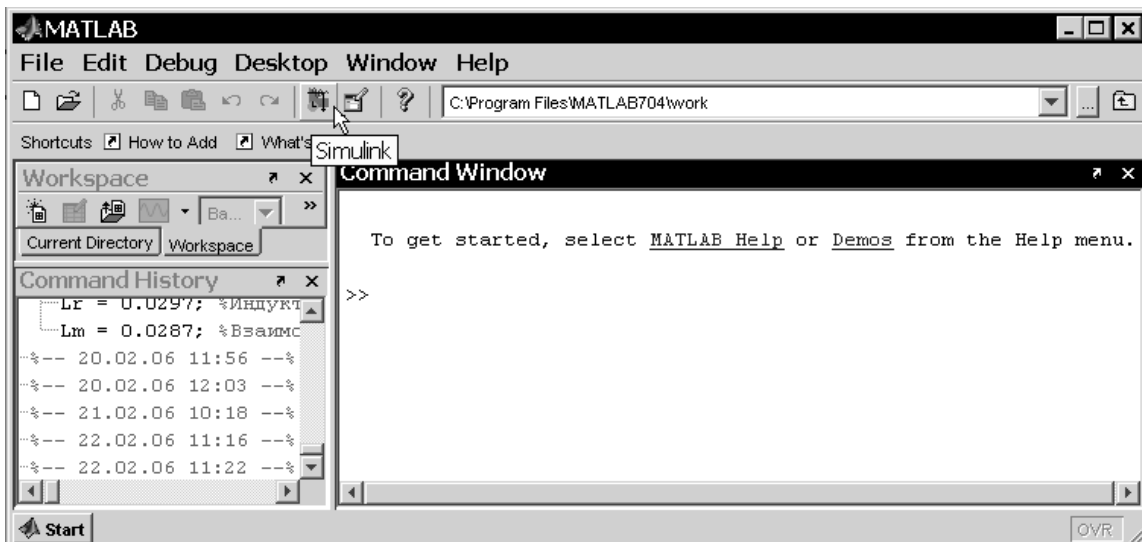



Рис. 5.1. Рабочий стол системы MATLAB

После открытия основного окна программы MATLAB нужно запустить программу Simulink. Это можно сделать одним из трех способов:

- нажать кнопку (**Simulink**) на панели инструментов командного окна MATLAB ;

- в строке командного окна MATLAB напечатать *Simulink* и нажать клавишу **Enter** на клавиатуре;

- выполнить команду **Open...** меню **File** и открыть файл модели (mdl-файл).

Последний способ предпочтителен при запуске уже готовой и отлаженной модели, когда требуется лишь провести моделирование и не нужно добавлять новые блоки в модель. При применении двух первых способов открывается окно обозревателя библиотеки блоков (рис. 5.2).

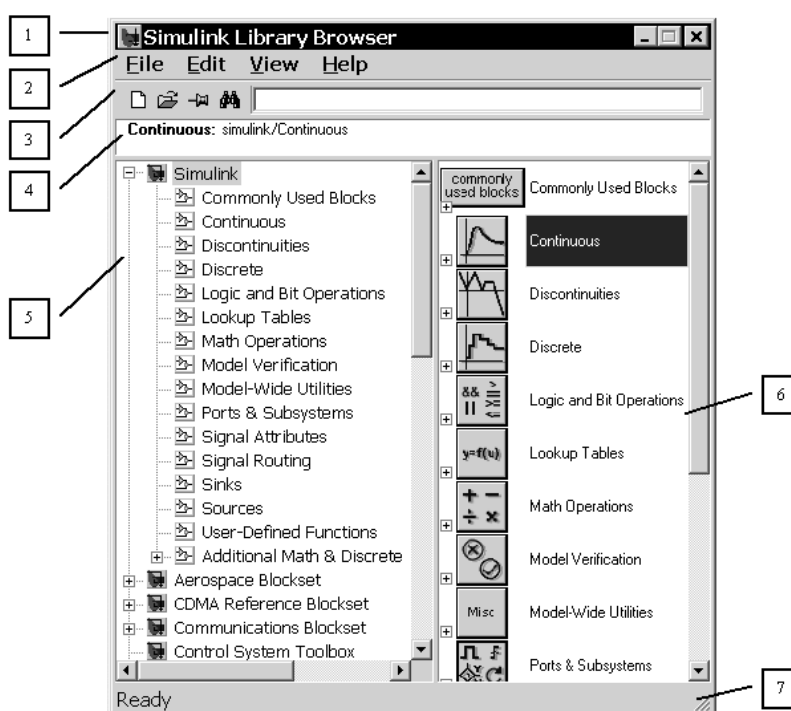


Рис. 5.2. Окно обозревателя блоков библиотеки Simulink

Окно обозревателя библиотеки блоков **Simulink Library Browser** содержит следующие элементы:

1. Заголовок с названием окна – **Simulink Library Browser**.
2. Меню с командами **File**, **Edit**, **View**, **Help**.
3. Панель инструментов с кнопками наиболее часто используемых команд меню.
4. Окно комментария для вывода поясняющего сообщения о выбранном разделе библиотеки или блоке.

5. Список разделов библиотеки.
6. Окно для вывода содержимого раздела библиотеки (список вложенных разделов библиотеки или блоков).
7. Строка состояния, содержащая подсказку по выполняемому действию.

В левой части окна рис. 5.2 выделена основная библиотека *Simulink*, а в правой части показаны ее разделы. Основная библиотека системы Simulink содержит следующие разделы:

- **Commonly Used Blocks** – часто используемые блоки;
- **Continuous** – блоки аналоговых элементов;
- **Discontinuities** – нелинейные блоки;
- **Discrete** – дискретные блоки;
- **Logic and Bit Operations** – блоки логических и битовых операций;
- **Look-Up Tables** – блоки таблиц;
- **Math Operations** – блоки математических операций;
- **Model Verification** – блоки верификации сигналов;
- **Model-Wide Utilities** – раздел вспомогательных утилит;
- **Ports & Subsystems** – порты и подсистемы;
- **Signal Attributes** – блоки получения свойств сигналов;
- **Signal&Routing** – блоки преобразования сигналов и вспомогательные блоки;
- **Sinks** – приемники сигналов;
- **Sources** – источники сигналов;
- **User-defined Function** – функции пользователя;
- **Additional Math & Discrete.**

Список разделов библиотеки Simulink представлен в виде дерева, и правила работы с ним являются общими для списков такого вида: пиктограмма свернутого узла дерева содержит символ «+», а пиктограмма развернутого содержит символ «-».

Для того чтобы развернуть или свернуть узел дерева, достаточно щелкнуть на его пиктограмме левой клавишей мыши.

При выборе соответствующего раздела библиотеки в правой части окна отображается его содержимое (рис. 5.3).

Для работы с окном используются команды, собранные в меню. Меню обозревателя библиотек содержит следующие пункты:

- **File** (Файл) – работа с файлами библиотек;
- **Edit** (Редактирование) – добавление блоков и их поиск (по названию);
- **View** (Вид) – управление показом элементов интерфейса;
- **Help** (Справка) – вывод окна справки по обозревателю библиотек.

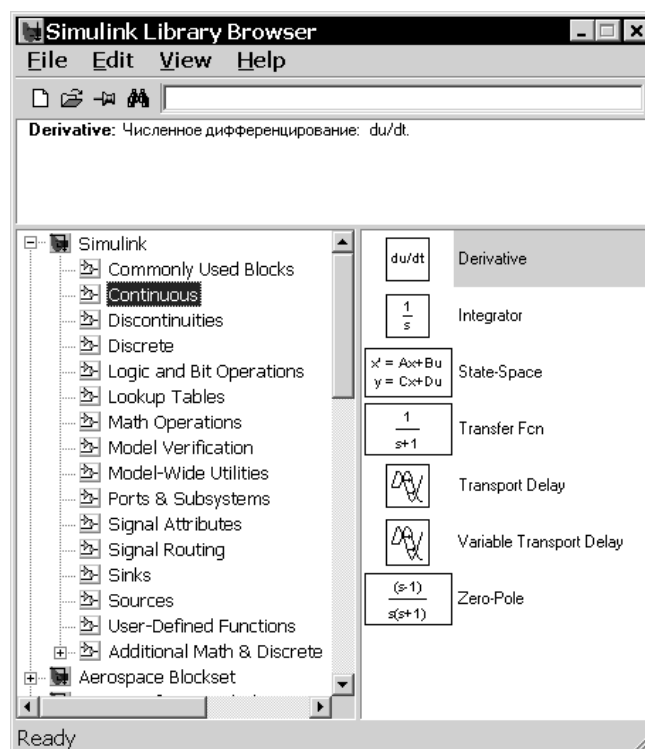


Рис. 5.3. Отображение содержимого библиотеки обозревателем блоков

Для работы с обозревателем можно также использовать кнопки на панели инструментов (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Кнопки панели инструментов обозревателя

Кнопки панели инструментов имеют следующее назначение:

1. Создать новую Simulink-модель (открыть новое окно модели).
2. Открыть одну из существующих S-моделей.
3. Изменить свойство окна обозревателя «всегда сверху». После нажатия на кнопку окно обозревателя будет отображаться поверх других открытых окон.

4. Найти блок, название которого (или первые несколько символов названия) указано в расположенном справа от кнопки текстовом поле. Если требуемый блок найден, в окне обозревателя открывается соответствующий раздел библиотеки, а блок отображается как выбранный, в противном случае в подокне комментария выводится сообщение Not found <имя блока>(Блок <имя> не найден).

5.2. Создание модели

Для создания модели в Simulink необходимо последовательно выполнить ряд действий.

1. Создать новый файл модели можно с помощью команды **File** ⇒ **New** ⇒ **Model**, или используя кнопку на панели инструментов. Вновь созданное окно модели показано на рис. 5.5.

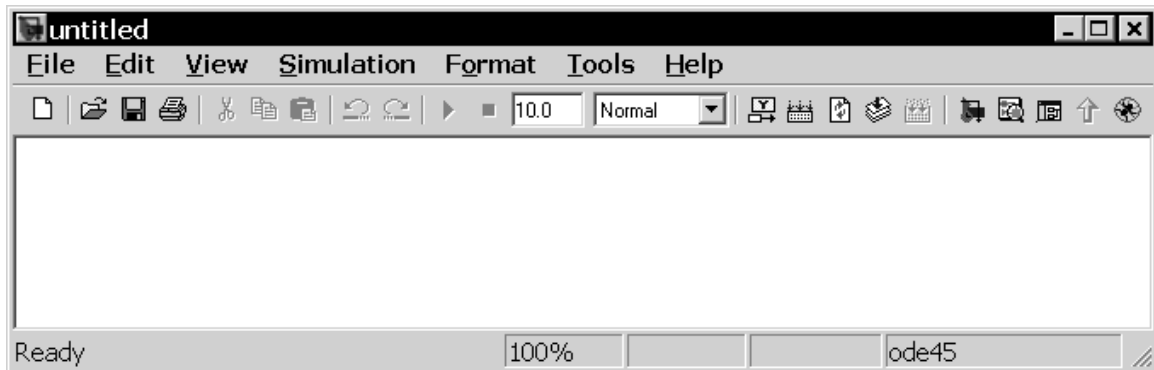


Рис. 5.5. Пустое окно модели

2. Расположить блоки в окне модели. Для этого необходимо открыть соответствующий раздел библиотеки. Далее, указав курсором на требуемый блок и нажав на левую клавишу мыши, «перетащить» блок в созданное окно. Клавишу мыши нужно держать нажатой. На рис. 5.6 показано окно модели, содержащее блоки.

Для удаления блока необходимо выбрать блок (указать курсором на его изображение и нажать левую клавишу мыши), а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре.

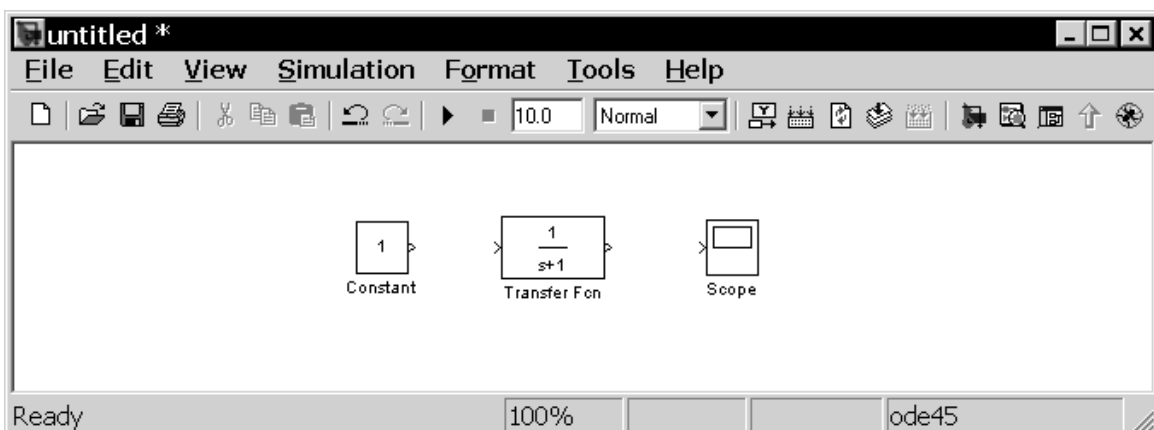


Рис. 5.6. Окно модели с блоками

3. Далее, если это требуется, нужно изменить параметры блока, установленные по умолчанию. Для этого необходимо дважды щелкнуть левой клавишей мыши, указав курсором на изображение блока. Откроется окно редактирования параметров данного блока. При вводе численных параметров следует иметь в виду, что в качестве десятичного разделителя должна использоваться точка, а не запятая. После внесения изменений нужно закрыть окно кнопкой **ОК**. Можно также, не закрывая окна, воспользоваться кнопкой **Apply** для сохранения изменений. На рис. 5.7 в качестве примера показаны блок, моделирующий передаточную функцию, и окно редактирования параметров данного блока.

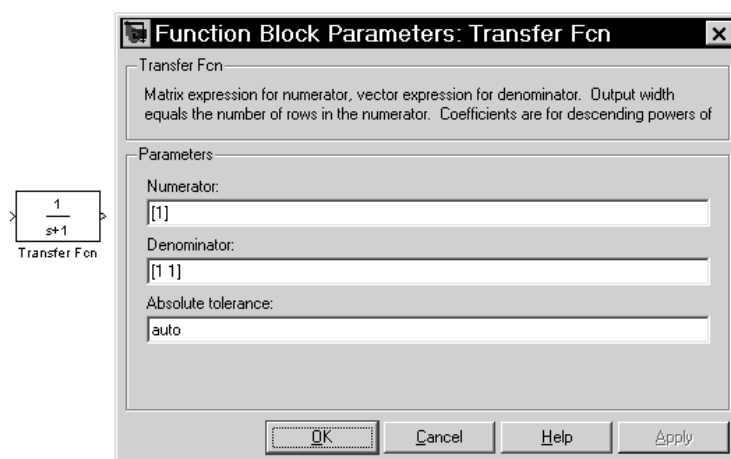


Рис. 5.7. Блок передаточной функции и его окно параметров

4. После установки на схеме всех блоков требуется выполнить соединение элементов схемы. Для этого необходимо указать курсором на «выход» блока, а затем нажать и, не отпуская левую клавишу мыши, провести линию ко входу другого блока. После чего отпустить клавишу. Если соединение не создано, то линия связи будет пунктирной и иметь красный цвет. В случае правильного соединения линия связи будет сплошной. Для создания линии связи можно также выделить блок-источник сигнала, затем нажать клавишу **Ctrl** на клавиатуре и выделить блок-приемник. Для создания точки разветвления в соединительной линии нужно подвести курсор к предполагаемому узлу и, нажав правую клавишу мыши, протянуть линию. Для удаления линии требуется выбрать линию, а затем нажать клавишу **Delete** на клавиатуре. Схема модели, в которой выполнены соединения между блоками, показана на рис. 5.8.

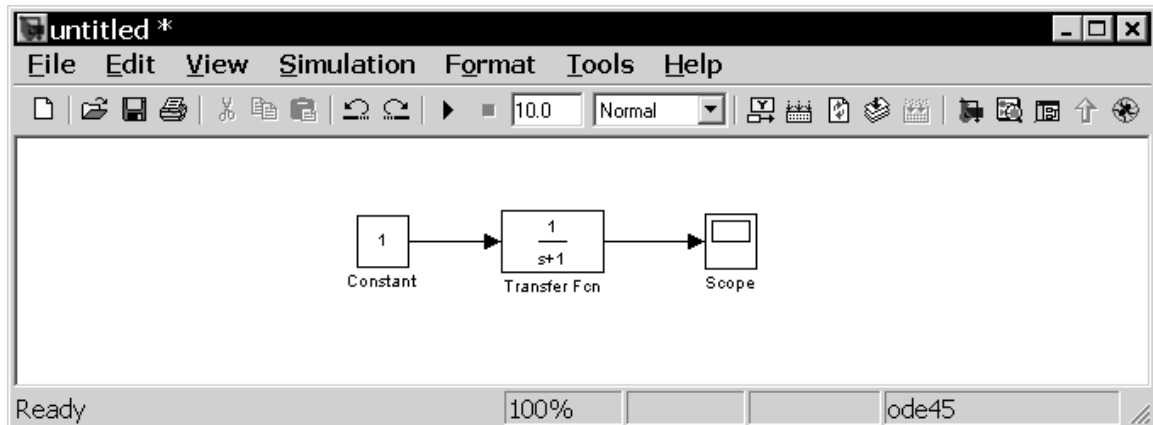


Рис. 5.8. Готовая модель

5. После составления расчетной схемы необходимо сохранить ее в виде файла на диске, выбрав пункт меню **File** ⇒ **Save As...** в окне схемы и указав папку и имя файла. Следует иметь в виду, что имя файла не должно превышать 64 символов, должно начинаться с буквы и содержать только алфавитно-цифровые символы латиницы и знак подчеркивания. Это же требование (за исключением длины названия) относится и к пути файла. При последующем редактировании схемы можно пользоваться пунктом меню **File** ⇒ **Save**. При повторных запусках программы SIMULINK загрузка схемы осуществляется с помощью меню **File** ⇒ **Open...** в окне обозревателя библиотеки или из командного окна системы MATLAB.

5.3. Решение электротехнических задач

Решение электротехнических задач вне зависимости от прикладного программного пакета начинается с математического описания исследуемого объекта. При использовании виртуальных блоков пакета Simulink и его расширений (Blocksets) математическое описание «спрятано». Поэтому студенту необходимо составить структуру объекта и настроить параметры блоков, используемых при моделировании.

Результаты моделирования при этом могут быть представлены в табличном или графическом виде. Рассмотрим применение этой методики на примере моделирования электрической схемы рис. 5.9. Где в качестве исходных данных заданы активные и реактивные параметры схемы, а именно: $L1=50\text{мГн}$, $R1=1\text{ Ом}$, $C1=10\text{мкФ}$, $L2=5\text{ мГн}$.

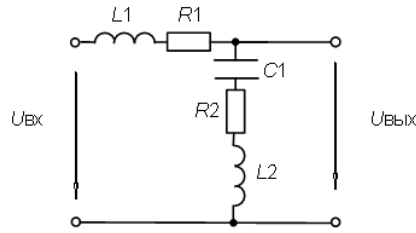


Рис. 5.9. Электрическая схема фильтра

На этапе подготовки модели, на рабочее поле из библиотеки блоков **SimPowerSystems / Elements / Series RLC Branch**, размещают последовательные R-L-C цепочки (рис. 5.10).

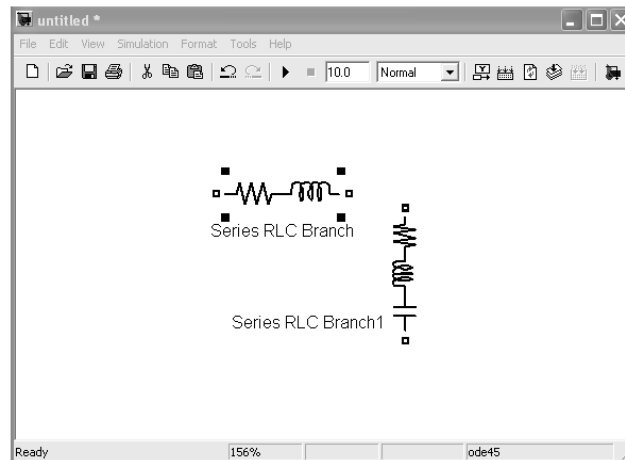


Рис. 5.10. Рабочее поле на этапе подготовки модели

При этом если необходимо исключить какой-либо элемент из цепочки, то нужно в окне задания параметров установить «inf» (бесконечность) для исключения емкости и «0» для исключения сопротивления и индуктивности (рис. 5.11).

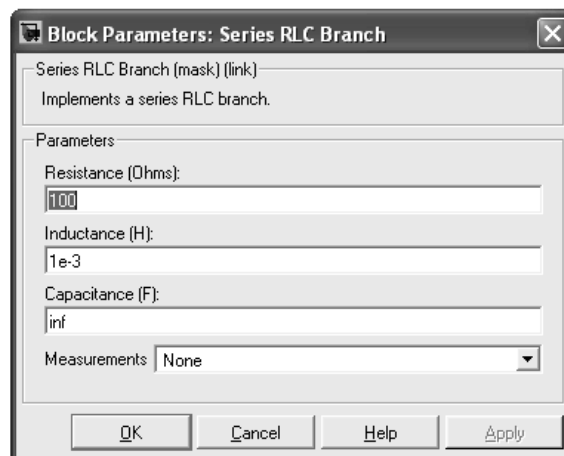


Рис. 5.12. Настройка параметров

Затем подключают к схеме источник переменного напряжения, который находится в библиотеке **SimPowerSystems / Electrical Sources / AC Voltage Sources** и собирают схему (рис. 5.13). При этом устанавливают параметры источника питания (рис. 5.14) .

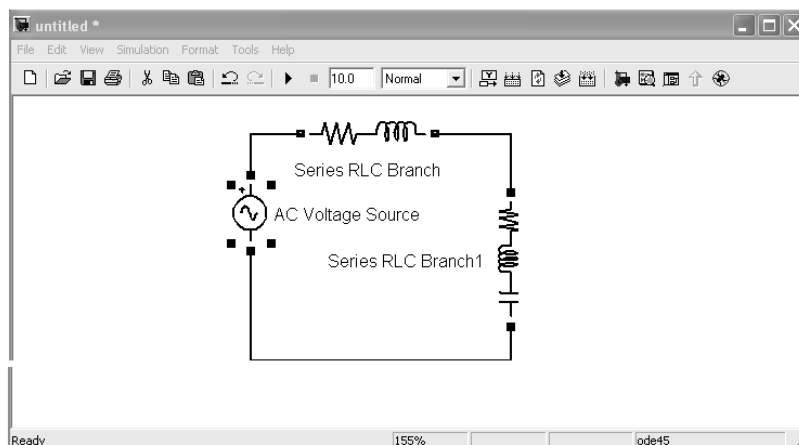


Рис. 5.13. Модель исследуемой схемы

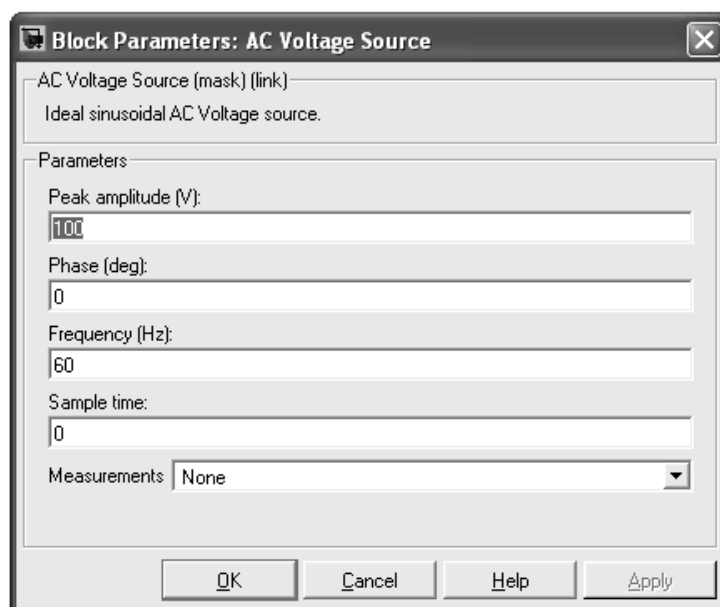


Рис. 5.14. Блок настройки параметров источника

Для визуализации процессов, протекающих в схеме нужно к вольтметру подсоединить осциллограф, который находится в библиотеке **Simulink / Sinks / Scope** (рис. 5.15). Реальная электрическая схема работает на нагрузку, поэтому подключают к выходу схемы активную нагрузку и снимаем графики процессов.

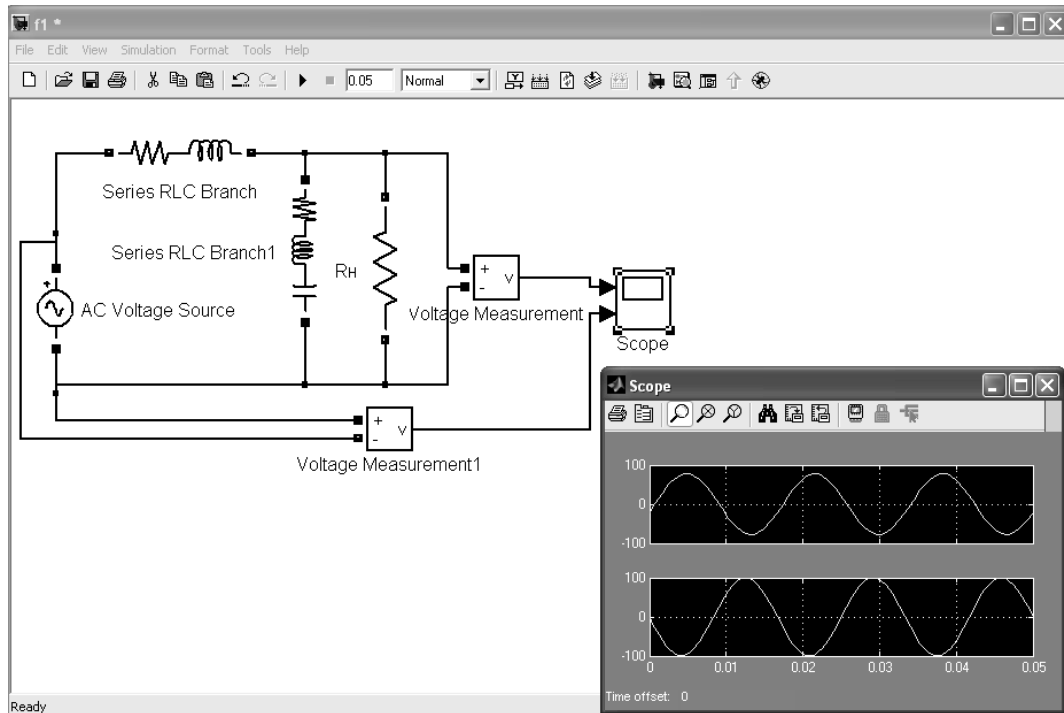


Рис. 5.15. Осциллограммы входного и выходного напряжений

Для исследования переходных процессов во временной области на рис. 5.16 показана схема с использованием параллельного колебательно-го контура и осциллограмма переходного процесса. На схеме представлен источник переменного напряжения амплитудой 100 В и частотой 50 Гц подключается к цепи с параметрами: $R = 0.1 \text{ Ом}$, $L = 0.1 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}$ и $C = 0.01 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}$.

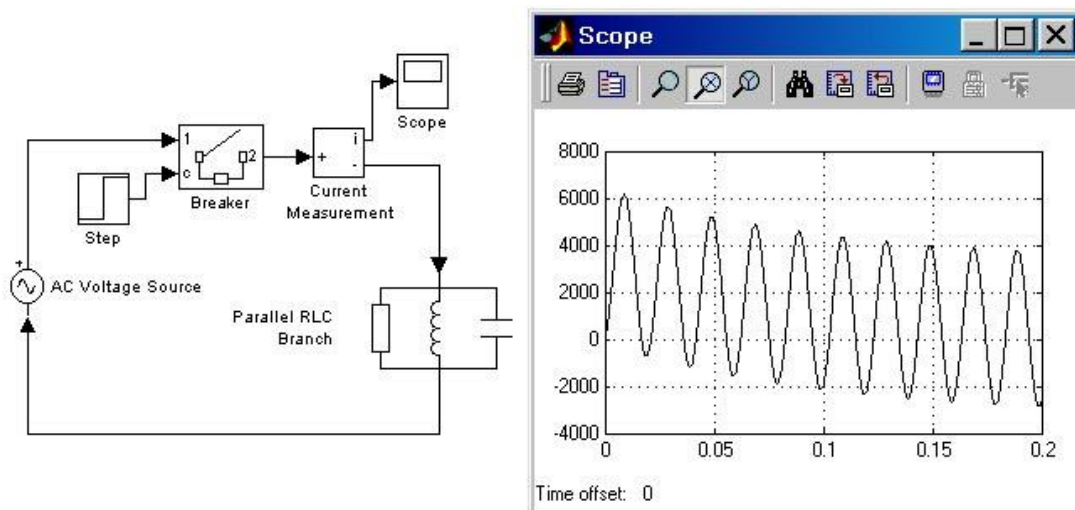


Рис. 5.16. Схема для исследования переходного процесса в RLC-цепи

5.4. Исследование электротехнических устройств

Одной из основных задач при исследовании электротехнических устройств является получение детальной количественной информации о процессах, происходящих в устройстве. Все электротехнические устройства по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению можно разделить на три большие группы, а именно:

- источники энергии – устройства, вырабатывающие электрический ток;
- приемники – устройства, потребляющие электрический ток;
- проводники, а также различная коммутационная аппаратура (выключатели, реле, контакторы и т.д.).

При исследовании процессов в отдельно взятых устройствах и их совокупности, объединенной в электрическую цепь, прибегают к их эквивалентным схемам замещения. Когда реальную электрическую цепь, представляют в виде совокупности идеализированных схемных элементов, и называют *схемой замещения электрической цепи* или электротехнического устройства.

Схемы замещения отдельных электротехнических устройств в пакете Simulink и его расширений (Blocksets) представляют в виде отношения изображений по Лапласу выходных координат к изображению входных координат. Объектом исследования, при таком подходе, является передаточная функция, которая задается с помощью звена **Transfer Fcn** из библиотеки **Simulink / Continuous**.

Поэтому рассмотрим вывод передаточной функции для электрической схемы, представленной на рис. 5.9.

5.4.1. Вывод передаточных функций электрической схемы

Для заданной принципиальной схемы (рис. 5.9), по второму закону Кирхгофа запишем дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} U_{\text{ВХ}}(t) = L_1 \cdot \frac{di(t)}{dt} + i(t) \cdot R_1 + U_{\text{ВЫХ}}(t); \\ U_{\text{ВЫХ}}(t) = \frac{1}{C_1} \cdot \int i(t) \cdot dt + i(t) \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{di(t)}{dt}. \end{cases} \quad (5.1)$$

Дифференцируя второе уравнение системы дифференциальных уравнений (5.1) получим:

$$\begin{cases} U_{\text{ВХ}}(t) = L_1 \cdot \frac{di(t)}{dt} + i(t) \cdot R_1 + U_{\text{ВЫХ}}(t); \\ \frac{dU_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} = \frac{1}{C_1} \cdot i(t) + \frac{di(t)}{dt} \cdot R_2 + L_2 \cdot \frac{d^2i(t)}{dt^2}. \end{cases} \quad (5.2)$$

Передаточная функция – это отношение изображения по Лапласу выходной координаты к изображению входной [2, 14]. Чтобы получить передаточную функцию, необходимо перейти от временной формы записи дифференциальных уравнений к операторной форме. Данное преобразование называется преобразованием Лапласа, при котором в искомом дифференциальном уравнении делается замена $\frac{d}{dt} \Rightarrow p$.

После преобразования Лапласа система уравнений выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} U_{\text{ВХ}}(p) = L_1 \cdot p \cdot i(p) + i(p) \cdot R_1 + U_{\text{ВЫХ}}(p); \\ p \cdot U_{\text{ВЫХ}}(p) = \frac{1}{C_1} \cdot i(p) + i(p) \cdot R_2 \cdot p + L_2 \cdot p^2 \cdot i(p). \end{cases} \quad (5.3)$$

Выразим из второго уравнения системы (5.3) значение $i(p)$ и подставим в первое уравнение. После несложных преобразований получим передаточную функцию заданной схемы:

$$W(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = \frac{L_2 \cdot C_1 \cdot p^2 + R_2 \cdot C_1 \cdot p + 1}{(L_1 \cdot C_1 + L_2 \cdot C_1) \cdot p^2 + (R_1 \cdot C_1 + R_2 \cdot C_1) \cdot p + 1}. \quad (5.4)$$

Введем обозначения $T_1^2 = L_2 \cdot C_1$, $T_2 = R_2 \cdot C_1$, $T_3^2 = L_1 \cdot C_1$, $T_4 = R_1 \cdot C_1$ – постоянные времени электрической цепи.

$$W(p) = \frac{T_1^2 \cdot p^2 + T_2 \cdot p + 1}{(T_3^2 + T_1^2) \cdot p^2 + (T_4 + T_2) \cdot p + 1}. \quad (5.5)$$

Используя передаточную функцию (5.5) составляется структурная схема (рис. 5.17).

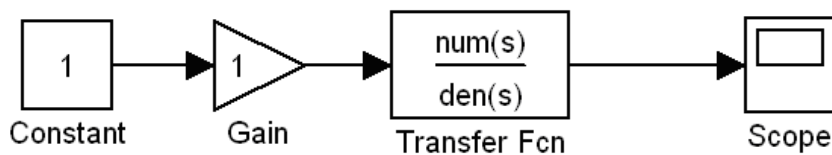


Рис. 5.17. Структурная схема

Объектом исследования, в данном случае, является передаточная функция, которая задается с помощью звена **Transfer Fcn** из библиотеки **Simulink/Continuous**. Входное воздействие на передаточную функцию подается с помощью элемента **Constant** из библиотеки **Simulink / Commonly Used Blocks**, а выходной сигнал регистрируется осциллографом **Simulink / Sinks / Scope**.

Коэффициенты числителя следует вводить в поле **Numerator**, (**num(s)**) начиная с коэффициента при старшей производной. Аналогично заполняется поле знаменателя передаточной функции **Denominator**, (**den(s)**).

Переходная характеристика – это реакция системы на единичное входное воздействие, приведена на (рис. 5.18) в виде осциллограммы на осциллографе.

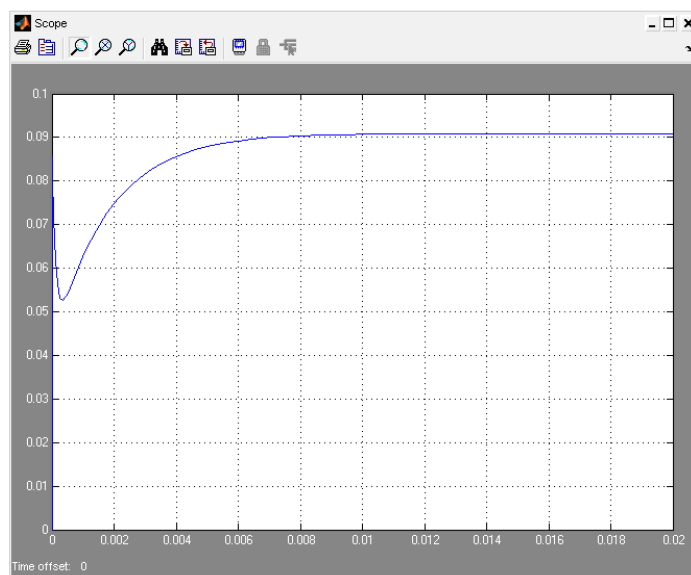


Рис. 5.18. Осциллограмма переходной характеристики

При построении переходного процесса существенно влияет на результат выбор численного метода расчета (**Solver**), шага расчета (**Relative tolerance**), начального и конечного значения времени переходного процесса (**Start time, Stop time**). Рекомендуется устанавливать параметры как указано на рис. 5.19.

Наличие передаточной функции позволяет определить частотные характеристики, исследуемой схемы электротехнической установки. В качестве частотных характеристик при проектировании и исследовании процессов в электротехнических установках пользуются достаточно часто амплитудно-частотными и фазо-частотными характеристиками [1, 3, 4].

Сущность метода частотных характеристик заключается в том, что на вход исследуемой системы подается гармонический сигнал (сину-

социальные колебания) в широком диапазоне частот. Реакция системы при разных частотах позволяет судить о ее динамических свойствах.

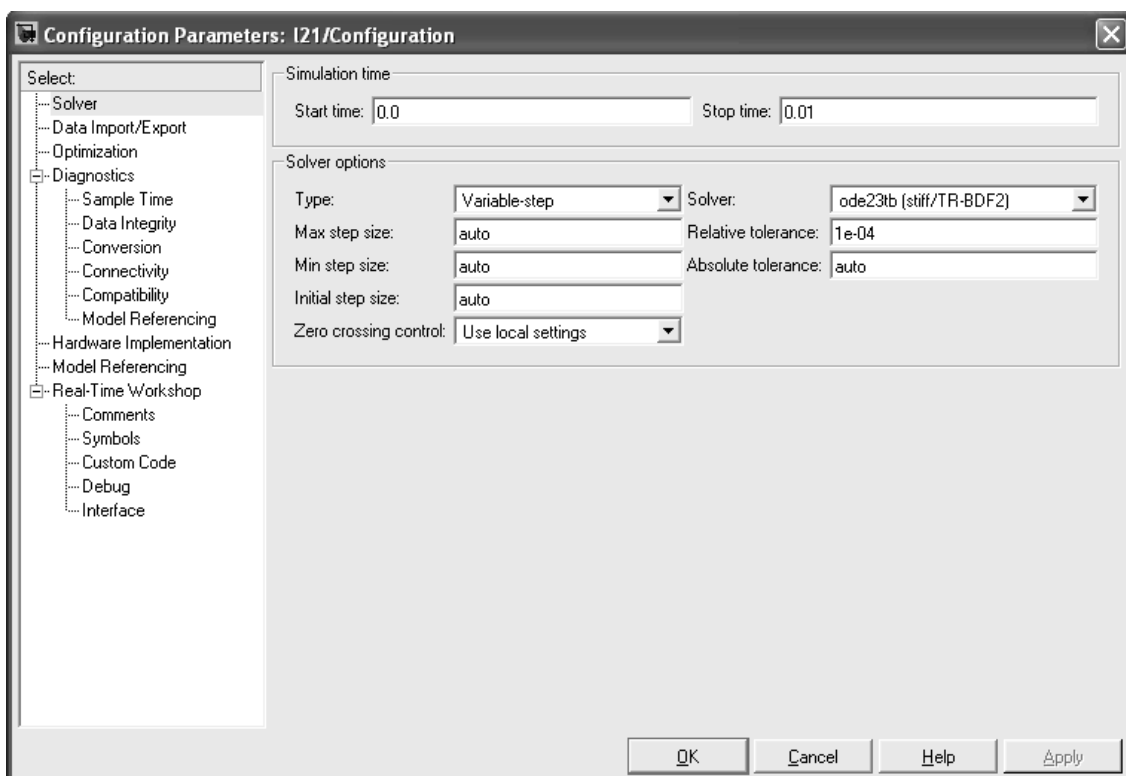


Рис. 5.19. Блок выбора численного метода расчета переходной характеристики

Формально для получения частотных характеристик необходимо иметь частотную передаточную функцию. Для этого в передаточной функции $W(p)$ осуществляют подстановку $p \Rightarrow j\omega$, и тогда, полученная функция $W(j\omega)$ является комплексным выражением, которое можно представить в виде:

$$W(j\omega) = \frac{T1 \cdot (j\omega)^2 + T2 \cdot (j\omega) + 1}{(j\omega)^2 \cdot (T3 + T1) + (j\omega) \cdot (T4 + T2) + 1}. \quad (5.6)$$

Чтобы построить частотные характеристики, нужно задать вход и выход передаточной функции с помощью команды «**Linear Analysis**»/«**Input Point**» и «**Linear Analysis**»/«**Output Point**» из выпадающего меню, при щелчке правой кнопки на входе и выходе передаточной функции.

После назначения входа и выхода передаточной функции модель принимает вид, изображены на рис. 5.20.

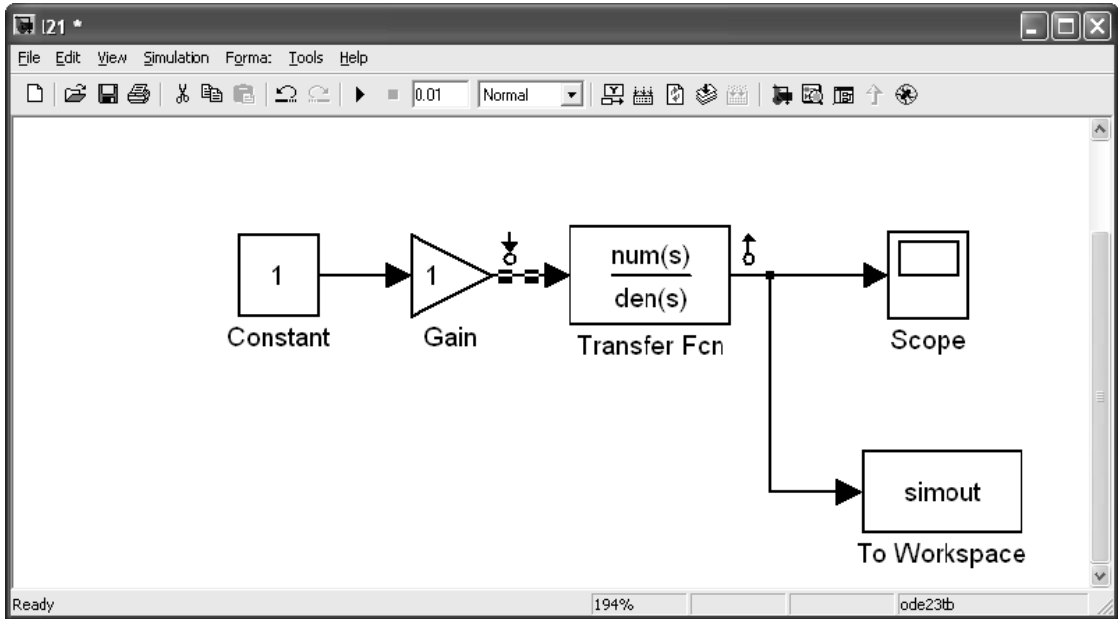


Рис. 5.20. Модель для построения частотных характеристик

Для построения частотных характеристик открывают окно настройки «**Control and Estimation Tools Manager**» и выбирают «**Bode Response Plot**» и нажимают на «**Linearize Model**». Блок настройки приведен на рис. 5.21.

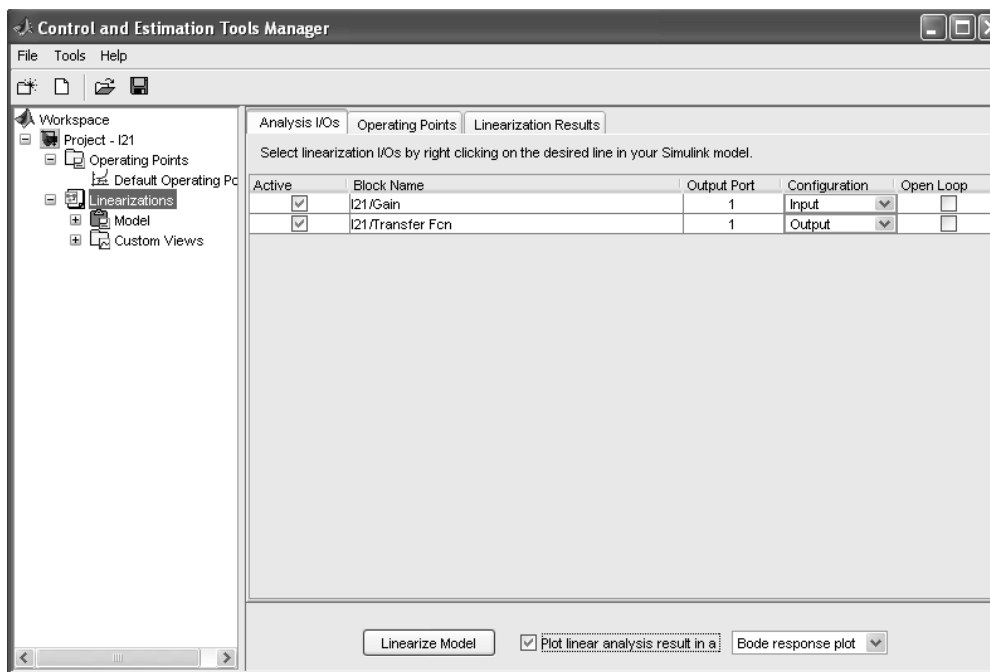


Рис. 5.21. Блок настройки для построения частотных характеристик

В окне построения графика (рис. 5.22) можно наблюдать в верхней части

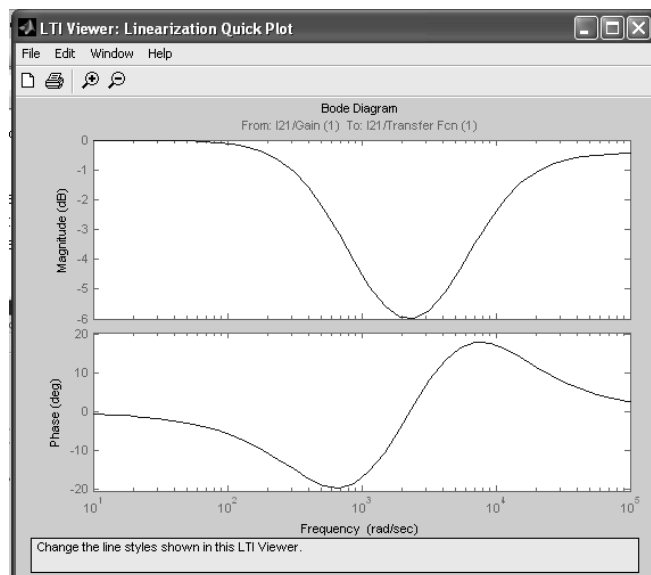


Рис. 5.22. Амплитудно-частотная и фазовая частотная характеристики

После выполнения команд «**File\Print to Figure**» и «**Edit\Copy Figure**» можно отправить графики частотных характеристик в буфер обмена для дальнейшей обработки в графическом редакторе.

Глава 6

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОЛЕВЫХ ЗАДАЧ В ПРОГРАММЕ «ELCUT»

ELCUT – это современный комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов.

ELCUT это полноценное Windows приложение, которое было разработано специально для этой платформы и полностью использует все преимущества современных компьютеров.

Для применения пакета ELCUT его нужно установить на персональный компьютер. Пакет ELCUT в студенческом варианте распространяется бесплатно. Его можно скачать на сайте производителя: <http://www.tor.ru/elcut/>

6.1. Применение

ELCUT широко используется в научных исследованиях, в промышленности и образовании.

Академические и прикладные научные центры используют его при моделировании полей для изучения разнообразных физических процессов, а также для разработки приборов и устройств, применяемых в научных исследованиях.

Моделируемые в ELCUT физические задачи, связанные с электромагнитными полями, электрическими токами, температурными полями, упругими напряжениями и деформациями – сегодня возникают в самых различных направлениях научных исследований.

Промышленные предприятия все шире обращаются к конечно элементному моделированию для улучшения качества проектирования и ускорения разработки новых устройств, уменьшению цикла разработки и повышения конкурентоспособности своей продукции.

На электромашиностроительных заводах ELCUT применяют для расчета электромагнитных параметров и тепловых режимов электрических машин. Необходимость в анализе поля возникает при расчёте для оптимизации существующих машин, либо при расчёте машин нетрадиционных конструкций. Анализ электрического поля в высоковольтных вводах, обмотках, изоляционных системах используется при проектировании силовых трансформаторов и других высоковольтных аппаратов.

Тепловые расчеты с помощью ELCUT успешно используют при проектировании систем обогрева с помощью нагреваемых кабелей, специализированных и комбинированных систем контроля температуры, вентилируемых фасадов, ограждающих конструкций в строительстве и архитектурном проектировании.

Повышенное внимание к электромагнитной экологии стимулирует использование ELCUT в задачах электромагнитного экранирования жилых и производственных помещений и электромагнитной совместимости.

В образовании ELCUT используется как эффективное средство при подготовке инженеров. Он широко входит в практику преподавания физики, электротехники, прикладных дисциплин во многих высших учебных заведениях России и стран СНГ. Особенно целесообразно использовать ELCUT при изучении раздела теории поля в дисциплине теоретических основ электротехники (ТОЭ), при расчете полевых задач в электрических машинах, изоляции, электротехнологий, электропривода, энергообеспечения предприятий, электромеханики и в системах автоматизированного проектирования (САПР).

6.2. Основные принципы работы

1. Установка ELCUT

Профессиональная версия *ELCUT*, а также Студенческая версия, распространяемая на компакт-диске, содержит программу автозапуска *Autorun.exe*.

Вставьте компакт-диск "ELCUT" в устройство для чтения компакт-дисков. Если, вследствие настроек компьютера, не запустится программа автозапуска, запустите файл *Autorun.exe*, находящийся в корневом каталоге компакт-диска.

Студенческая версия *ELCUT*, свободно загружаемая с сайта www.elcut.ru, не содержит программы автозапуска. В этом случае для установки ELCUT распакуйте полученный архив во временную папку на вашем жестком диске, например, *C:\Temp\Elcut*, сохраняя структуру внутренних папок архива. Затем найдите во временной папке программу установки *setup.exe* и запустите её.

2. Работа с меню

После запуска программы появляется рабочий экран, в верхней части которого расположены главное меню и кнопки, позволяющие ускорить работу (рис. 6.1). Слева от рабочего окна расположена задача, которая была активной на момент последнего закрытия программы 1. В правой части экрана находится справочная панель б, или лучше сказать, панель с подсказками, которая сопровождает нас в течение всего

времени работы с системой, автоматически вводя нужный раздел справки. При желании ее можно закрыть, щелкнув по крестику расположенному в правом верхнем углу. Кнопка 2 позволяет приступить к созданию новой задачи. Кнопка 3 позволяет открыть модель и провести с ней редактирование. Кнопка 4 включает решатель программы для решения задачи. Кнопка 5 позволяет просмотреть результат решения задачи.

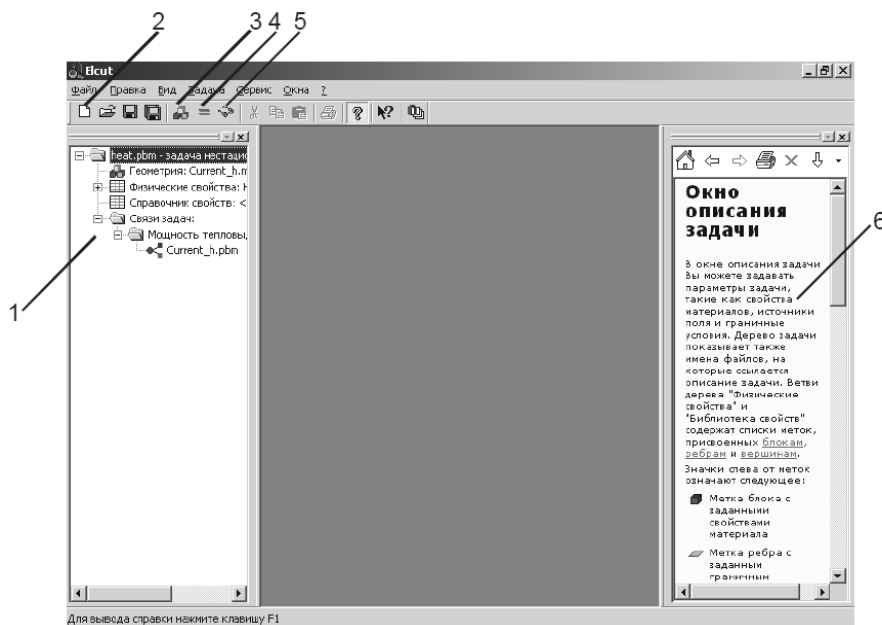


Рис. 6.1. Рабочий экран ELCUT

В подсказках всегда можно найти много полезной информации. Если вы выключили справку, то вернуть ее обратно можно с помощью клавиш **Ctrl+F1**, или нажатием кнопки на панели инструментов.

Главное меню содержит подменю: **Файл, Правка, Вид, Задача, Сервис, Окна** и «?». Каждое подменю имеет соответствующие пункты.

Если в конце названия пункта меню имеется многоточие, то это означает, что за ним следует окно диалога, предназначенное для запроса дополнительной информации. Выбор пункта меню осуществляется с помощью мыши или «горячих» клавиш. Сочетание «горячих» клавиш и их назначение приводится в виде подсказки в меню.

Используя *ELCUT*, вы работаете с разными типами документов: задачи, геометрические модели, библиотеки свойств материалов и др. Каждый документ открывается в своём отдельном окне внутри главного окна *ELCUT*. На рис. 6.2 в качестве примера приведена картина магнитного поля электромагнитного устройства, полученного в результате решения с помощью прикладной программы *ELCUT*.

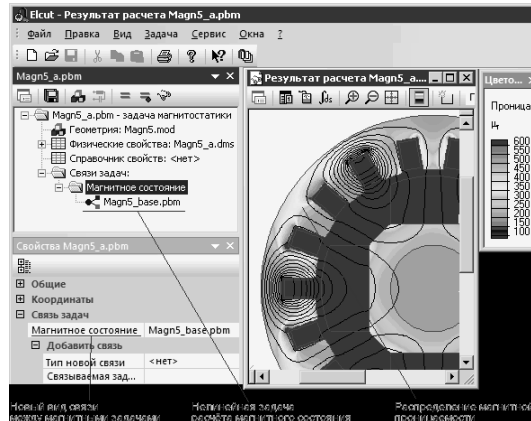


Рис. 6.2. Результат расчета магнитного поля

Алгоритм (последовательность шагов) при решении новой задачи в *ELCUT* можно представить в виде блок-схемы рис. 6.3.



Рис. 6.3. Алгоритм разработки пользовательской программы

3. Этапы решения задачи.

В соответствии с алгоритмом разработки пользовательской программы в *ELCUT* на первом этапе необходимо *определить исходные данные новой задачи*. Для этого задачу нужно сформулировать.

Рассмотрим этот процесс на примере двухпроводной линии (рис. 6.4).

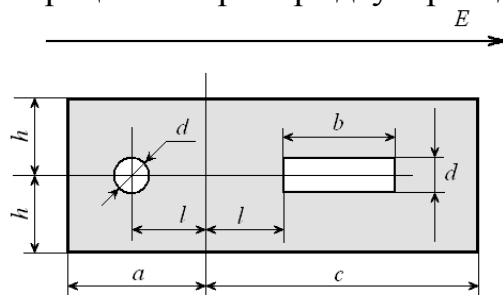


Рис. 6.4. Двухпроводная линия в диэлектрике

В этой линии один проводник имеет круглое сечение другой прямоугольное. Линия находится внутри диэлектрика прямоугольного сечения, и вся эта конструкция находится в воздушном пространстве в электрическом поле с напряженностью E . Направление силовых линий внешнего поля слева на право.

Заданы исходные данные:

- Геометрические размеры проводников $d = 1$ см, $b = 3$ см, $l = 2,5$ см, $a = 5$ см, $c = 8$ см, $h = 2,5$ см.
- Относительная диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon = 1$.
- Относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика $\epsilon = 4$.
- Напряженность поля $E = 5$ кВ/м.

Определяется конечный результат решения. «*Требуется построить картину поля*».

На втором этапе необходимо *создать новую задачу*. Для этого запускают программу *ELCUT* и после щелчка мыши по пунктам **Файл/Создать...** (или щелкнув по кнопке 2) появляется окно (рис. 6.5), в котором следует выбрать соответствующее поле. Некоторые поля могут быть в данный момент недоступны, тогда они выделяются серым цветом. В появившемся окне *Новый документ* выбрать пункт *Задача ELCUT* и нажать кнопку *ОК*. В более поздних версиях при аналогичных действиях появляется окно (рис 6.6).

В окне *Создание задачи* ввести имя файла задачи в соответствующей строке (рис. 6.6). Данное окно позволяет определить место хранения файла новой задачи. После того как место хранения новой задачи определено, щелкните указателем мыши по кнопке **Далее**>.

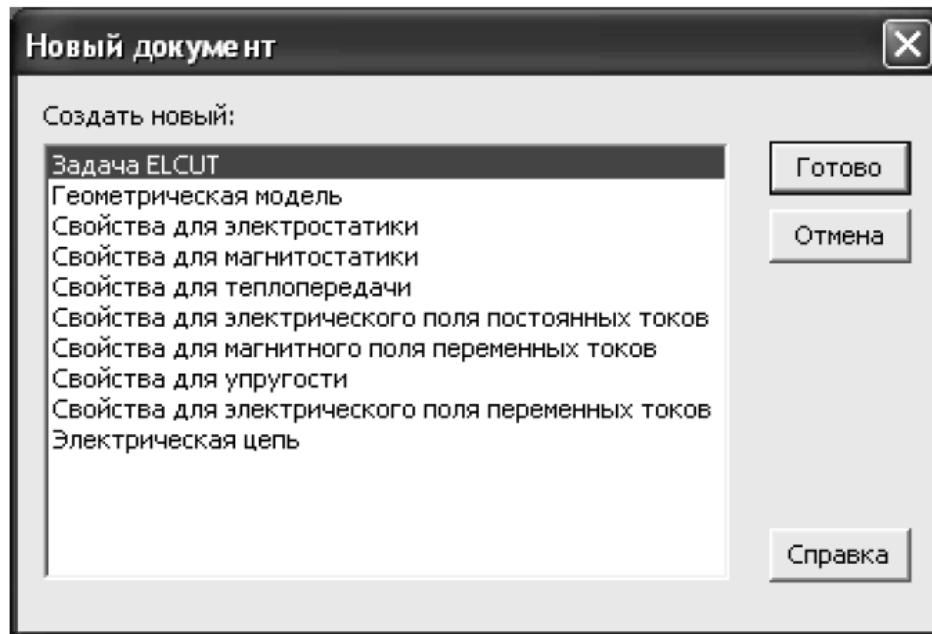


Рис. 6.5. Пример окна диалога

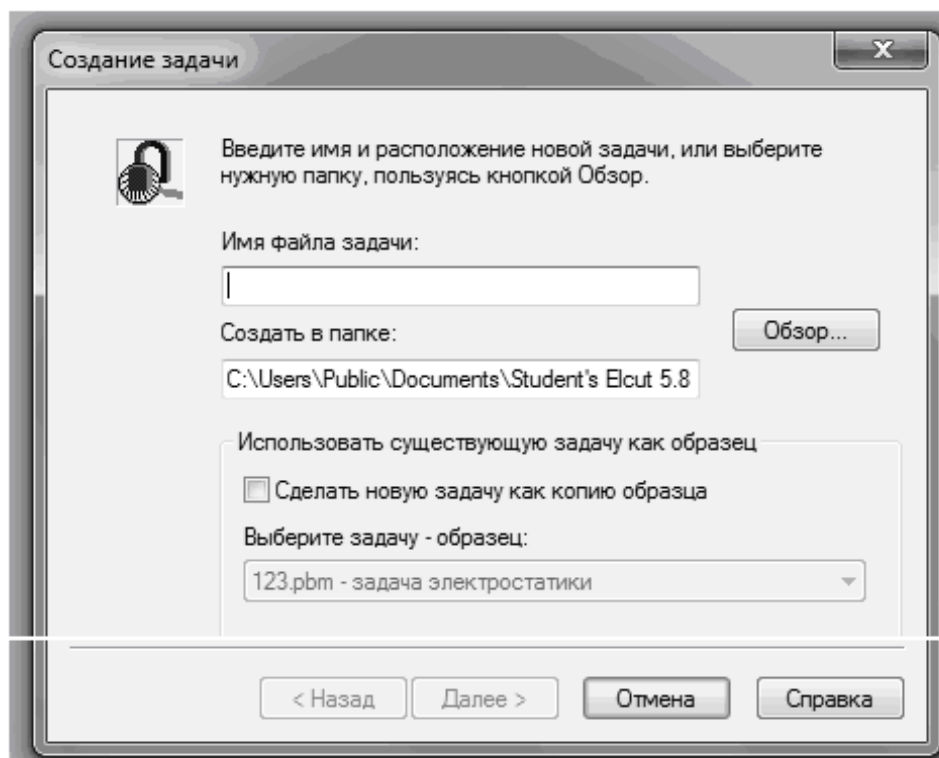


Рис. 6.6. Создание задачи

При необходимости изменения месторасположения новой задачи производится щелчком указателя мыши по кнопке **Обзор**. После чего появится новая форма **Создание новой задачи** (рис. 6.7), которое позволяет определить новое месторасположение файла и при необходимости его можно переименовать. Основной файл задачи имеет расширение *pbm*.

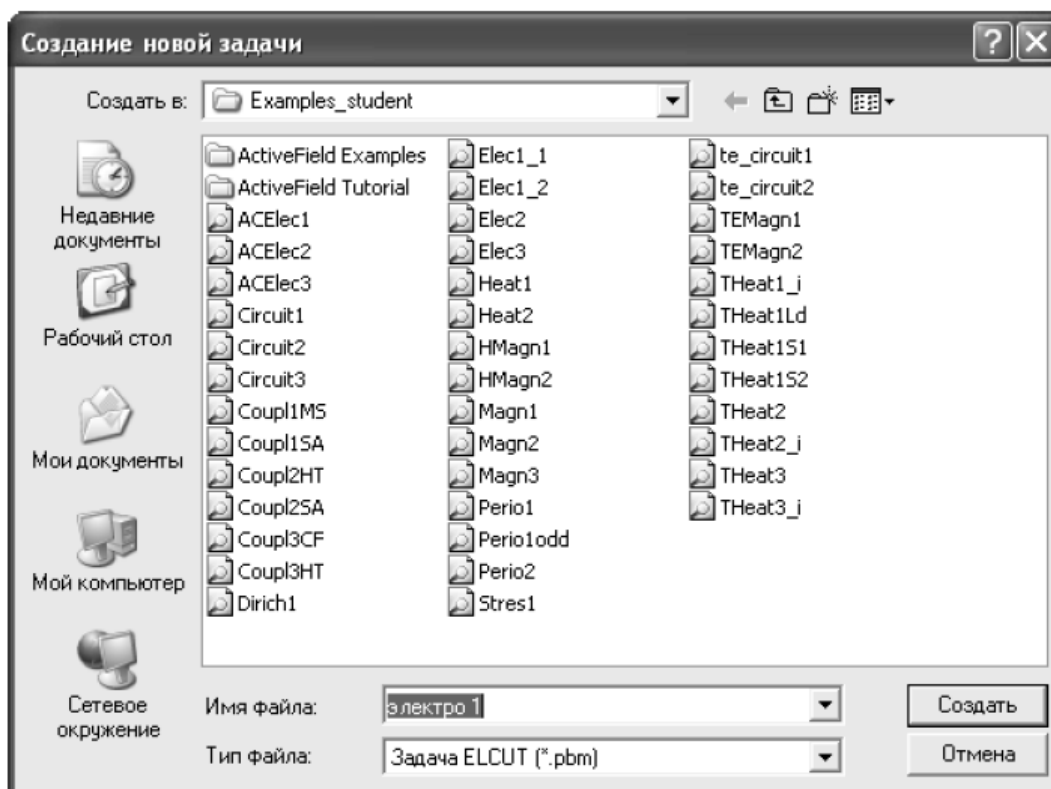


Рис. 6.7. Окно для сохранения файла задачи

После нажать кнопку *Далее*. В следующем окне выбрать тип задачи ,например, *Электростатическое поле*, класс модели *плоская* и параметр расчета *обычный* (рис. 6.8). После ввода этих данных при нажатии **Далее**>. ELCUT запрашивает информацию о единицах измерения и координатах (рис. 6.9). Единицы представлены диапазоном от микронов до километров. Работая со студенческой версией ELCUT лучше выбрать миллиметры, т.к. данная версия позволяет ставить только 200 узлов сетки конечных элементов. После щелчка по кнопке **Готово**, задача будет выведена в левую часть рабочего экрана ELCUT. После появления окна с «деревом» задачи (рис. 6.10) рекомендуется сразу сохранить созданное описание новой задачи. Для этого нужно пройти меню **Файл/Сохранить все файлы задачи**.

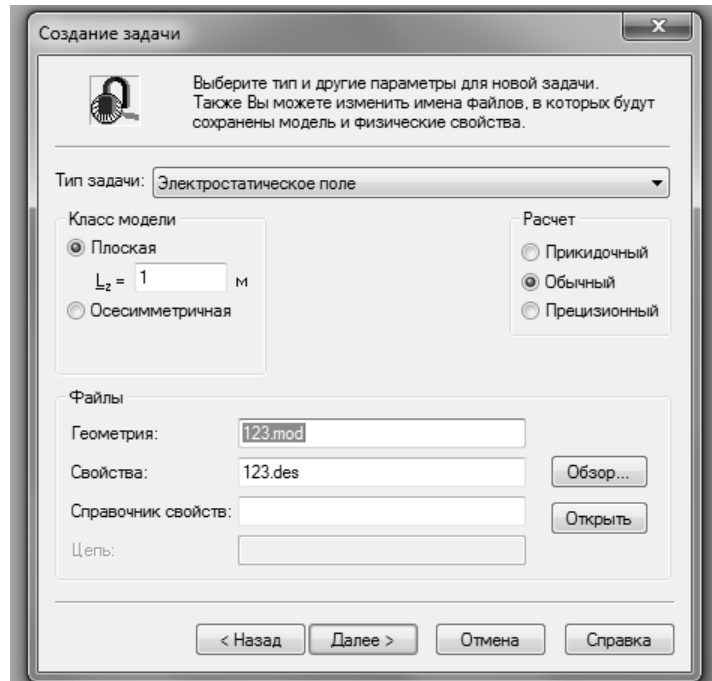


Рис. 6.8. Выбор типа задачи

ELCUT запишет файл с расширением **pbm** в выбранное ранее место на диске или другом носителе.

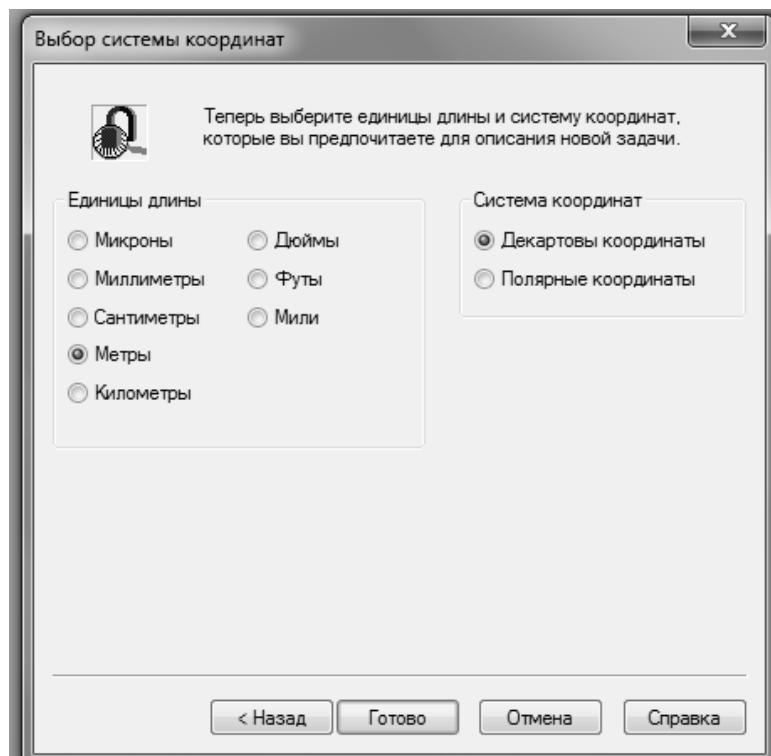


Рис 6.9. Выбор единиц длины и системы координат

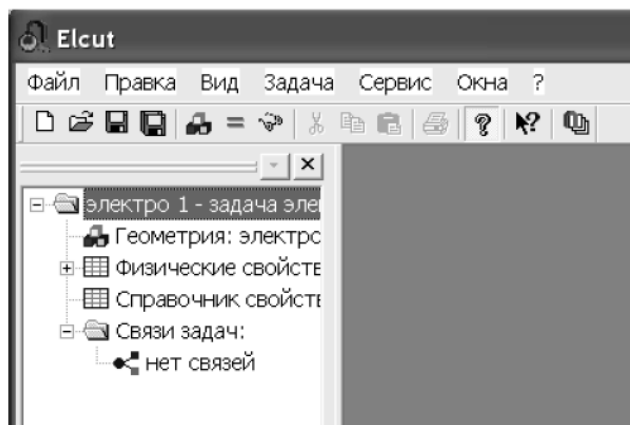


Рис. 6.10. Окно с «деревом» задачи

Третий этап – этап создания модели. Создание модели начинается с описания геометрии конструкции возбуждающей поле. Для этого нужно правой кнопкой мыши щелкнуть по полю **Геометрия** в дереве задачи в раскрывшемся меню выбрать **Открыть** (рис. 6.11).

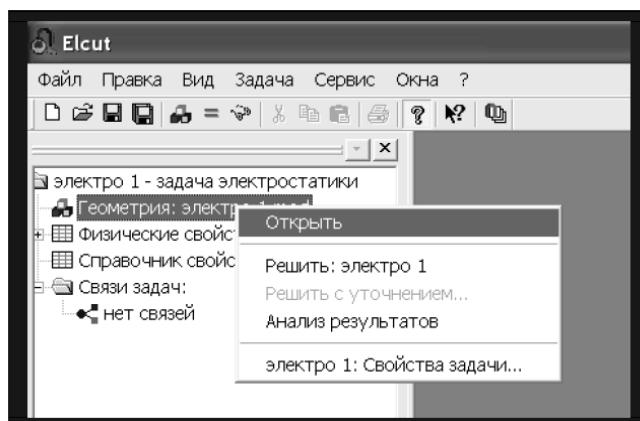


Рис .6.11. Описание геометрии модели

Поскольку файла «электро1.mod» еще нет, то появится окно с соответствующим сообщением (рис. 6.12).

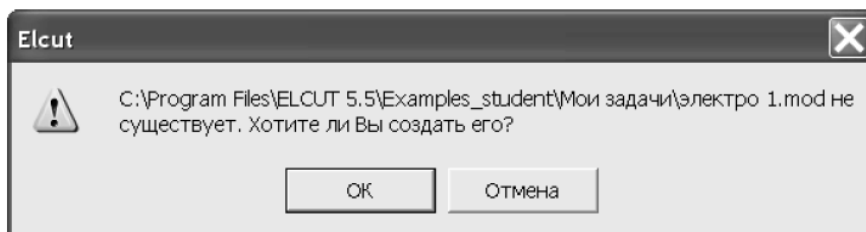


Рис. 6.12. Окно диалога

В данном случае следует щелкнуть по кнопке **ОК**. После чего откроется окно работы с моделью. Для большего удобства Вы можете развернуть его на весь экран (рис. 6.13).

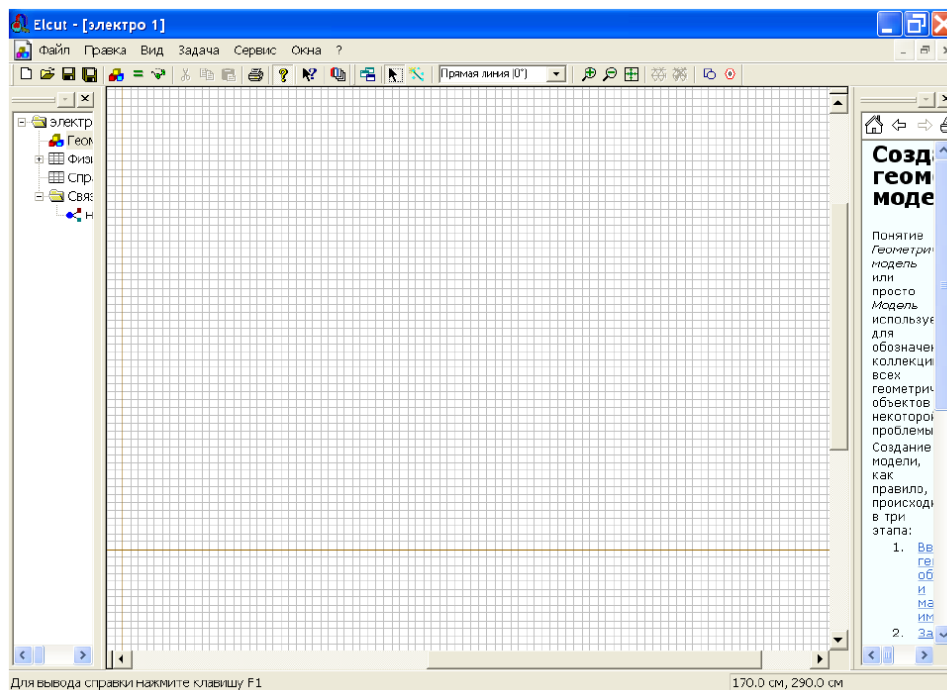


Рис. 6.13. Меню и окно работы с моделью

После того как создано поле для геометрического представления модели, следует приступить к описанию конструкции, возбуждающей поле. Для этого, прежде всего, нужно поместить указатель мышки над полем редактора, запустить контекстную команду **Сетка привязки**. На экран будет выведен диалог, показанный на рис. 6.14.

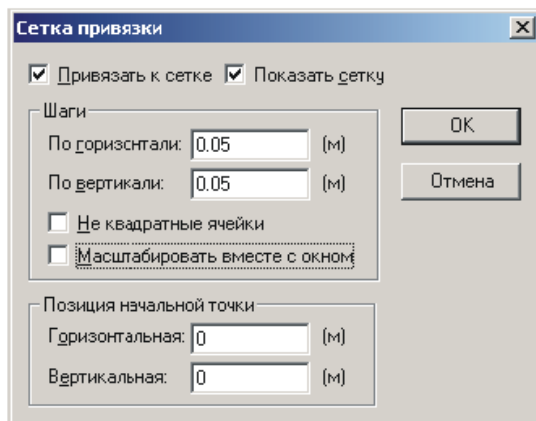


Рис. 6.14. Диалог настройки параметров сетки

Рекомендуется всегда использовать режим привязки к сетке и выводить саму сетку на экран. Команда **Масштабировать вместе с окном** включает или отключает изменение видимого размера ячеек сетки в процессе масштабирования изображения. Определить размеры расчетной области. Уточним, что имеется в виду.

Как известно, распространение электромагнитного поля в свободном пространстве неограниченно. Естественно, что решить задачу для бесконечного пространства численными методами невозможно. Учитывая, что напряженность электрического поля быстро падает с увеличением расстояния от источника, вполне достаточно, чтобы границы решения задачи имели линейные размеры, превышающие размеры источника поля в 3-5 раз. Ограниченное пространство, для которого производится расчет поля, называется расчетной областью. Расчетная область может быть выделена любой геометрической фигурой: квадратом, прямоугольником или окружностью (в зависимости от геометрии задачи). Фигура строится из отрезков линий, чаще всего прямых. Эти линии принято называть **ребрами**. Концы ребер называются **вершинами**.

Построение геометрии расчетной области осуществляется с помощью небольшого, но довольно простого и гибкого инструментария. Как уже было отмечено основными графическими примитивами, которые можно строить являются **вершина, ребро, фигура**.

Каждый элемент обрисовывается с помощью соответствующего инструмента. Все инструменты сосредоточены в панели **Модель** (рис. 6.15), которая выводится на экран только после активизации (щелчка мышкой по рабочей области) графического редактора.

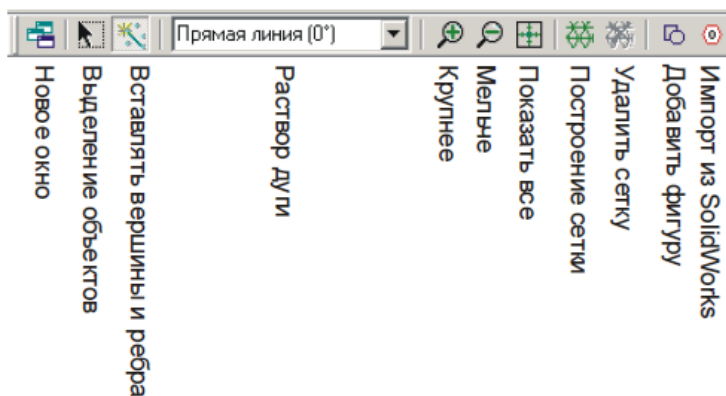


Рис. 6.15. Инструменты панели Модель

Примечание. ELCUT имеет лишь базовые возможности построения двумерной графики. Их хватает лишь для построения несложного рисунка. Если рисунок сложный, состоит из большого количества эле-

ментов, то его проще выполнить в специализированном графическом пакете, например AutoCAD, а затем импортировать в ELCUT. Для импортирования нужно сохранить исходный чертеж в формате DXF, после чего запустить **Файл / Импорт DXF**.

1. *Построение ребра.* Для создания нового ребра необходимо действовать по алгоритму:

- Нажмите кнопку на панели инструментов **Вставлять вершины и ребра** или клавишу INS, чтобы перейти в *режим вставки*.

- Укажите раствор нового ребра в окне **Раствор дуги**. Выберите одно из значений, находящихся в выпадающем списке (прямая линия, четверть круга, половина круга, три четверти круга).

- В начальной точке создаваемого ребра нажмите левую кнопку мышки и не отпуская ее, перетащите указатель к конечной точке. В процессе перетаскивания следует обращать внимание на координаты текущей точки, отображаемые в статус-строке в выбранных по чертежу единицах измерения.

2. *Построение вершины.* Чтобы создать новую вершину необходимо действовать по алгоритму:

- Выберите команду **Вставлять вершины и ребра** на панели инструментов, чтобы перейти в *режим вставки*.

- Укажите точку, где нужно создать новую вершину, и дважды быстро нажмите левую кнопку мыши.

3. *Вставка фигуры.* Вставка фигуры позволяет ускорить процесс создания геометрии, путем ввода стандартных геометрических фигур: круга, прямоугольника, эллипса. Их ввод осуществляется запуском команды **Добавить фигуру** из панели **Модель**. На экране появится диалог.

После выполнения вышеперечисленных процедур построение геометрической модели полностью завершено. Сохраняют ее нажатием комбинации клавиш **Ctrl+S**, либо через меню **Файл**. ELCUT сохранит геометрическую модель с расширением *.mod. Следующим этапом в создание модели является связь физических свойств с геометрическими объектами модели.

Четвертый этап – это описание физических свойств модели. Описание физических свойств элементов и объектов модели проводится в два приема.

1. Необходимо присвоить имена геометрическим объектам, с помощью *меток*, которые необходимы для того, чтобы пользователь мог обращаться к конкретному элементу модели для описания свойств его материала, или описания источников поля, а также граничных условий.

2. Провести описание свойств материалов элементов модели, источников поля и граничных условий.

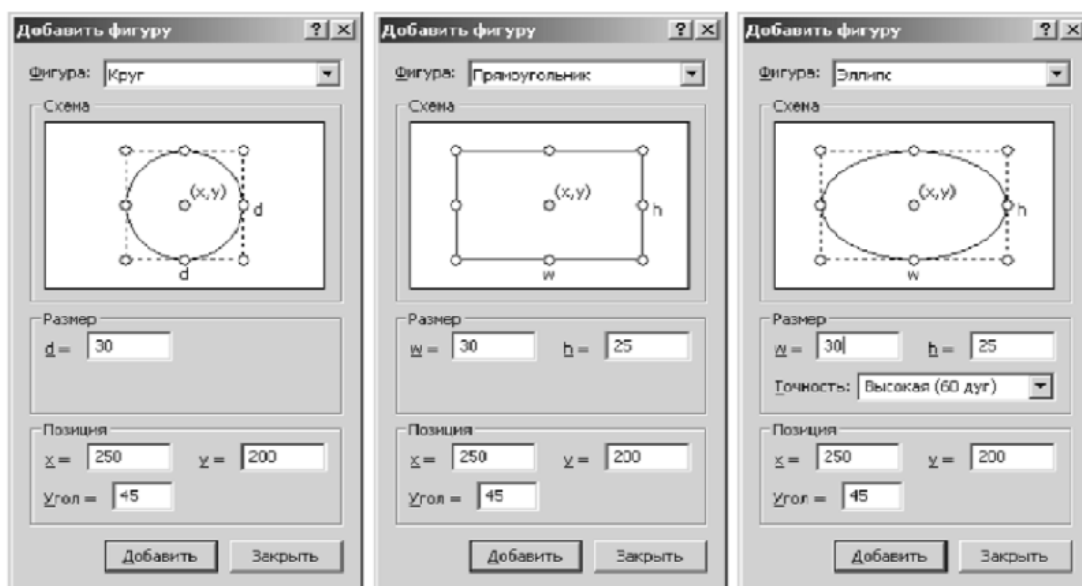


Рис. 6.16. Добавить фигуры

6.3. Модель для расчета электростатического поля

В качестве примера рассмотрим поле геометрической модели представленной на рис. 6.17.

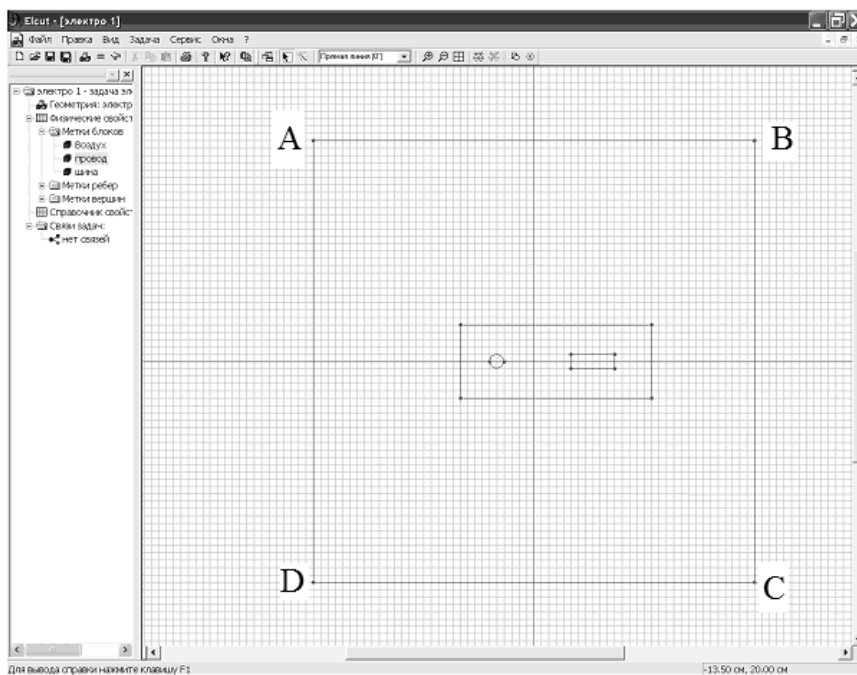


Рис. 6.17. Модель двухпроводной линии.

Исходными данными для этой модели являются геометрические размеры двухпроводного кабеля в диэлектрической изоляции (рис. 6.4). Блоками модели являются ограниченная квадратом ABCD область воздушного пространства, охватывающего диэлектрик с заключенными в него проводниками и сами проводники.

По условию задачи требуется построить результирующую картину поля, которая определяется внешним электростатическим полем, силовые линии которого направлены слева на право, а так же составляющими поля, создаваемого проводниками кабеля. В рассматриваемой задаче содержатся три материала с различными свойствами: воздух, диэлектрик и проводники.

Для присвоения свойств элементам модели выберем следующие имена меток *Воздух*, *Диэлектрик*, *Провод*, *Шина*.

Этап присвоение меток. Для присвоения меток блокам необходимо:

1. Щелкнуть мышью внутри прямоугольника ABCD. Блок станет выделенным заливкой красного цвета.
2. Открыть левой кнопкой меню **Правка/Свойства**.
3. После появления формы **Свойства выделенных объектов**, в окне **Метка** поместите имя метки, в данном случае **Воздух** (рис. 6.18) .

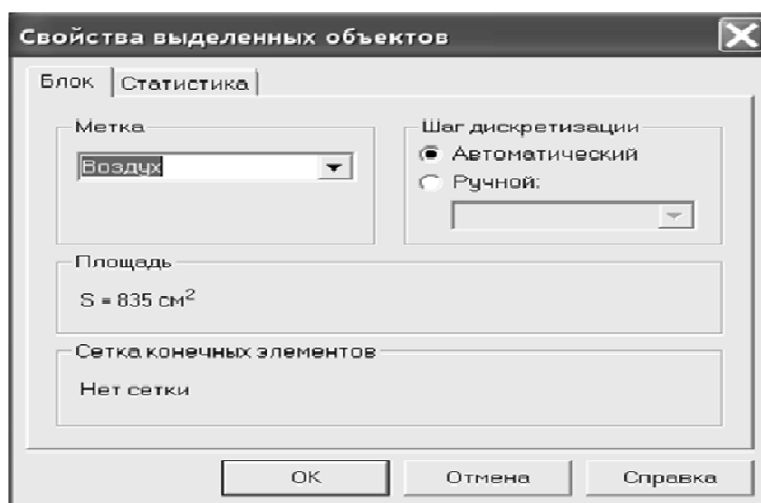


Рис. 6.18. Блок для присвоения свойств выделенным объектам

4. На этом нажатием кнопки **ОК** следует закончить диалог.

Точно так же нужно поступить с блоком *Диэлектрик*. Блокам *Провод* и *Шина* метки можно не присваивать. Объясняется это тем, что эти блоки представляют собой проводники. Как известно электростатическое поле внутри проводников отсутствует, т.е. рассчитывать его нет смысла.

В окне описания задачи в разделе **Метки блоков** появятся метки (рис. 6.19).

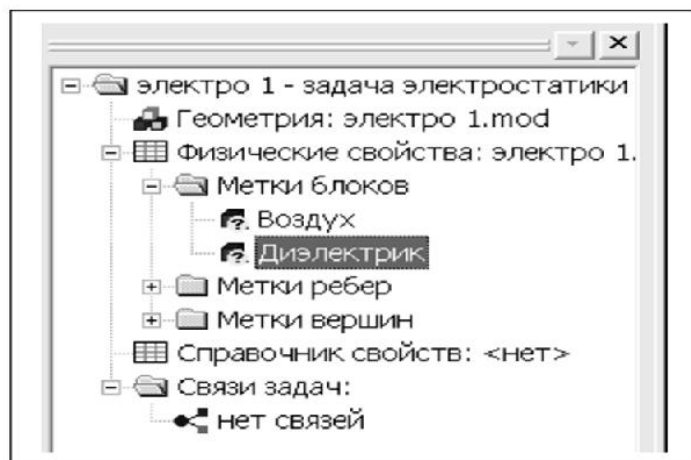


Рис. 6.19. Метки блоков

Кроме меток блоков необходимо присвоить метки ребрам а, в общем случае, и вершинам. Метки ребер используются для задания граничных условий на внешних и внутренних границах области. В данном случае задаются граничные условия для ребер AD и BC.

Метки ребер. Щелкнув правой кнопкой на ребро AD, вызывают контекстное меню, и в нем выбрав **Свойства (Alt+Enter)** и отмечают его как *Лево*.

Точно так же присваивают метки правому ребру BC обозначив его, например, *Право*. Правое и левое ребро, в дальнейшем рассматриваются как пластины конденсатора, создающего электрическое поле с напряженностью E. Верхнее и нижнее ребро области в решении не участвуют, и, поэтому, соответствующие им метки можно не создавать.

Затем присваивают метки четырем ребрам диэлектрика, присвоив им имена *Диэлектрик*, а именно, *Диэлектрик лево*, *Диэлектрик право*, *Диэлектрик низ*, *Диэлектрик верх*.

После этого определяют метки верхнему и нижнему ребру провода. Дав им имена *Верх провода* и *Низ провода*. Таким же образом можно выделить отдельные ребра шины и присвоить им метки, но можно это сделать сразу для всех ребер. Для этого удерживая кнопку **Ctrl**, выделяют все ребра шины. Для этого в меню **Правка/Свойства (Alt+Enter)** отмечают все 4 ребра одной меткой *Поверхность шины*.

После того, как указанные метки созданы к дереву задачи, добавляются метки с флажками, означающими, что описание меток не закончено (рис. 6.20).

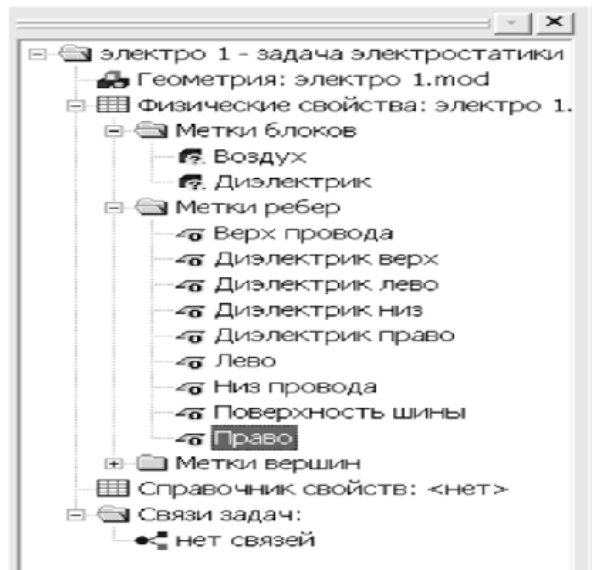


Рис. 6.20. Метки модели

Этап определения физических свойств. Для задания физических свойств, дважды щелкнем в окне описания задачи по метке *Воздух*. В появившемся окне **Свойства метки воздуха** введем диэлектрическую проницаемость воздуха ($\epsilon_x=1$) и плотность электрического заряда в воздухе (для данной задачи $\rho=0$) (рис. 6.21).

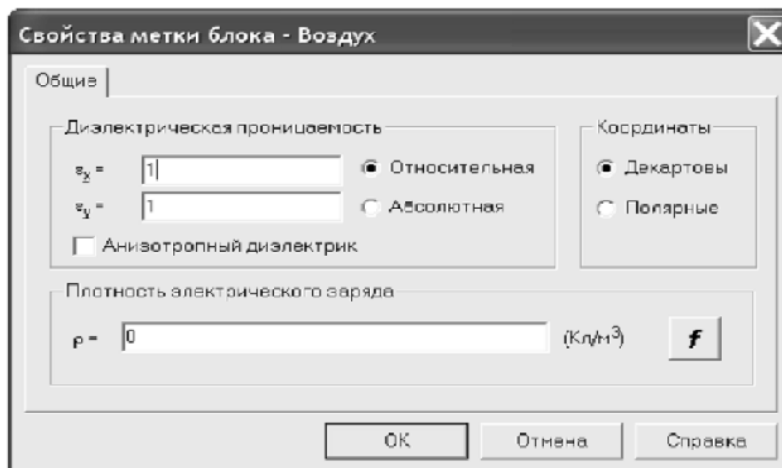


Рис. 6.21. Присвоение физических свойств воздуху

То же самое необходимо проделать для блока *Диэлектрик*. Разница заключается только в том, что для него $\epsilon_x=4$. При этом (следует обратить внимание), что значки стоящие рядом с именами меток, в окне описания задачи, изменились. Это говорит о том, что физические свойства меток определены.

Определение граничных условий. Для того, чтобы смоделировать эквивалентное поле создаваемое по условию задачи внешним источником считают, что оно создается эквивалентным конденсатором образованным ребрами AD и BC. Для этого определяют эквивалентную плотность зарядов на этих ребрах. На ребре с меткой *Лево* задается граничное условие Неймана, определяемое плотностью зарядов на поверхности по формуле:

$$\sigma = \varepsilon\varepsilon_0 E_0, \quad (6.1)$$

Дважды щелкнув левой кнопкой мыши на соответствующем элементе дерева задачи, открывают окно **Свойства метки – Лево**. Устанавливают флажок **Поверхностный заряд**. Щелкнув левой кнопкой мыши в графу, вводят с клавиатуры соответствующее число. При вводе необходимо вводить числа через точку, иначе система выдаст сообщение об ошибке. После этого диалог для данной задачи завершается. Для метки *Право*, вводят заряд той же величины, но с обратным знаком (рис. 6.22).

Электростатическое поле, проводников определяется зарядами, распределенными по их поверхности. Поэтому меткам ребер низ и верх провода присваивается значение потенциала 10000 В (рис. 6.23). Таким образом, источниками результирующего электростатического поля в рассматриваемой задаче являются заряды, распределенные на обкладках внешнего конденсатора и зарядами на ребрах проводников.

Потенциал ребра *Поверхность шины* устанавливают равной нулю. Шина в данном случае моделируется одним ребром, поэтому потенциал вводится один раз.

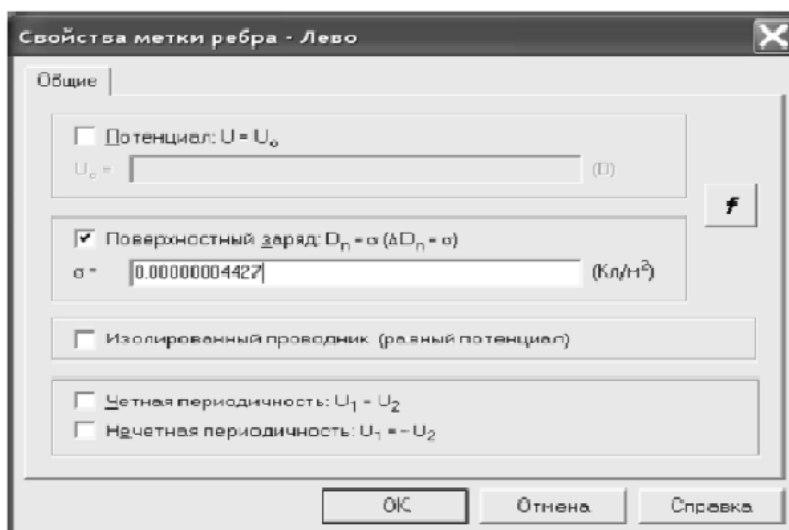


Рис. 6.22. Установка граничных условий

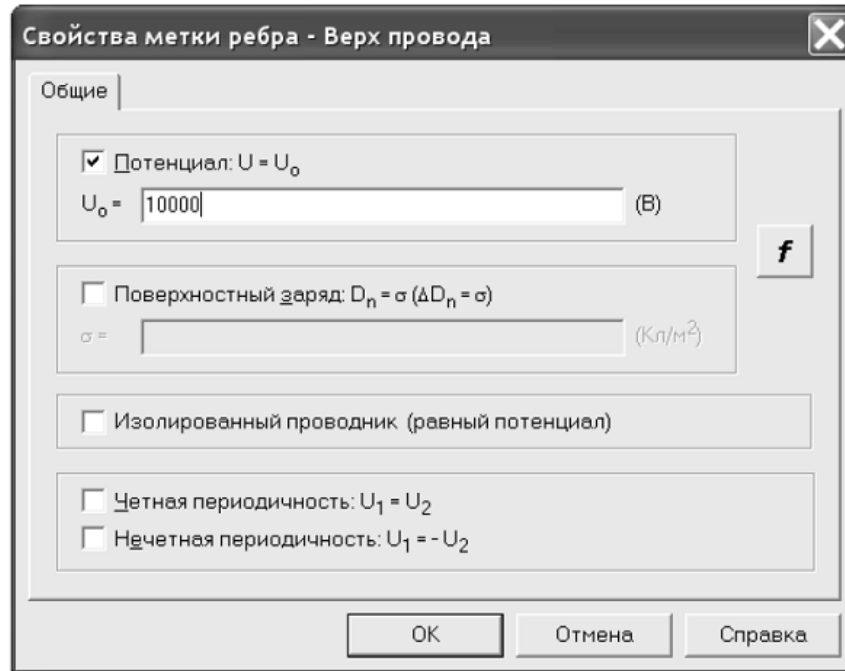


Рис. 6.23. Потенциалы ребер провода

В отличие от шины модель диэлектрика образована четырьмя ребрами. В этом случае нужно определить поверхностную плотность заряда каждого ребра отдельно, хотя понятно, что на всех ребрах она одинакова и так же равна нулю.

После того, как метки полностью определены, вид флажков меток ребер изменится (рис. 6.24), что указывает на присвоение физических свойств и граничных условий элементам геометрической модели исследуемого объекта.

Создание сетки. После того как метки созданы приступают к созданию сетки. Сетка образована узлами. Линии, соединяющие узлы делят всю область задачи на отдельные участки, поле в которых можно считать независимым от координат. Для каждой ячейки программа определяет параметры поля. Конечно, чем больше число узлов, тем выше точность решения.

Электрическое поле в проводниках отсутствует, поэтому решение задачи целесообразно проводить только для диэлектриков, это позволит сэкономить число ячеек сетки. Для того чтобы создать сетку необходимо выделить в данной задаче блоки *Воздух* и *Диэлектрик*. Затем в контекстном меню для каждого из блоков отработать команды **Построить сетку/В выделенных блоках**. На рис. 6.25 приведена процедура для создания сетки в блоке *Воздух*.

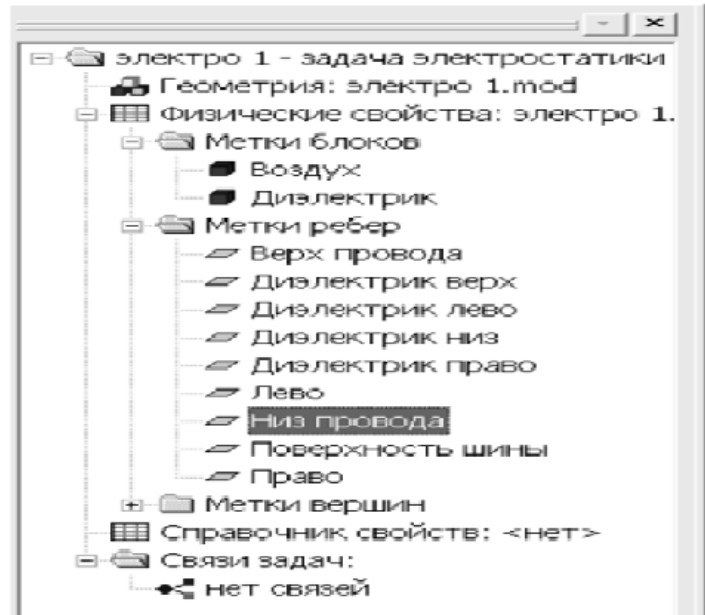


Рис. 6.24. Определение меток элементов геометрической модели

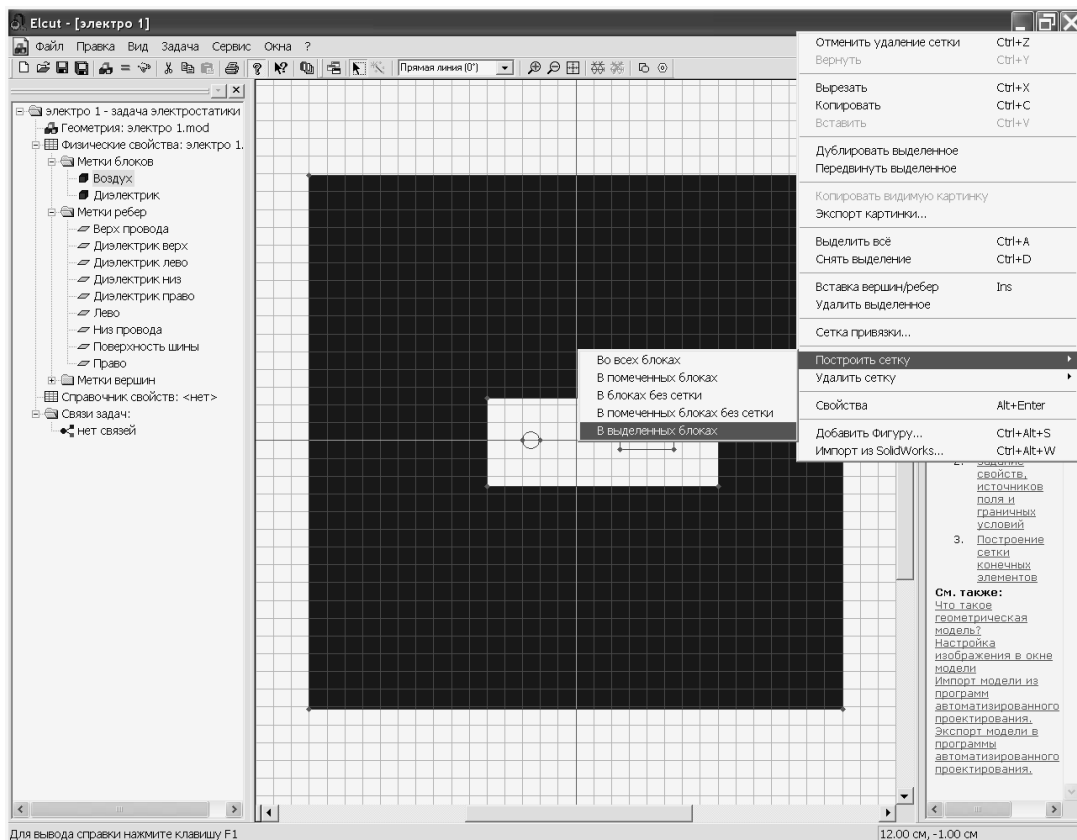


Рис. 6.25. Создание сетки

Теперь все готово к численному решению задачи. Для того что бы приступить к решению следует нажать кнопку «**==**», расположенную на панели инструментов. После этого появится сообщение (рис. 6.26).

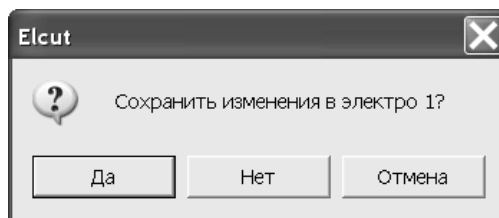


Рис. 6.26. Сохранение файла задачи перед ее решением

После двукратного щелчка по кнопке **ДА** появится картина поля, в виде линий поля, имеющих одинаковый потенциал, так называемых эквипотенциалей (рис. 6.27).

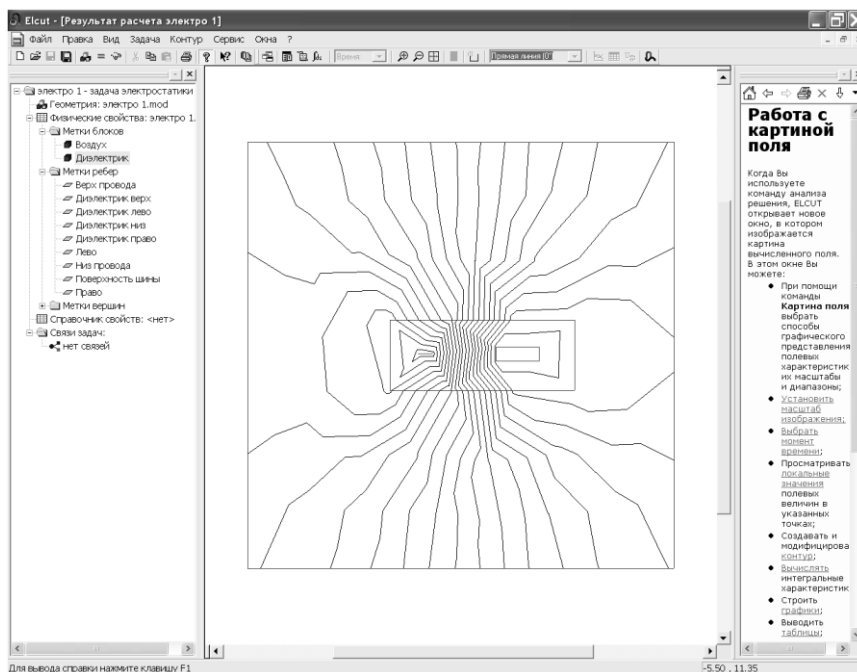



Рис. 6.27. Решение задачи в виде эквипотенциальных линий

На этом решение задачи не заканчивается. Начинается процесс анализа решения. С этой целью следует изменить исходные данные, т.е. вернуться к описанию задачи. Для этого служит кнопка  **Открыть модель**. Открыв модель, уменьшают шаг сетки на поверхности проводников. Дело в том, что именно у поверхности проводников происходит изменение направления поля. Если уменьшение шага сетки не меняет картину поля, то считают что решение найдено достаточно точно.

Решение задачи отражают не только в виде множества эквипотенциалей, но и в виде силовых линий напряженности и электрического смещения. Для этого следует войти в меню **Вид/Картина поля**. В открывшемся окне устанавливают нужные флажки, в соответствии с желаемым видом решения, например, в соответствии с рис. 6.28.

Завершение диалога (щелчок по кнопке ОК) приведет к появлению соответствующего графического отображения электрического поля. Анализ графического отображения электрического поля позволяет провести количественную и качественную оценку проведенных исследований.

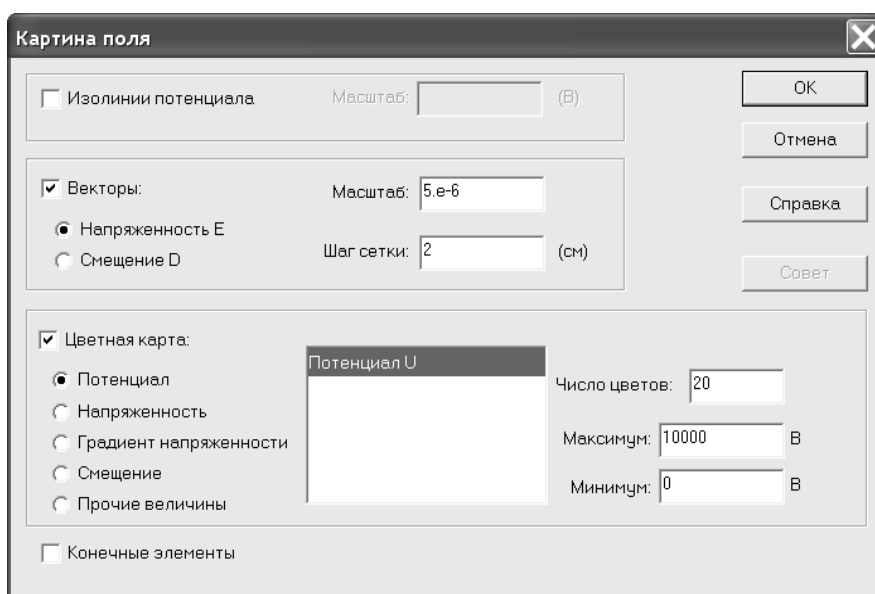


Рис. 6.28. Выбор способов графического отображения параметров электрического поля

Приложение 1

ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА МЕТОДОМ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Исходные данные

$$R1 := 20 \quad R2 := 18 \quad R3 := 25 \quad R4 := 21 \quad R5 := 12 \quad R6 := 8$$

$$E1 := 25 \quad E2 := 35 \quad E3 := 50$$

Система уравнений для контурных токов

$$J1 \cdot (R1 + R3 + R6 + R5) - J2 \cdot (R5 + R6) = -(E1 + E3)$$

$$-J1 \cdot (R6 + R5) + J2 \cdot (R5 + R6 + R2) = E2$$

Формирование матриц параметров и свободных членов

$$A := \begin{bmatrix} (R1 + R3 + R6 + R5) & -(R5 + R6) \\ -(R5 + R6) & (R5 + R6 + R2) \end{bmatrix} \quad B := \begin{pmatrix} -E1 - E3 \\ E2 \end{pmatrix}$$

$$J := A^{-1} \cdot B \quad J = \begin{pmatrix} -1.039 \\ 0.374 \end{pmatrix} \quad J1 := J_0 \quad J1 = -1.039 \quad J2 := J_1 \quad J2 = 0.374$$

Расчет токов в ветвях и напряжения холостого хода

$$I1 := J1 \quad I2 := J2 \quad I3 := J1 - J2$$

$$U_{xx} := -E1 - I3 \cdot R5 + I1 \cdot R3 \quad U_{xx} = -34.01 \quad E_g := -U_{xx} \quad E_g = 34.01$$

Расчет сопротивления эквивалентного генератора

$$R52 := \frac{R5 \cdot R2}{R5 + R2 + R6} \quad R62 := \frac{R6 \cdot R2}{R5 + R2 + R6} \quad R56 := \frac{R5 \cdot R6}{R5 + R2 + R6}$$

$$R_g := \frac{(R1 + R52) \cdot (R3 + R62)}{R1 + R52 + (R3 + R62)} + R56 \quad R_g = 16.1$$

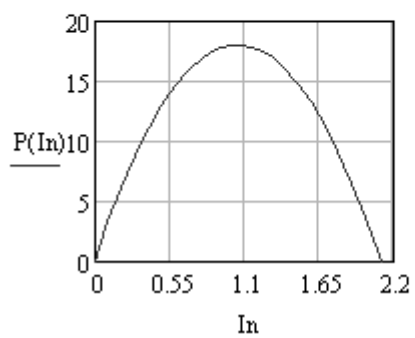
Расчет тока нагрузки эквивалентного генератора

$$I_n := \frac{E_g}{R_g + R4} \quad I_n = 0.917$$

Зависимость мощности от тока нагрузки

$$P(I_n) := -R_g \left(I_n - \frac{E_g}{2 \cdot R_g} \right)^2 + \frac{E_g^2}{4 \cdot R_g}$$

$$I_n := 0, 0.1 \dots 2.2$$



ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ЗАВИСИМОСТИ $P(R_H)$

При разработке программы в *MathCAD* данную задачу можно решить как численно, так и аналитически.

При аналитическом решении необходимо реализовать следующие этапы:

1. Объявить функцию мощности нагрузки P от переменных E – ЭДС генератора, r – сопротивления генератора и R – сопротивления нагрузки.

2. Вызвать процедуру вычисления производной.

3. Приравнять производную нулю.

4. Решить нелинейное уравнение, используя процедуру *solve*.

При численном решении необходимо:

1. Сформировать исходные данные.

2. Построить график, используя графический редактор.

Аналитическое решение

$$1. P(E, R, r) := \frac{E^2}{(r + R)^2} \cdot R$$

$$2. \frac{d}{dR} P(E, R, r) \rightarrow (-2) \cdot \frac{E^2}{(r + R)^3} \cdot R + \frac{E^2}{(r + R)^2}$$

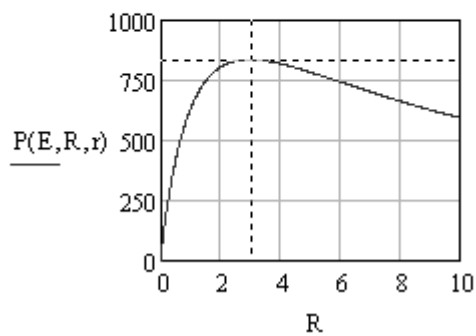
$$3. (-2) \cdot \frac{E^2}{(r + R)^3} \cdot R + \frac{E^2}{(r + R)^2} = 0$$

$$4. (-2) \cdot \frac{E^2}{(r + R)^3} \cdot R + \frac{E^2}{(r + R)^2} = 0 \text{ solve, } R \rightarrow r$$

Численное решение

Исходные данные

$E := 100$ $r := 3$ $\underline{\underline{R}} := 0, 0.01 .. 10$



Приложение 3

ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА СТАЦИОНАРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Исходные данные

$$\omega := 500 \quad e(t) := 14.14 \cdot \sin(\omega \cdot t + 45) \quad R := 20 \quad L := 0.1 \quad C := 50$$

Расчет реактивных параметров

$$X_L := \omega \cdot L \quad X_L = 50 \quad X_C := \frac{1}{\omega \cdot C \cdot 10^{-6}} \quad X_C = 40$$

Расчет комплексных сопротивлений и значения ЭДС

$$i := \sqrt{-1} \quad Z := R + i \cdot (X_L - X_C) \quad Z = 20 + 10i \quad E_d := \frac{14.14}{\sqrt{2}} \quad E_d = 9.998$$

Расчет амплитуды и комплексного значения тока в цепи

$$E := 10 + i \cdot 10 \quad I := \frac{E}{Z} \quad I = 0.6 + 0.2i \quad I_m := |I| \cdot \sqrt{2} \quad I_m = 0.894$$

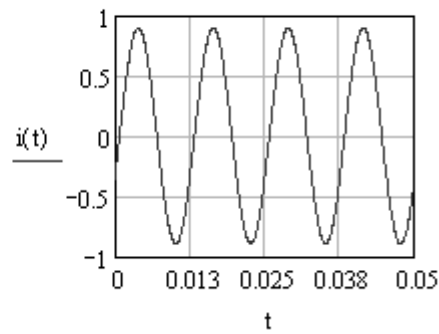
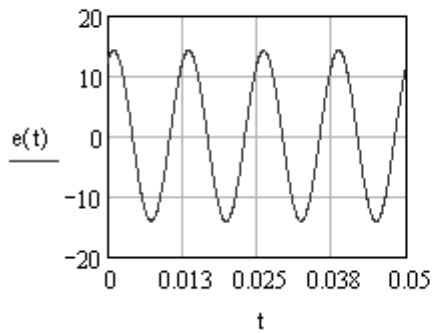
Определение фазы мгновенного значения тока

$$\begin{aligned} \phi_e &:= \arg(E) & \phi_e &= 0.785 & \phi_z &:= \arg(Z) & \phi_z &= 0.464 \\ \phi_i &:= \arg(I) & \phi_i &= 0.322 & \phi_{li} &:= (\phi_e - \phi_z) & \phi_{li} &= 0.322 \\ \phi_{i0} &:= \frac{180}{\pi} \cdot \phi_i & \phi_{i0} &= 18.435 \end{aligned}$$

Определение мгновенного значения тока

$$i(t) := I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + 18.435)$$

Зависимости напряжения и тока от времени

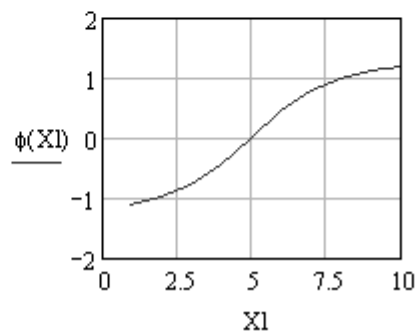
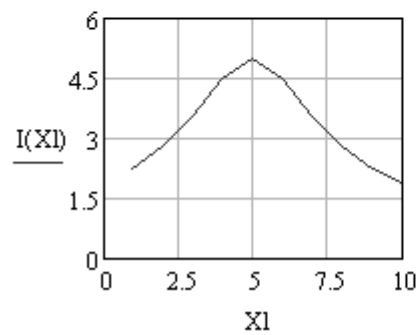


Расчет зависимостей тока и фазового сдвига от изменения величины индуктивного сопротивления цепи

$$E := 10 \cdot e^{30i \cdot \text{deg}} \quad E = 8.66 + 5i$$

$$Xl := 1, 2 \dots 10 \quad Xc := 5 \quad R := 2 \quad Z(Xl) := R + i \cdot (Xl - Xc)$$

$$I(Xl) := \frac{E}{Z(Xl)} \quad |I(Xl)| := |I(Xl)| \quad \phi(Xl) := \arg(Z(Xl))$$



Приложение 4

ЛИСТИНГ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОЙ ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСЧЕТА И ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗАРЯДА КОНДЕНСАТОРА

Решение дифференциального уравнения

$$R := 2 \quad C := 650 \cdot 10^{-6} \quad U := 100$$

Математическое описание процесса в схеме

$$u_r(t) + u_c(t) = U \quad i(t) = C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} \quad u_r(t) = i \cdot R$$

$$u_{c0} := 0 \quad R \cdot C \cdot \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = U \quad u_c(t) = U_{pr} + A \cdot e^{pt}$$

Расчет принужденной составляющей

$$U_{pr} := U$$

Определение корней характеристического уравнения

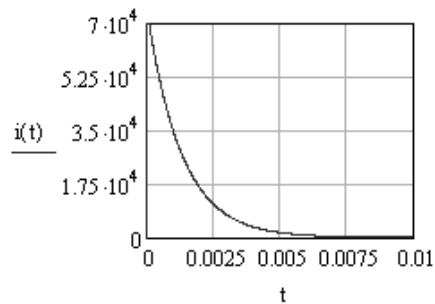
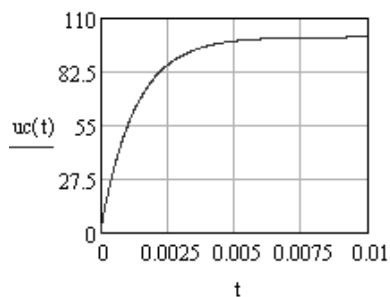
$$R \cdot C \cdot p + 1 = 0 \quad p := -\frac{1}{R \cdot C} \quad p = -769.231$$

Определение постоянной интегрирования

$$U_{pr} + A = 0 \quad A := -U_{pr} \quad A = -100$$

Уравнение для расчета переходного процесса

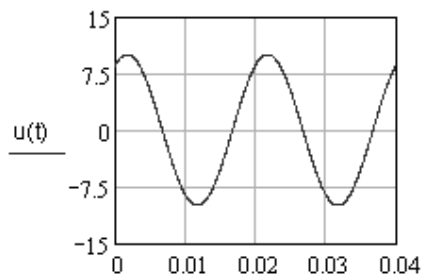
$$u_c(t) := U_{pr} + A \cdot e^{p \cdot t} \quad i(t) := \frac{d}{dt} u_c(t)$$



Переходный процесс при переменном напряжении

$$f := 50 \quad \omega := 2 \cdot \pi \cdot f$$

$$u(t) := 10 \cdot \sin(\omega \cdot t + 1) \quad \text{напряжение на входе RC цепи}$$



Расчет свободной составляющей

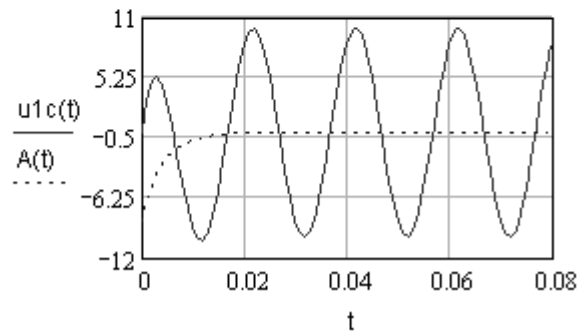
$$t_0 := 0 \quad \underset{\text{св}}{F} := -10 \cdot \sin(\omega \cdot t_0 + 1) \quad F = -8.415$$

$$\underset{\text{св}}{A}(t) := F \cdot e^{p \cdot t}$$

Расчет переходного процесса

$$u_{1c}(t) := u(t) + A(t)$$

$$t := 0, 0.001 \dots 0.08$$



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В. Математическое моделирование в электромеханике: учеб. пособие / А.В. Аристов, Л.К. Бурулько, Л.А. Паюк Л.А. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 145 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи: учебник для студентов электротехнических, энергетических и приборостроительных специальностей вузов / Л.А. Бессонов. – М.: Высшая школа, 1978. – 528 с.
3. Бурулько Л.К. Математическое моделирование электромеханических систем: учебное пособие. Часть 1 Математическое моделирование преобразователей электрической энергии переменного тока / Л.К. Бурулько. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 104 с.
4. Бурулько Л.К. Математическое моделирование электромеханических систем: Лабораторный практикум: учебное пособие. / Л.К. Бурулько. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 68 с.
5. Глазырин А.С. Методы и средства автоматизации профессиональной деятельности. Ч. 1: учебное пособие / А.С. Глазырин, Д.Ю. Ляпунов, И.В. Слащев, С.В. Ляпушкин; под общ. ред. А.С. Глазырина.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 199 с.
6. Глазырин А.С. Методы и средства автоматизации профессиональной деятельности. Ч. 2: учебное пособие / А.С. Глазырин, Д.Ю. Ляпунов, И.В. Слащев, С.В. Ляпушкин; под общ. ред. А.С. Глазырина.– Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. – 173 с.
7. Дьяконов В.П. *MathCAD 2000: учебный курс* / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
8. Дьяконов В.П. *MatLAB 6: учебный курс* / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2001. – 592 с.
9. Дьяконов В.П. *Simulink-4: Специальный справочник* / В.П. Дьяконов. – СПб.: Питер, 2002. – 528 с.
10. Дьяконов В.П. Новейшие информационные технологии. Достижения и люди / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 410 с.
11. Дьяконов В.П. *MATLAB R2006/2007/2008 + Simulink 5/6/7. Основы применения* / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.
12. Кирьянов Д.В. Самоучитель *MathCAD 13* / Д.В. Кирьянов. – СПб.: БХВ – Петербург, 2006. – 528 с.

13. Парфенов А.И. Применение MathCAD в инженерных расчетах: учеб. пособие / А.И. Парфенов, А.В. Лопарев, В.К. Пономарев; СПбГУ-АП. – СПб., 2004. – 88 с.
14. Попов В.П. Основы теории цепей: учебник для вузов / В.П. Попов. – М.: Высшая школа, 2012. – 635 с.
15. Рудникова Л.В. Microsoft Excel для студентов / Л.В. Рудникова. – СПб.; БХВ –Петербург, 2007. – 368 с.
16. Арефьев В.П. Линейная алгебра и аналитическая геометрия: учебное пособие / В.П. Арефьев. – Томск: Изд-во ТПУ, Томск, 2010. – 92 с.

Учебное издание

БУРУЛЬКО Лев Кириллович

**ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА
ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Учебное пособие

Научный редактор
доктор технических наук,
профессор *А.В. Аристов*


В авторской редакции

Компьютерная верстка *Л.А. Егорова*



Национальный исследовательский
Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Издательства Томского политехнического университета
сертифицирована в соответствии с требованиями ISO 9001:2008



ИЗДАТЕЛЬСТВО  **ТПУ**. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30
Тел./факс: 8(3822)56-35-35, www.tpu.ru