

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Энергетический институт  
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра электрических сетей и электротехники

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

| Тема работы                                                                                       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Разработка элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике»</b> |

УДК 621.311:51:004

Студент

| Группа | ФИО                           | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------|---------|------|
| 5AM5Г  | Мамонтов Дмитрий Владимирович |         |      |

Руководитель

| Должность           | ФИО            | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры ЭСиЭ | Колчанова В.А. | к.т.н., доцент            |         |      |

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность                  | ФИО            | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|----------------------------|----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры менеджмента | Сергейчик С.И. | к.т.н., доцент            |         |      |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность          | ФИО             | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|--------------------|-----------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры ЭБЖ | Дашковский А.Г. | к.т.н., доцент            |         |      |

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

| Зав. кафедрой | ФИО           | Ученая степень,<br>звание | Подпись | Дата |
|---------------|---------------|---------------------------|---------|------|
| ЭСиЭ          | Прохоров А.В. | к.т.н.                    |         |      |

Томск – 2017

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Направление ООП: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Профиль: Электроэнергетические системы, сети, электропередачи, их режимы, устойчивость и надежность

Кафедра, институт: кафедра электрических сетей и электротехники, Энергетический институт

| Код результата                      | Результат обучения<br>(выпускник должен быть готов)                                                                                                                                                                                                                       |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Профессиональные компетенции</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>P1</b>                           | Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа электрических устройств, объектов и систем.                                         |
| <b>P2</b>                           | Уметь формулировать задачи в области электроэнергетики и электротехники, анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.                                                                                                                  |
| <b>P3</b>                           | Уметь проектировать электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты.                                                                                                                                                                                   |
| <b>P4</b>                           | Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники, интерпретировать данные и делать выводы.              |
| <b>P5</b>                           | Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области электроэнергетики и электротехники.                                                                                                                           |
| <b>P6</b>                           | Иметь практические знания принципов и технологий электроэнергетической и электротехнической отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях. |
| <b>Универсальные компетенции</b>    |                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| <b>P7</b>                           | Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области электроэнергетики и электротехники                                                                                                                                |
| <b>P8</b>                           | Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях электроэнергетики и электротехники.                                 |
| <b>P9</b>                           | Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области электроэнергетики и электротехники.                                                                                                                     |
| <b>P10</b>                          | Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.                                                                                                                                     |
| <b>P11</b>                          | Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области электроэнергетики и электротехники с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.                                                                         |
| <b>P12</b>                          | Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области электроэнергетики и электротехники.                                                                                                                                     |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Энергетический институт  
Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника  
Кафедра электрических сетей и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой ЭСиЭ  
\_\_\_\_\_ Прохоров А.В.  
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

|                          |
|--------------------------|
| Магистерской диссертации |
|--------------------------|

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

| Группа | ФИО                             |
|--------|---------------------------------|
| 5AM5Г  | Мамонтову Дмитрию Владимировичу |

Тема работы:

|                                                                                                   |  |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| <b>Разработка элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике»</b> |  |
| Утверждена приказом директора (дата, номер)                                                       |  |

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

|                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|--------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к работе</b>                                                | Материалы кафедры ЭСиЭ, научно-исследовательской и преддипломной практик.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов.</b> | Поиск источников по теме исследования (базы данных, например, Elsevier – ScienceDirect, SCOPUS, eLIBRARY.RU, сайты научных, образовательных и промышленных центров); перевод статей на русский язык; составление плана исследования; аналитический обзор источников по теме исследования, проектирование электронных курсов; описание принципов, методов и инструментов проектирования электронного курса, его структуры и функций (на примере дисциплины «Математическое моделирование»); разработка лабораторного практикума по созданию элементов электроэнергетики (описание существующего лабораторного практикума и обоснование необходимости его развития; обзор и обоснование выбора программных комплексов для проведения лабораторных работ, анализ |

|                                                                                         |                                                                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
|                                                                                         | результатов и перспектив выполненного исследования.                               |
| <b>Перечень графического материала</b>                                                  |                                                                                   |
| <b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>                       |                                                                                   |
| <b>Раздел</b>                                                                           | <b>Консультант</b>                                                                |
| Социальная ответственность                                                              | А.Г. Дашковский, к.т.н., доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности |
| Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение                         | С.И. Сергейчик, к.т.н., доцент кафедры менеджмента                                |
| Раздел ВКР, выполняемый на иностранном языке                                            | В.М. Лемская, к.ф.н., доцент кафедры иностранных языков                           |
| <b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b> |                                                                                   |
| Проектирование электронных курсов                                                       |                                                                                   |

**Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику**

**Задание выдал руководитель:**

| Должность           | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры ЭСиЭ | Колчанова В.А. | к.т.н., доцент         |         |      |

**Задание принял к исполнению студент:**

| Группа | ФИО           | Подпись | Дата |
|--------|---------------|---------|------|
| 5AM5Г  | Мамонтов Д.В. |         |      |

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

|               |                |
|---------------|----------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>     |
| 5AM5Г         | Мамонтову Д.В. |

|                            |              |                                  |                                             |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Институт</b>            | <b>ЭНИН</b>  | <b>Кафедра</b>                   | <b>ЭСиЭ</b>                                 |
| <b>Уровень образования</b> | Магистратура | <b>Направление/специальность</b> | 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника |

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

|                                                                                                                      |                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, финансовых, информационных и человеческих | Определение стоимости материально-технических ресурсов научно- исследовательской работы. |
| 2. Нормы и нормативы расходования ресурсов                                                                           | Составление сметы затрат научно-исследовательской работы                                 |
| 3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования                  | Отчисления на социальные нужды: ПРФ – 22 %, ФСС РФ – 2,9 %, ФФОМС – 5,1 %.               |

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

|                                                                   |                                                                                           |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ           | Оценка инновационного потенциала проекта за счет использования активных методов обучения. |
| 2. Формирование плана и графика разработки                        | Разработка линейного графика, разработка сетевого графика                                 |
| 3. Формирование бюджета затрат на научное исследование            | Составление сметы для проекта:                                                            |
| 4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности | Оценка целесообразности проекта:                                                          |

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

|                    |
|--------------------|
| 1. Линейный график |
| 2. Сетевой график  |

|                                                             |  |
|-------------------------------------------------------------|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|-------------------------------------------------------------|--|

**Задание выдал консультант:**

|                            |                |                               |                |             |
|----------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>           | <b>ФИО</b>     | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент кафедры Менеджмента | С.И. Сергейчик | к.т.н., доцент                |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |               |                |             |
|---------------|---------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>    | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 5AM5Г         | Д.В. Мамонтов |                |             |

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

|               |                |
|---------------|----------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>     |
| 5AM5Г         | Мамонтову Д.В. |

|                            |              |                                  |                                             |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Институт</b>            | <b>ЭНИН</b>  | <b>Кафедра</b>                   | <b>ЭСиЭ</b>                                 |
| <b>Уровень образования</b> | Магистратура | <b>Направление/специальность</b> | 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                                                                                                |
| 1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения                                                                                                                                                                                                                                                                             | Методика моделирования элементов электроэнергетики. Область применения – для использования в курсе математического моделирования в высших учебных заведениях.  |
| <b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                |
| <b>1. Производственная безопасность</b><br>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:<br>-действие фактора на организм человека;<br>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:<br>-термические опасности (источники, средства защиты); | Вредные факторы:<br>-повышенная температура<br>-недостаточная освещенность<br>-электромагнитные поля<br>Средства защиты<br>-экранирование<br>-защитные дисплеи |
| <b>2. Экологическая безопасность:</b><br>-защита селитебной зоны                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | -тепловое воздействие<br>-воздействие ЭМП                                                                                                                      |
| <b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b><br>-перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения;<br>-выбор наиболее типичной ЧС;                                                                                                                                                                                                                                           | Пожарная безопасность<br>-перегрев электрооборудования<br>-очистка от пыли и грязи<br>-вентиляция                                                              |
| <b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b><br>-специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны)                                                                                                                                                                                                                                     | Охрана труда<br>-техника безопасности                                                                                                                          |

|                                                             |  |
|-------------------------------------------------------------|--|
| <b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b> |  |
|-------------------------------------------------------------|--|

**Задание выдал консультант:**

|                    |                 |                               |                |             |
|--------------------|-----------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| <b>Должность</b>   | <b>ФИО</b>      | <b>Ученая степень, звание</b> | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| Доцент кафедры ЭБЖ | А.Г. Дашковский | к.т.н., доцент                |                |             |

**Задание принял к исполнению студент:**

|               |               |                |             |
|---------------|---------------|----------------|-------------|
| <b>Группа</b> | <b>ФИО</b>    | <b>Подпись</b> | <b>Дата</b> |
| 5AM5Г         | Д.В. Мамонтов |                |             |

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Энергетический институт

Направление подготовки 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Уровень образования Магистратура

Кафедра электрических сетей и электротехники

Период выполнения (осенний семестр 2016/2017 учебного года – весенний семестр 2016/2017 учебного года)

Форма представления работы:

|                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------|
| <b>Магистерская диссертация</b>                                          |
| (бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация) |

|                                          |            |
|------------------------------------------|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 29.05.2017 |
|------------------------------------------|------------|

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН

#### Выполнение выпускной квалификационной работы

| Дата контроля | Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)                                                                                                                                                                                                                                                                                | Максимальный балл раздела (модуля) |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| 15.11.2016    | Поиск источников по теме исследования (базы данных, например, Elsevier – ScienceDirect, SCOPUS, eLIBRARY.RU, сайты научных, образовательных и промышленных центров)                                                                                                                                                                  | 5                                  |
| 30.11.2016    | Перевод статей на русский язык                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5                                  |
| 15.12.2016    | Составление плана исследования                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 5                                  |
| 30.01.2016    | Аналитический обзор источников по теме исследования. Проектирование электронных курсов (в том числе на английском языке)                                                                                                                                                                                                             | 20                                 |
| 30.05.2016    | Описание принципов, методов и инструментов проектирования электронного курса, его структуры и функций (на примере дисциплины «Математическое моделирование»)                                                                                                                                                                         | 20                                 |
| 01.12.2016    | Разработка лабораторного практикума по моделированию элементов энергосистемы (описание существующего лабораторного практикума и обоснование необходимости его развития; обзор и обоснование выбора программных комплексов для разработки лабораторного практикума для дисциплины «Математическое моделирование в электроэнергетике») | 30                                 |
| 01.04.2017    | Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение                                                                                                                                                                                                                                                                      | 5                                  |
| 01.05.2017    | Социальная ответственность. Производственная и экологическая безопасность                                                                                                                                                                                                                                                            | 5                                  |
| 25.05.2017    | Анализ результатов и перспектив выполненного исследования                                                                                                                                                                                                                                                                            | 5                                  |

**Составил преподаватель:**

| Должность           | ФИО            | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------------|----------------|------------------------|---------|------|
| Доцент кафедры ЭСиЭ | Колчанова В.А. | к.т.н., доцент         |         |      |

**СОГЛАСОВАНО:**

| Должность | ФИО           | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|---------------|------------------------|---------|------|
| ЭСиЭ      | Прохоров А.В. | к.т.н.                 |         |      |

## Реферат

Выпускная квалификационная работа 197 с., 88 рис., 38 табл., 40 источников, 5 прил.

Ключевые слова: электронный курс, LMS Moodle, математическое моделирование, COMSOL, трансформатор, кабель, цепь с распределенными параметрами, приложение.

Объектом исследования является учебный процесс в высших учебных заведениях с применением электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике».

Цель работы – разработка элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» в системе управления обучением (Learning Management System) LMS Moodle и, в составе электронного курса, лабораторных работ по моделированию основных элементов электроэнергетики.

В процессе исследования проводились: анализ методов и средств математического моделирования, состояния и технологий электронного обучения; разработка электронного курса и лабораторного практикума; технико-экономические расчеты; анализ вопросов производственной и экологической безопасности.

В результате исследования разработаны элементы электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике», лабораторный практикум с тестовыми примерами.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: электронный курс выполнен в системе управления обучением LMS Moodle; лабораторный практикум разработан с использованием программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS.

Степень внедрения: электронный курс используется в учебном процессе для изучения дисциплины «Математическое моделирование в электроэнергетике».

Область применения: учебный процесс в высших учебных заведениях.

Экономическая эффективность работы: при планировании бюджета научно-исследовательской работы обеспечено всех видов планируемых расходов и работ, необходимых для ее выполнения. Вычислены общие затраты по НИР.

В будущем планируется дальнейшее развитие электронного курса и лабораторного практикума, апробация новых лабораторных работ.

## **Abstract**

Graduate qualification work 197 Pages, 80 Fig., 38 Tab., 40 Sources, 5 Adj.

Keywords: e-course, LMS Moodle, math modeling, COMSOL, transformer, cable, distributed parameters, application.

The object of research is the educational process in higher education with using e-course "Mathematical modeling".

The purpose of research - development of the elements of the e-course "Mathematical modeling" in the learning management system (Learning Management Sys-tem) LMS Moodle and, as part of course, laboratory works on math modeling.

In research preformed: analysis of the methods of math modeling, status of e-learning technologies; the development of E-Learning course and a laboratory practical work; technical-economic calculations; analysis of the issues of industrial and environ-mental safety.

In consequence of research been developed an elements of electronic course "Mathematical modeling", laboratory works.

The basic constructive, technological and technical and operational characteristics: e-course is in the Learning Management System LMS Moodle; laboratory practice developed using COMSOL MULTIPHYSICS software system.

Degree of implementation: e-course is used in the educational process for the study of discipline "Mathematical modeling".

Field of application: the educational process in higher educational institutions.

Economic efficiency: in the research budget planning provided a complete and accurate reflection of all planned expenses required for implementation. Were calculated the total costs for research.

In the future, planned the further development of e-learning course and a laboratory practice works, approbation of that practice works.

## **Обозначения и сокращения**

ЛЭП – Линия электропередач

ЭДС – Электродвижущая сила

ПК – Программный комплекс

ПО – Программное обеспечение

СДО – Система дистанционного образования

ПК – Персональный компьютер

LMS – Learning management system

LCMS – Learning content management system

Moodle - Modular object-oriented dynamic learning environment

SCORM - Sharable content object reference model

CMS - Content Management Systems

E-Learning – Electronic learning

Ec – Electrical current

Mf – Magnetic fields

Tl – Transmission line

## **Оглавление**

|                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Обозначения и сокращения.....                                                                                                                                                                       | 10 |
| Введение.....                                                                                                                                                                                       | 13 |
| Глава 1. Теоретическое обоснование принципов создания, структуры и функций электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» .....                                              | 14 |
| 1.1. Задачи создания электронного курса по системе E-Learning.....                                                                                                                                  | 14 |
| 1.2. Проектирование элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» в соответствии с современными требованиями к профессиональной подготовке инженерных кадров..... | 14 |
| 1.3. Обоснование выбора системы управления курсами .....                                                                                                                                            | 15 |
| 1.4. Структура электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» .....                                                                                                          | 17 |
| 1.5. Выводы по главе 1.....                                                                                                                                                                         | 19 |
| Глава 2. Разработка и методика применения компьютерного лабораторного практикума по дисциплине «Математическое моделирование». ....                                                                 | 20 |
| 2.1. Особенности применения компьютерного лабораторного практикума .....                                                                                                                            | 20 |
| 2.2. Описание существующего лабораторного практикума по дисциплине «Математическое моделирование» .....                                                                                             | 20 |
| 2.3. Обоснование необходимости дальнейшего развития лабораторного практикума.....                                                                                                                   | 21 |
| 2.4. Обоснование выбора инструментальных средств для выполнения проектируемых лабораторных работ .....                                                                                              | 21 |
| 2.5. Лабораторная работа №1 .....                                                                                                                                                                   | 26 |
| 2.6 Лабораторная работа №2.....                                                                                                                                                                     | 58 |

|                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.7 Лабораторная работа №3 .....                                                | 73  |
| 2.8 Лабораторная работа №4.....                                                 | 82  |
| 2.9. Выводы по главе 2.....                                                     | 86  |
| Глава 3. Определение параметров двухфазного кабеля.....                         | 87  |
| 3.1. Создание модели двухфазного кабеля. ....                                   | 87  |
| Выводы по главе 3.....                                                          | 94  |
| Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и<br>ресурсосбережение..... | 95  |
| 4.1 Актуальность .....                                                          | 95  |
| 4.2 Задачи исследования.....                                                    | 95  |
| 4.3. Бюджет научного исследования .....                                         | 96  |
| 4.4. Планирование исследования.....                                             | 99  |
| 4.5. Смета на выполнение договора .....                                         | 115 |
| Смета .....                                                                     | 115 |
| 4.6. Вывод по главе 4 .....                                                     | 116 |

## **Введение**

Электроэнергетические системы, как правило, представляют собой крупные сложные системы, распределенные по обширным географическим районам и охватывающие широкий спектр устройств. Математическое моделирование и моделирование играют важную роль в их проектировании и эксплуатации. Электроэнергетические системы и оборудование постоянно совершенствуются и усложняются, что приводит к необходимости совершенствования способов математического моделирования, их упрощению и доступности.

Для дальнейшего развития электроэнергетики необходимо, чтобы студенты, подготавливаемые для нужд энергетики были обучены не только основным знаниям, но и могли внедрять и использовать современное программное обеспечение, обязательное для развития отрасли.

В связи с этим, важную роль играют средства, используемые учебными заведениями для подготовки студентов-энергетиков, какие современные методы используются для создания у студентов знаний и навыков, необходимых для качественной профессиональной деятельности.

Относительно новым и востребованным методом современного обучения является электронный курс. Электронный курс позволяет осуществлять постоянное взаимодействие преподавателя и студентов, осуществлять непрерывный контроль знаний и качество освоения учебного материала.

Цель диссертационного исследования заключается в разработке элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике».

## **Глава 1. Теоретическое обоснование принципов создания, структуры и функций электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике»**

### **1.1. Задачи создания электронного курса по системе E-Learning**

Онлайн курс E-Learning позволяет получить доступ к текстовой и графической информации в любой момент времени и не исключает контакт преподавателей и студентов через форум и чат. Электронный курс упрощает асинхронную работу со студентами и имеет средства автоматического контроля обучения и оценки.

- Простой доступ к учебным материалам в любое время. Система электронного обучения может предоставить необходимую информацию в текстовом и мультимедийном формате.
- Соответствие традиционным формам обучения. Электронный курс может полностью заменить традиционную форму, но может и дополнить её, снимая часть нагрузки с преподавателя и оптимизируя учебный процесс.
- Обратная связь с преподавателем на протяжении всего учебного процесса.

Возможно перспективное развитие электронного курса до полностью автоматизированного процесса обучения.

### **1.2. Проектирование элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» в соответствии с современными требованиями к профессиональной подготовке инженерных кадров**

При проектировании электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» мы опирались на то, что студенты должны получить представление об основах математического моделирования элементов электрической сети, выполнить тестовые задания по каждому разделу и три лабораторных работы – «Создание модели трансформатора в программном

комплексе COMSOL MULTIPHYSICS», «Создание приложения трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS», и

### **1.3. Обоснование выбора системы управления курсами**

#### **1.3.1. Общие сведения**

Сейчас, в связи с быстрым развитием технологий, термин E-Learning становится все более актуальным. E-Learning – это обучение в электронной форме с широким использованием интернет сетей и мультимедиа контента. Для обучающегося носителем системы интернет обучения являются HTML страницы, на которых должны быть представлены все сведения, необходимые для обучения

При разработке учебных курсов преподавателю необходимо пользоваться системами разработки и управления учебными курсами. К основным требованиям относятся:

Функциональность, надежность, наличие средств разработки контента, поддержка, наличие системы оценки и проверки знаний, удобство работы с системой, простота доступа, мультимедийность, Перспективы развития платформы, кросс-платформерность СДО, качество технической поддержки, наличие русской локализации продукта.

Особенностями данной системы обучения являются:

- Поддержка всех видов обучения – Электронный курс, вебинар, электронный тест, практическое задание;
- Возможность асинхронного обучения – Электронный курс, запись вебинара, материалы базы знаний и т.д.;
- Доступ с максимального возможно допустимого перечня устройств и систем – Персональных компьютеров, ноутбуков, смартфонов, windows, android, и т.д.
- Контроль результатов – Подробная статистика по обучению и тестированию в любой момент времени.

### 1.3.2. Сравнительный анализ систем дистанционного обучения

Рассмотрим наиболее популярные системы дистанционного обучения: Moodle, LAMS, Sakai, ATutor, Claroline, OLAT, OpenACS, ILIAS. В сравнительной таблице ниже представлены основные характеристики этих систем дистанционного обучения.

Таблица 1 – Характеристики систем дистанционного обучения

|                                      | Moodle                      | ATutor                      | Claroline                   | Dokeos                      | LAMS                         | OLAT                     | OpenACS                       | Sakai                       |
|--------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Лицензия                             | GNU                         | GPL                         | GNU/GP<br>L                 | GNU/GP<br>L                 | Open<br>Source               | Open<br>Source           | GNU                           | ECL                         |
| Количество пользователей             | 130000                      | 300                         | 685                         | 1000                        | 100                          | 100                      | 1000                          | 5000                        |
| Многоязыковой интерфейс              | Да(54 языка)                | Да (более 30 языков)        | Да (более 30 языков)        | Да (34 языка)               | Да (19 языков)               | Да (8 языков)            | Нет                           | Да(10 языков)               |
| Поддержка русского языка             | Да                          | Да                          | Да                          | Нет                         | частично                     | Нет                      | Нет                           | Да                          |
| Поддержка SCORM                      | Да                          | планируется в 2007          | Да                          | Да                          | Нет                          | Да                       | Нет                           | Да                          |
| Поддержка IMS                        | Да                          | планируется                 | Да                          | Да                          | Нет                          | Да                       | Нет                           | Да                          |
| Структура                            | ядро+набор модулей          | ядро+набор модулей          | монолитная                  | ядро+набор модулей          | монолитная                   | монолитная               | модульная                     | ядро+набор модулей          |
| Возможность расширения               | Да за счет внешних модулей  | Да за счет внешних модулей  | зависит от разработчиков    | Да за счет внешних модулей  | зависит от разработчиков     | зависит от разработчиков | зависит от разработчиков      | Да за счет внешних модулей  |
| Дополнительное ПО                    | Apache, MySQL, PHP          | Apache, MySQL, PHP          | Apache, MySQL, PHP          | Apache, MySQL, PHP          | Apache, JBOSS, Tomcat, MySQL | Java SDK                 | AOLServer, Oracle, PostgreSQL | MySQL, Oracle               |
| Платформа                            | Windows, Linux, Unix, MacOS | Windows, Linux, Unix, MacOS | Windows, Linux, Unix, MacOS | Windows, Linux, Unix, MacOS | Windows, MacOS               | Linux, Unix              | Windows, Linux, Unix, MacOS   | Windows, Linux, Unix, MacOS |
| Система тестирования                 | Да                          | Да                          | Да                          | Да                          | Да                           | Да                       | Да                            | Да                          |
| Поддержка внешних тестов             | Да                          | Нет                         | Нет                         | Нет                         | Нет                          | Да                       | Нет                           | Да                          |
| Ограничение на количество слушателей | Нет                         | Нет                         | 20000                       | Нет                         | Нет                          | Нет                      | Нет                           | Нет                         |

Продолжение Таблицы 1 – Характеристики систем дистанционного обучения

|                                      |                                                 |               |                   |                |               |                |               |                                       |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------|---------------|-------------------|----------------|---------------|----------------|---------------|---------------------------------------|
| Среда разработк и учебного материала | встроенная                                      | встроенная    | встроенная        | встроенная     | встроенная    | Встроенная     | встроенная    | встроенная                            |
| Система проверки знаний              | тесты, задания, семинары, активность на форумах | тесты         | тесты, упражнения | тесты          | тесты         | тесты, задания | тесты         | тесты, задания, активность на форумах |
| Система отчетности                   | развита, постоянно развивается                  | слабо развита | средне развита    | средне развита | слабо развита | слабо развита  | слабо развита | развита, постоянно развивается        |

Анализ характеристик систем дистанционного обучения показывает, что LMS Moodle имеет существенные преимущества, перед остальными системами и соответствует требованиям, предъявляемым к современным СДО, имеет наибольшее количество пользователей, поддержку и постоянно развивается.

#### 1.4. Структура электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике»

##### 1.4.1. Общие сведения об электронном курсе

Электронный курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» предназначен для бакалавров очной формы обучения.

Цель изучения онлайн курса «Математическое моделирование в электроэнергетике» - получение теоретических знаний и практических умений в области математического моделирования с помощью использования современного программного обеспечения для создания нелинейных моделей.

Электронный курс предлагает студентам доступ к лекционному материалу, тестам для контроля знаний, лабораторным и практическим работам.

##### 1.4.2. Структура электронного курса

В электронном курсе «Математическое моделирование в электроэнергетике» всего 5 разделов.

- Алгебраические методы расчета электроэнергетических цепей

- Преобразование координат в электроэнергетике
- Моделирование переходных процессов в электроэнергетике
- Модели элементов энергосистем
- Моделирование в EWB нелинейных электротехнических элементов

Раздел «Модели элементов энергосистем» включает в себя задание на выполнение лабораторных работ «Создание модели трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS», «Создание приложения трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS» и

#### **1.4.3. Порядок работы с электронным курсом**

1. Изучение лекционного материала, в разделах электронного курса
2. Выполнение тестов по каждому разделу с целью контроля знаний
3. Выполнение лабораторных работ
4. Консультации с преподавателем через форум или чат электронного курса

Важно, чтобы преподаватель поддерживал корректную работу электронного курса, развивал его, а также принимал активное участие на форуме, поддерживая связь со студентами. Под корректной работой электронного курса понимается своевременный доступ к лекционным материалам, тестам и заданиям, а также сроков, ограничивающих доступ к заданиям, которые можно увидеть с помощью элемента «предстоящие события». Тесты проверяются в автоматическом режиме, а индивидуальные задания и лабораторные работы должен проверить преподаватель и выставить оценку в журнал электронного курса.

За период прохождения курса, студенты должны набрать минимальное количество баллов, необходимое для допуска к итоговому контролю.

### **1.5. Выводы по главе 1**

В первой главе магистерской работы, основной задачей которой является проектирование элементов электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике», было выполнено:

1. Сформулирована задача математического моделирования в электроэнергетике.
2. В соответствии с современными требованиями к профессиональной подготовке студентов, доказана актуальность и положительное влияние внедрения электронного курса.
3. Сформулированы основные требования и задачи, стоящие перед системой электронного обучения, проведен сравнительный анализ существующих систем и выбрана система Moodle.
4. Спроектированы элементы электронного курса и порядок реализации.

## **Глава 2. Разработка и методика применения компьютерного лабораторного практикума по дисциплине «Математическое моделирование».**

### **2.1. Особенности применения компьютерного лабораторного практикума**

Компьютер является неотъемлемой частью современного образования, как инструмент для удобной передачи и хранения информации, а также открывает новые вычислительные возможности. Сложно представить математическое моделирование в современном представлении без использования компьютера и соответствующего программного обеспечения.

Компьютерные технологии имеют огромные возможностями в области визуализации объектов моделирования и переходных процессов, а также обладают большим потенциалом для развития, что делает их наиболее удобными для восприятия и обучения, а также подчеркивает актуальность их использования.

### **2.2. Описание существующего лабораторного практикума по дисциплине «Математическое моделирование»**

На данный момент существующий лабораторный практикум содержит 4 лабораторных работ:

1. Решение линейных алгебраических уравнений методом простой итерации;
2. Решение линейных алгебраических уравнений методом итерации Зейделя;
3. Расщепление комплексных матриц на действительную и мнимую части. Решения нелинейных алгебраических уравнений в форме баланса токов;
4. Решение нелинейных уравнений узловых напряжений в форме баланса мощности. Метод Ньютона.

Данные лабораторные работы выполняются в программном комплексе Mathcad и рассматривают способы решения линейных и нелинейных алгебраических уравнений на примере расчета электрических схем.

Цель существующего лабораторного практикума – освоить численные методы решения алгебраических уравнений

### **2.3. Обоснование необходимости дальнейшего развития лабораторного практикума**

Одной из причин развития лабораторного практикума является разнообразие программных комплексов, с помощью которых можно осуществлять моделирование элементов или систем электроэнергетики. Mathcad имеет широкие математические возможности и помогает освоить численные методы решения алгебраических уравнений, но модели в данном программном комплексе выглядят сложными и ненаглядными, а также лабораторные работы соответствуют только одному теоретическому разделу.

### **2.4. Обоснование выбора инструментальных средств для выполнения проектируемых лабораторных работ**

Основной задачей математического моделирования является создание точных, с возможностью отображения свойств модели с максимально возможной точностью. Также плюсом является простота создания и использования модели и визуальная составляющая.

Для выполнения этих задач необходима высокая скорость вычислений в большом объеме, а также вывод информации в удобной форме, поэтому для моделирования элементов энергосистем необходимо использовать вычислительную мощность компьютера с использованием современного программного обеспечения.

Это позволит моделировать и изучать элементы энергосистем и даже целые энергосистемы, сократить время расчета и автоматизировать вывод результата в необходимом виде, а также визуальной составляющей.

Все вычисления, необходимые в лабораторных работах, выполняются на компьютере, поэтому рассмотрим современные программные комплексы, отвечающие нашим требованиям к моделированию элементов энергосистем.

#### **2.4.1. Mathcad**

Mathcad – это инженерное математическое программное обеспечение, которое позволяет выполнять важнейшие инженерные расчеты и обмениваться ими.

Представленные в удобном интерфейсе математические обозначения, действующие в режиме реального времени, средства анализа единиц измерения и мощные функции выполнения инженерных расчетов позволяют инженерам и проектно-конструкторским группам документировать и передавать инженерные математические расчеты, критические параметры конструирования и знания в области проектирования и конструирования в целом. Благодаря использованию принципа WYSIWYG пользователь получает результаты расчета в привычной математической форме.

К достоинствам программного обеспечения Mathcad относятся:

1. Возможность выполнения сложных расчетов
2. Интуитивно понятный интерфейс
3. Возможность интеграции с Microsoft Office
4. Возможность написания программ и использования макросов

К недостаткам являются сложность при работе с большими массивами данных, слабые возможности визуализации, а также присутствия только математической составляющей расчета.

### **2.4.2. Electronics Workbench**

Программа Electronics Workbench предназначена для моделирования электрических элементов и схем. Особенностью данной программы является большая библиотека электрических элементов, а также использование физики.

Недостатками данной программы относятся ограниченные возможности моделирования, и сложность создания нелинейных сложных моделей.

### **2.4.3. Matlab Simulink**

Simulink является модулем пакета Matlab и представляет собой «интерактивный инструмент для моделирования, имитации и анализа динамических систем»

К достоинствам Matlab Simulink относятся:

1. Обширная библиотека элементов
2. Возможность интеграции C, C++ и Matlab кодов
3. Высокие вычислительные возможности
4. Визуализация выходных сигналов

К недостаткам можно отнести необходимость хорошей подготовки для построения моделей, недостаточную визуализацию, невозможность создания мультифизических моделей и невозможность учесть все свойства объекта моделирования.

#### 2.4.4. Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics— это основанная на передовых численных методах универсальная программная платформа для моделирования и компьютерного моделирования физических задач. Использование пакета COMSOL Multiphysics позволяет учитывать связанные или «мультифизические» явления. Более 30 дополнительных продуктов позволяют расширять платформу моделирования, используя специальные физические интерфейсы и инструменты для электрических, механических, гидродинамических и химических систем. Дополнительные интерфейсы обеспечивают использование моделирования в пакете COMSOL Multiphysics при технических вычислениях, САПР и автоматизации проектирования электронных приборов.

Достоинствами Comsol Multiphysics являются:

1. Пользовательский интерфейс
2. Возможность интеграции C, C++
3. Сопряжение моделей
4. Интеграция в браузер и возможность работы онлайн в электронном курсе
5. Хорошая возможность визуализации модели и результатов
6. Возможность создания приложений
7. Возможность использования мультифизики, для создания более точной модели
8. Относительная простота создания модели и автоматизация расчета

#### **2.4.5. Обоснование выбора программного обеспечения для проектируемых лабораторных работ**

На основании анализа представленных программных комплексов сделаем выбор программного обеспечения, которое будет использоваться для проектирования и проведения лабораторных работ.

Создание моделей и приложений элементов энергосистем будет производиться в современном программном комплексе Comsol Multiphysics. Основными предпосылками для выбора послужили возможность создания приложений, интеграция с браузером и возможность работы онлайн, через электронный курс, огромные возможности для моделирования и хорошую визуализацию модели и её свойств.

## 2.5. Лабораторная работа №1

### Создание модели трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS

#### 2.5.1. Цель работы

Изучить возможности программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS, а также овладеть основными навыками моделирования в среде COMSOL.

#### Исходные данные

| Номер варианта | Число витков первичной обмотки | Число витков вторичной обмотки | Коэффициент трансформации | Проводимость сердечника, См/м |
|----------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| 1              | 300                            |                                | 10,95                     | 10                            |
| 2              | 300000                         |                                | 1/38,41                   | 40                            |
| 3              |                                | 500                            | 1/2                       | 35                            |
| 4              |                                | 5000                           | 2                         | 45                            |
| 5              | 5                              |                                | 18,25                     | 20                            |
| 6              |                                | 125                            | 1/10                      | 25                            |
| 7              | 200                            |                                | 10,95                     | 15                            |
| 8              | 100                            |                                | 18,25                     | 60                            |
| 9              | 40000                          |                                | 1/18,25                   | 50                            |
| 10             | 5000                           |                                | 1/38,41                   | 55                            |
| 11             |                                | 150000                         | 38,41                     | 65                            |
| 12             |                                | 90000                          | 38,41                     | 5                             |
| 13             |                                | 800                            | 1/10,95                   | 11                            |
| 14             | 800                            |                                | 10,95                     | 12                            |
| 15             | 500                            |                                | 18,25                     | 13                            |

#### 2.5.2. Краткая информация

Трансформаторы – это электрические компоненты, служащие для

передачи электроэнергии. Большинство трансформаторов работают по принципу электромагнитной индукции. Обычный трансформатор состоит из первичной обмотки, вторичной обмотки и ферромагнитного сердечника. На первичную обмотку подается сигнал переменного тока. В результате взаимной индукции наводится ЭДС во вторичной обмотке. Ферромагнитный сердечник служит магнитной цепью и тем самым сводит потери к минимуму.

В трансформаторах могут использоваться несколько типов сердечников, в зависимости от их геометрической формы, например, U, O, E-сердечники, тороидальные или плоские.

### 2.5.3. Описание модели

Рассматривается модель однофазного трансформатора, состоящего из пары E-видных сердечников, которые образуют замкнутую магнитную цепь. Первичные и вторичные обмотки расположены вокруг центральной ножки сердечника, как показано на Рисунке 2.1.

Используется нелинейная зависимость В-Н, включающая эффект магнитного насыщения, для имитации поведения магнитного поля в железном сердечнике. Гистерезис здесь не учитывается. Модель предполагает, что первичная и вторичная обмотки сделаны из тонкой проволоки и имеют некоторое количество витков. Кроме того, модель не учитывает вихревых токов в катушках.

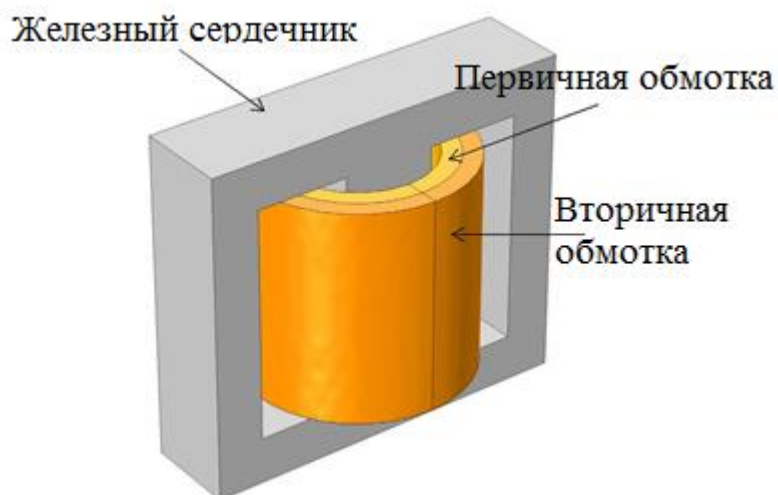


Рисунок 2.5.1. Модель E-видного сердечника

Сопротивление  $R_s$  показано на рисунке 2.2.

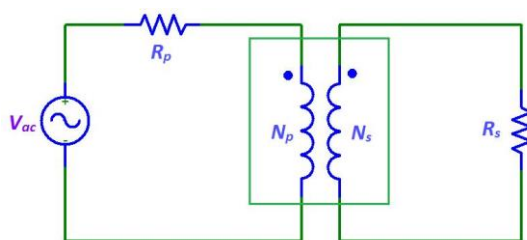


Рисунок 2.5.2. Схема соединения трансформатора с источником питания

Модель рассчитывается для частоты 50 Гц. Некоторые важные параметры, такие как входное напряжение, частота, число витков и сопротивления катушки вводятся с помощью параметров, поэтому могут быть легко изменены.

Трансформатор работает по закону электромагнитной индукции (Фарадея), который гласит, что индуцированное напряжение ( $V_{in}$ ) в катушке, пропорционально скорости изменения магнитного потока ( $\Phi$ ) и числу витков ( $N$ ) в катушке, как показано в уравнении 1.

$$V_{in} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

Если две катушки соединены, то исходя из уравнения 1 получим, что индуцированное напряжение во вторичной катушке ( $V_s$ ) пропорционально напряжению в первичной обмотке ( $V_p$ )

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Где  $N_s$  и  $N_p$  количество витков во вторичной и первичной обмотках, соответственно.  $N_p/N_s$  известен как коэффициент трансформации.

#### 2.5.4. Ход работы

Нажмите **File** в меню, выберите **New**.

##### Начало

1. В окне **New**, кликните **Model Wizard**.

##### Создание модели

1. В окне **Model Wizard**, кликните **3D**.
2. В **Select physics** выберите **AC/DC>Magnetic Fields (mf)**.

3. Кликните **Add**.
4. В **Select physics** выберите **AC/DC>Electrical Circuit (cir)**.
5. Кликните **Add**.
6. Кликните **Study**.
7. В **Select study** выберите **Preset Studies for Selected Physics Interfaces>Time Dependent**.
8. Кликните **Done**.

### Глобальные параметры

Определить все необходимые параметры.

#### *Параметры*

1. В инструменте **Home**, кликните **Parameters**.
2. В подменю **Settings**, разверните **Parameters**.
- 3 Введите параметры, показанные в таблице ниже

Таблица 2.5.1. – Параметры трансформатора

| Name | Expression | Value | Description                     |
|------|------------|-------|---------------------------------|
| Rp   | 100[ohm]   | 100 Ω | Сопротивление первичной обмотки |
| Rs   | 10[kohm]   | 1E4 Ω | Сопротивление вторичной обмотки |
| Np   | 300        | 300   | Число витков первичной обмотки  |
| Ns   | 300        | 300   | Число витков вторичной обмотки  |
| pu   | 50[Hz]     | 50Hz  | Частота напряжения питания      |
| Vac  | 25[V]      | 25V   | Напряжение питания              |

### Геометрия 1

Вставьте геометрию из файла `ecore_transformer_geom_sequence.mph`.

1. В инструменте **Geometry**, кликните **Insert Sequence**.
2. Откройте application's Application Library folder и выберите двойным кликом файл `ecore_transformer_geom_sequence.mph`.

#### *Создание формы*

1. В инструменте **Geometry**, кликните **Build All**.
2. Кликните кнопку **Zoom Extents** в инструменте **Graphics**.

Выберите `wireframe rendering` чтобы получить более полное представление о внутренних частях

3. Кликните кнопку **Wireframe Rendering** в инструменте **Graphics**.

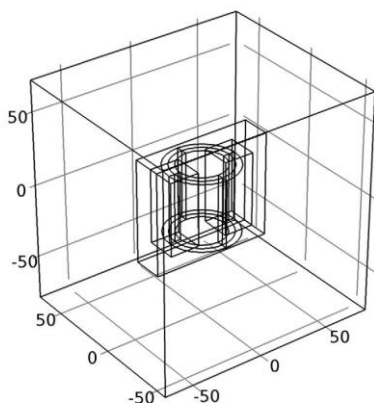


Рисунок 2.5.4 Геометрия

Геометрия выглядит, как показано на рисунке выше

*Вид 1*

В окне **Model Builder**, разверните узел **Component 1 (comp1)>Definitions**, затем

кликните **View 1**.

*Настройка отображения*

В инструменте **View**, с помощью нажатия правой кнопки мыши выберите **Hide Geometric Entities**.

*Вид 1*

1. В окне **Settings** в Hide Geometric Entities, выберите **Geometric Entity Selection**.
2. В **Geometric entity level**, выберите **Boundary**.
3. Выберите Boundaries 1–5 и 56

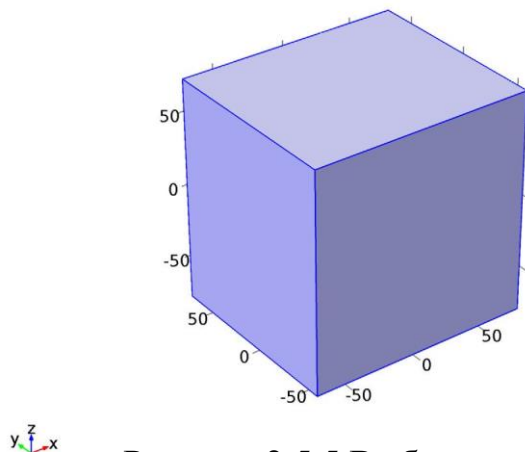


Рисунок 2.5.5 Выбор групп областей

Создаем группы выбранных областей для обмоток и сердечника.

#### *Области*

1. В инструменте **Definitions**, кликните **Explicit**.
2. В окне **Model Builder**, правой кнопкой мышки кликните **Explicit 1** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename Explicit**, введите **Core** в текстовом поле **New label**.
4. Кликните **OK**.
5. Выберите **Domain 2** только.
6. Кликните кнопку **Zoom Extents** в инструменте **Graphics**

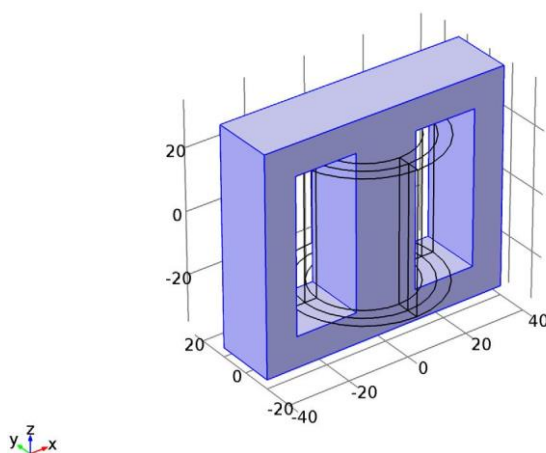


Рисунок 2.5.6. Выбор группы областей

Выбираем области первичной обмотки

#### *Области 2*

1. В инструменте **Definitions**, кликните **Explicit**.
2. В окне **Model Builder**, нажмите правой кнопкой мышки на **Explicit 2** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename Explicit**, введите **Primary Winding** в текстовом поле.
4. **New label**
5. Кликните **OK**.
6. Выберите Domains 5, 6, 8, и 9.

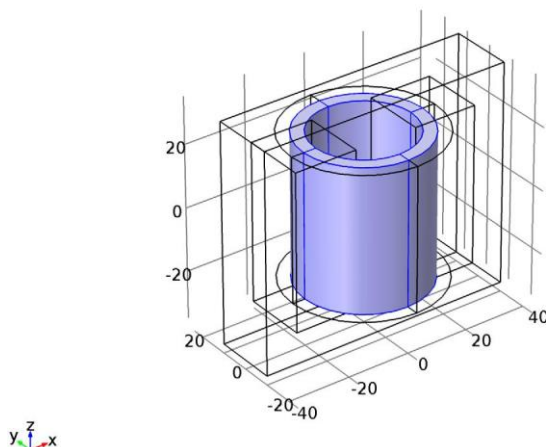


Рисунок 2.5.7. Выбор группы областей вторичной обмотки

Добавляем области вторичной обмотки

*Области 3*

**1** В инструменте **Definitions**, кликните **Explicit**.

**2** В окне **Model Builder**, правой кнопкой мышки кликните на **Explicit 3** и выберите **Rename**.

**3** В диалоговом окне **Rename Explicit** в текстовое поле введите **Secondary Winding**.

**4** Кликните **OK**.

**5** Выберите Domains 3, 4, 7, и 10.

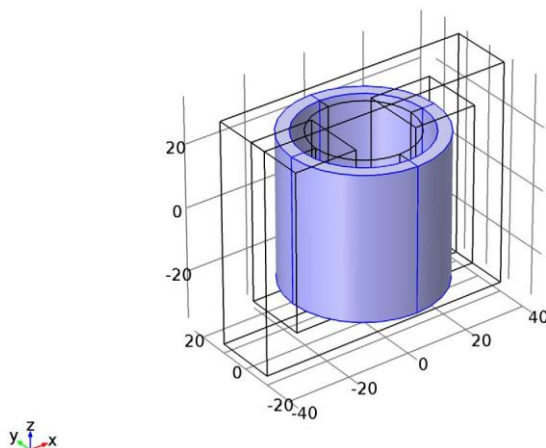


Рисунок 2.5.8. Выбор групп областей 4

#### *Области 4*

1. В инструменте **Definitions**, кликните **Explicit**.
2. В окне **Model Builder**, правой кнопкой мышки кликните на **Explicit 4** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename Explicit**, введите **Windings New label** в текстовое поле.
4. Кликните **OK**.
5. В окне **Settings** в Explicit, разверните **Input Entities**.
6. Кликните **Past Selection**.
7. В диалоговом окне **Paste Selection**, введите 3-10 в **Selection** текстовом поле.
8. Кликните **OK**.

#### *Области 5*

1. В инструменте **Definitions**, кликните **Explicit**.
2. В окне **Model Builder**, правой кнопкой мышкой кликните **Explicit 5** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename Explicit** введите **Primary Winding Insulation** в текстовом поле **New label**.
4. Кликните **OK**.
5. В окне **Settings** в Explicit, разверните **Input Entities**.
6. В **Geometric entity level** Выберите **Boundary**.

7. Кликните **Past Selection**.

8. В диалоговом окне **Past Selection** введите 22-29,36-39,41-43,45 в **Selection** текстовое поле.

9. Кликните **OK**.

Выбираем внешние границы поверхности вторичной обмотки

*Области 6*

1. В инструменте **Definitions** кликните **Explicit**.

2. В окне **Model Builder** кликните правой кнопкой мышки на **Explicit 6** и выберите **Rename**.

3. В диалоговом окне **Rename Explicit** введите **Secondary Winding Insulation** в текстовое поле

**New label.**

4. Кликните **OK**.

5. В окне **Settings Explicit**, разверните **Input Entities**.

6. В **Geometric entity level** выберите **Boundary**.

7. Кликните **Past Selection**.

8. В диалоговом окне **Paste Selection** введите 15-20,22,23,32-34,36,45-48 в текстовое поле

**Selection.**

9. Кликните **OK**.

Теперь, настроим физику магнитного поля.

**Магнитное поле**

1. В окне инструмента **Model Builder** кликните кнопку **Show** и выберите **Discretization** в меню.

2. В окне **Settings** в **Magnetic Fields**, кликните чтобы развернуть **Discretization**.

3. В **Magnetic vector potential** выберите **Linear**.

Применим закон ампера к воздуху вокруг трансформатора

*Закон Ампера*

1. В инструменте **Physics** кликните **Domains** и выберите **Ampère's Law**.

2. В окне **Settings** в Ampère's Law, разверните **Domain Selection**
3. В **Selection** выберите **Core**.
4. Разверните **Magnetic Field** в **Constitutive relation**, выберите **HB curve**.

#### *Катушка 1*

1. В инструменте **Physics** кликните **Domains** и выберите **Multi-Turn Coil**.
2. В окне **Settings** в Multi-Turn Coil, разверните **Domain Selection**.
3. В **Selection** выберите **Primary Winding**.
4. Разверните **Multi-Turn Coil** в **Coil type**, выберите **Numeric**.
5. Найдите подраздел **Coil parameters**. В текстовом поле  $N$  введите  $N_p$ .
6. В **Coil excitation** выберите **Circuit (current)**.
7. В окне **Model Builder** разверните **Multi-Turn Coil**

#### *Вход 1*

1. В окне **Model Builder** разверните **Component 1 (comp1)>Magnetic Fields (mf)>Multi-Turn Coil 1>Geometry Analysis 1**, затем кликните **Input 1**.
2. Выберите Boundary 35.

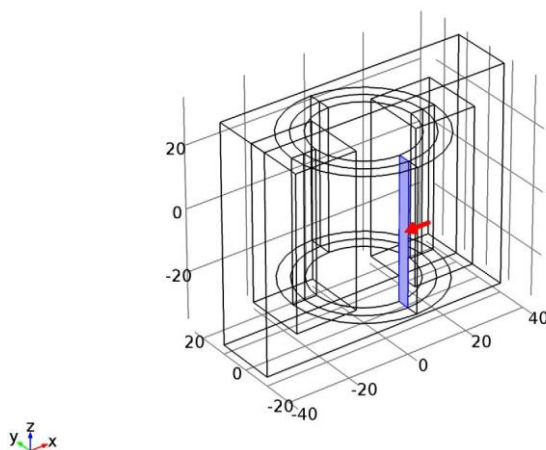


Рисунок 2.5.9. Выбор сечения катушки

#### *Катушка 2*

1. В инструменте **Physics**, кликните **Domains** и выберите **Multi-Turn Coil**.
2. В окне **Settings** в Multi-Turn Coil, разверните **Domain Selection**.
3. В **Selection** выберите **Secondary Winding**.

4. Разверните **Multi-Turn Coil**. В **Coil type** выберите **Numeric**.
5. Найдите подраздел **Coil parameters**. В текстовое поле  $N$ , введите  $N_s$ .
6. В **Coil excitation** выберите **Circuit (current)**.
7. В окне **Model Builder**, разверните узел **Multi-Turn Coil 2**.

*Вход 1*

1. В окне **Model Builder** разверните **Component 1 (comp1)**>**Magnetic Fields (mf)**>**Multi-Turn Coil 2**>**Geometry Analysis 1**, затем кликните **Input 1**.
2. Выберите Boundary 31.

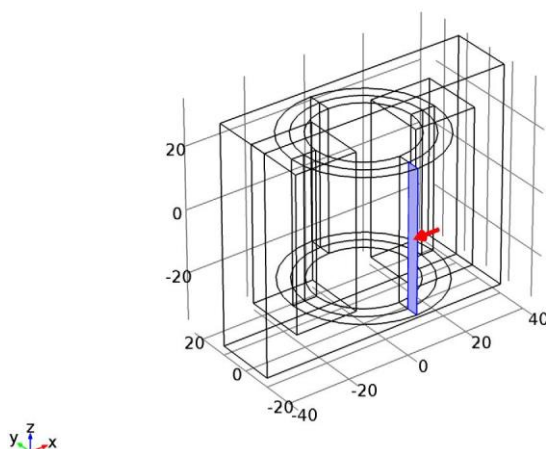


Рисунок 2.5.10. Выбор сечения катушки

*Gauge Fixing for A-Field 1*

1. В инструменте **Physics**, кликните **Domains** и выберите **Gauge Fixing for A-Field**.
2. В окне **Settings** в Gauge Fixing for A-Field, разверните **Domain Selection**.
3. В **Selection** выберите **All domains**.

**Электрическая цепь**

Добавьте внешние элементы к первичной и вторичной обмотке, как показано на Рисунке 2.2.

1. В окне **Model Builder** под **Component 1 (comp1)** кликните **Electrical Circuit (cir)**.

### *Источник напряжения 1*

1. В инструменте **Electrical Circuit** кликните **Voltage Source**.
2. В окне **Settings** в Voltage Source разверните **Node Connections**.
3. В таблицу введите следующие параметры.

Таблица 2.5.2. – Узлы цепи

| Label | Node names |
|-------|------------|
| p     | 1          |
| n     | 0          |

- 4 Разверните **Device Parameters**. В **Source type** выберите **Sine source**.
- 5 В текстовое поле  $V_{src}$  введите  $V_{ac}$ .
- 6 В текстовое поле  $f$  введите  $\omega$ .

### *Внешние порты ввода I и U 1*

1. В инструменте **Electrical Circuit** кликните **External I Vs. U**.
2. В окне **Settings** в External I Vs. U, разверните **Node Connections**.
3. В таблицу введите следующие параметры.

4. Таблица 2.5.3. – Узлы цепи

| Label | Node names |
|-------|------------|
| p     | 2          |
| n     | 1          |

5. Разверните **External Device**. В  $V$  выберите **Coil voltage (mf/mtcd1)**.

### *Резистор 1*

1. В инструменте **Electrical Circuit** кликните **Resistor**.
2. В окне **Settings** в Resistor, разверните **Node Connections**.
3. В таблицу введите следующие параметры:

Таблица 2.5.4. – Узлы цепи

| Label | Node names |
|-------|------------|
| p     | 0          |
| n     | 2          |

4. Разверните **Device Parameters**. В текстовое поле  $R$  введите  $R_p$ .

### *Внешние порты ввода I и U 2*

1. В инструменте **Electrical Circuit** кликните **External I Vs. U**.
2. В окне **Settings** в External I Vs. U, разверните **Node Connections**.
3. В таблицу введите следующие параметры:

Таблица 2.5.5. – Узлы цепи

| Label | Node names |
|-------|------------|
| p     | 3          |
| n     | 0          |

4. Разверните **External Device**. В *V* выберите **Coil voltage (mf/mtcd2)**.

### *Резистор 2*

1. В инструменте **Electrical Circuit** кликните **Resistor**.
2. В окне **Settings** в Resistor, разверните the **Node Connections** section.
3. В таблицу введите следующие параметры:

Таблица 2.5.6. – Узлы цепи

| Label | Node names |
|-------|------------|
| p     | 0          |
| n     | 3          |

4. Разверните **Device Parameters**. В текстовом поле *R* введите *Rs*.

Добавим материалы в модель. Начните с добавления воздуха, во все области.

### **Добавить материал**

1. В инструменте **Home** кликните **Add Material** чтобы развернуть окно **Add Material**.
2. Перейдите в окно **Add Material**.
3. Раскройте **Built-In>Air**.
4. Кликните **Add to Component** в окне инструментов.

### **Материалы**

#### *Воздух (материал 1)*

Изменим значение проводимости на 10 См/м. Это маленькое значение проводимости поможет стабилизировать решение модели.

1. В окне **Model Builder** под **Component 1 (comp1)>Materials** кликните **Air (mat1)**.

2. В окне **Settings** в Material, разверните **Material Contents**.

В таблицу введите следующие параметры:

Таблица 2.5.7. – Параметры материала

| Property                | Name  | Value   | Unit | Property group |
|-------------------------|-------|---------|------|----------------|
| Electrical conductivity | sigma | 10[S/m] | S/m  | Basic          |

Далее, добавим железо (без потерь) для сердечника. Изменим его проводимость на 10 С/м

### Добавить материал

1. Перейдите в окно **Add Material**.
2. Выберите **AC/DC>Soft Iron (without losses)**.
3. Кликните **Add to Component** в окне инструментов.

### Материалы

*Железо (без потерь) (материал 2)*

В окне **Model Builder** под **Component 1 (comp1)>Materials** кликните **Soft Iron (without losses) (mat2)**.

*Интерполяция*

1. В окне **Model Builder** разверните **Component 1 (comp1)>Materials>Soft Iron (without losses) (mat2)>BH curve (BH Curve)**, затем кликните **Interpolation (BH)**.
2. В окне **Settings** в Interpolation, разверните the **Interpolation and Extrapolation**.
3. В **Extrapolation** выберите **Constant**.

4. Кликните на кнопку **Plot**.

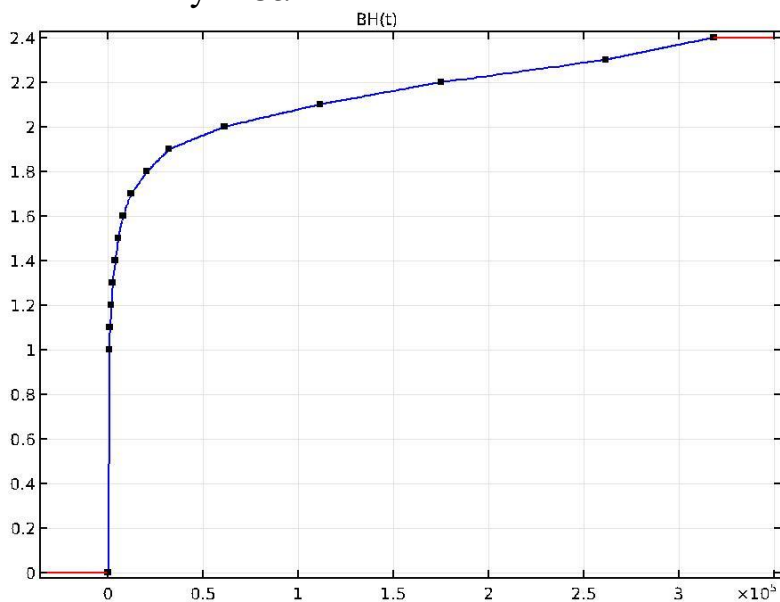


Рисунок 2.5.11. Интерполяция кривой намагничивания

### Сетка 1

1. В окне **Model Builder** под **Component 1 (comp1)** кликните **Mesh 1**.
2. В окне **Settings** в Mesh, разверните **Mesh Settings**.
3. В **Element size** выберите **Extra coarse**.

#### *Настройка сетки*

1. Щелкните правой кнопкой мышки на **Component 1 (comp1)>Mesh 1** и выберите **Free Tetrahedral**.
2. В окне **Settings** в Free Tetrahedral, разверните **Domain Selection**.
3. В **Geometric entity level** выберите **Entire geometry**.

#### *Размер l*

1. Щелкните правой кнопкой мышки на **Component 1 (comp1)>Mesh 1>Free Tetrahedral 1** и выберите **Size**.
2. В окне **Settings** в Size, разверните **Geometric Entity Selection**.
3. В **Geometric entity level** выберите **Domain**.
4. Кликните **Past Selection**.
5. В диалоговом окне **Paste Selection** введите 2-10 в **Selection** текстовом поле.
6. Кликните **OK**.

7. В окне **Settings Size**, разверните **Element Size**.
8. Кликните кнопку **Custom**.
9. Разверните **Element Size Parameters**. Отметьте **Maximum element size** галочкой.
10. В текстовом поле введите 8.
11. Кликните the **Build All** button.

После настройки скройте невидимы части, с помощью нажатия на кнопку **View Unhidden Only**, должна остаться видна только сетка, как показано на рисунке ниже. Здесь используется грубая сетка, для быстрого расчета. Для более точного моделирования следует использовать более тонкую сетку.

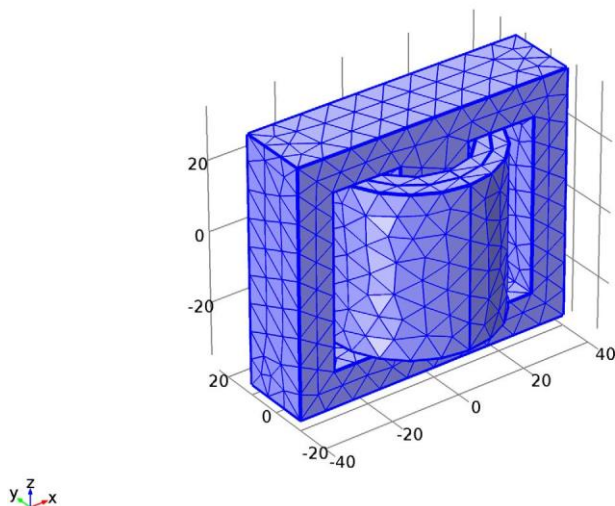


Рисунок 2.5.12. Настройка сетки

## STUDY 1

1. В окне **Model Builder**, кликните **Study 1**.
2. В окне **Settings Study**, разверните **Study Settings**.
3. Уберите галочку **Generate default plots**.

### *Анализ геометрии катушки*

В инструменте **Study**, кликните **Study Steps** и выберите **Other>Coil Geometry Analysis**.

### *Шаг 2: Зависимость от времени*

1. В окне **Model Builder** под **Study 1** щелкните правой кнопкой **Step 2: Coil Geometry Analysis** и выберите **Move Up**.

Решение во времени 0-50 мс.

2. В окне **Model Builder** под **Study 1** кликните **Step 2: Time Dependent**.

3. В окне **Settings** для Time Dependent, разверните **Study Settings**.

4. В текстовом поле **Times** введите **range(0,5e-4,0.05)**.

5. Поставьте галочку **Relative tolerance**.

6. В соответствующем поле введите 0.001.

Следуйте шагам, описанным ниже, чтобы настроить расчет. Такая настройка необходима для того, чтобы расчет использовал нелинейность В-Н характеристики в большом промежутке времени. Так как уравнения являются нелинейными...

### *Решение 1*

1. В инструменте **Study** кликните **Show Default Solver**.

2. В окне **Model Builder**, разверните **Solution 1 (sol1)**.

3. В окне **Model Builder**, разверните **Study 1>Solver Configurations>Solution 1 (sol1)>Time-Dependent Solver 1**.

4. Щелкните правой кнопкой мышки на **Study 1>Solver Configurations>Solution 1 (sol1)>Time-Dependent Solver 1** и выберите **Fully Coupled**.

5. Щелкните правой кнопкой мышки на **Study 1>Solver Configurations>Solution 1 (sol1)>Time-Dependent Solver 1>Direct** и выберите **Enable**.

6. В окне **Model Builder** под **Study 1>Solver Configurations>Solution 1 (sol1)>Time-Dependent Solver 1** кликните **Fully Coupled 1**.

7. В окне **Settings** для Fully Coupled, разверните **Method and termination**.
8. Разверните **Method and Termination**. В **Jacobian update**, выберите **On every iteration**.
9. В текстовое поле **Maximum number of iterations** введите 25.
10. В инструменте **Study**, кликните **Compute**. Результат  
В окне **Model Builder** разверните Results.

#### *Наборы данных*

Создадим отдельные наборы данных для областей обмоток и сердечника. Это полезно для визуализации результата в разных областях, независимо друг от друга.

1. В окне **Model Builder**, разверните **Results>Data Sets**.

#### *Области*

2. Щелкните правой кнопкой мышки на **Study 1/Solution 1 (sol1)** и выберите **Duplicate**.
3. В инструменте **Results**, кликните **Selection**.

#### *Наборы данных*

1. В окне **Settings** в Selection разверните **Geometric Entity Selection**.
2. В **Geometric entity level** выберите **Domain**.
3. В **Selection** выберите **Primary Winding**.
4. Выберите **Propagate to lower dimensions** и отметьте галочкой.
5. Щелкните правой кнопкой мышки на **Selection** и выберите **Rename**.
6. В диалоговом окне **Rename Selection** введите Primary Winding в текстовом поле **New label**.
7. Кликните **OK**.

#### *Selection*

1. В окне **Model Builder**, под **Results>Data Sets** щелкните правой кнопкой мышки на **Study 1/Solution 1 (1) (sol1)** и выберите **Duplicate**.
2. В инструменте **Results** кликните **Selection**.

### *Наборы данных*

1. В окне **Settings** в **Selection**, разверните **Geometric Entity Selection**.
2. В **Geometric entity level** выберите **Domain**.
3. В **Selection** выберите **Secondary Winding**.
4. Выберите **Propagate to lower dimensions** и отметьте галочкой.
5. Щелкните правой кнопкой мышки на **Selection** и выберите **Rename**.
6. В диалоговом окне **Rename Selection** введите **Secondary Winding** в **New label**
7. Кликните **OK**.

### *Области*

1. В окне **Model Builder** под **Results>Data Sets** щелкните правой кнопкой мышки на **Study 1/Solution 1**  
(1) (sol1) и выберите **Duplicate**.
2. В инструменте **Results** кликните **Selection**.

### *Наборы данных*

1. В окне **Settings** в **Selection**, разверните **Geometric Entity Selection**.
2. В **Geometric entity level** выберите **Domain**.
3. В **Selection** выберите **Core**.
4. Выберите **Propagate to lower dimensions** и отметьте галочкой.
5. Щелкните правой кнопкой мышки на **Selection** и выберите **Rename**.
6. В диалоговом окне **Rename Selection** введите **Core** в **New label** текстовом поле.
7. Кликните **OK**.

### *Области*

В инструменте **Results** toolbar, кликните **Selection**.

### *Наборы данных*

1. В окне **Settings** в **Selection**, разверните **Geometric Entity Selection**.
2. В **Geometric entity level**, выберите **Domain**.
3. Кликните **Past Selection**.

4. В диалоговом окне **Paste Selection** введите 2,4,6-10 в текстовом поле **Selection**.

5. Кликните **OK**.

Следуйте следующим шагам, чтобы создать поверхностный график магнитных потоков в плоскости и стрелки токов в обмотках, как показано на рисунке 2.3.

Так как величина тока во вторичной обмотке значительно меньше, чем в первичной, будут использованы два отдельных участка со стрелками (в разных масштабах).

### *3D график 1*

1. В инструменте **Results**, кликните **3D Plot Group**.

2. В окне **Model Builder**, щелкните правой кнопкой мышки на **3D Plot Group 1** и выберите **Surface**.

3. Щелкните правой кнопкой мышки на **3D Plot Group 1** и выберите **Arrow Volume**.

4. В окне **Settings** в Arrow Volume, разверните **Data**.

5. В **Data set**, выберите **Study 1/Solution 1 (3) (sol1)**.

1. Кликните **Replace Expression** в верхнем правом углу области **Expression**. Из menu, выберите **Component 1>Magnetic Fields>Currents and charge>mf.Jx,mf.Jy,mf.Jz - Current density**.

2. Разверните the **Arrow Positioning**. Найдите **x grid points** подраздел. В **Points** текстовом поле, введите

3. Найдите подраздел **y grid points**. В текстовом поле **Points** введите 10.

4. Найдите подраздел **z grid points**. В текстовом поле **Points** введите 5.

5. Разверните **Coloring and Style**. В **Color**, выберите **Blue**.

6. Щелкните правой кнопкой мышки на **Results>3D Plot Group 1>Arrow Volume 1** и выберите **Duplicate**.

7. В окне **Settings** в Arrow Volume, разверните **Data**.

8. В **Data set**, выберите **Study 1/Solution 1 (4) (sol1)**.

9. Разверните the **Coloring and Style** section. From the **Color**, выберите **Black**.
10. В инструменте **3D Plot Group 1**, кликните **Plot**.

Выполните следующие действия для воспроизведения магнитного потока в плоскости, как показано на рисунке 2.4.

### *3D график 2*

1. В инструменте **Home**, кликните **Add Plot Group** и выберите **3D Plot Group**.
2. В окне **Settings** в **3D Plot Group**, разверните **Data**.
3. В **Data set**, выберите **Study 1/Solution 1 (5) (sol1)**.
4. Щелкните правой кнопкой мышки на **3D Plot Group 2** и выберите **Slice**.
5. В окне **Settings** в **Slice**, разверните **Plane Data**.
6. В **Plane**, выберите **zx-planes**.
7. В текстовом поле **Planes** введите 1.
8. Щелкните правой кнопкой мышки на **3D Plot Group 2** и выберите **Arrow Volume**.
9. В окне **Settings** в **Arrow Volume**, разверните **Arrow Positioning**.
10. Найдите подраздел **x grid points**. В текстовом поле **Points** введите 10.
11. Найдите подраздел **y grid points**. В текстовом поле **Points** введите 1.
12. Найдите подраздел **z grid points**. В текстовом поле **Points** введите 10.
13. Разверните **Coloring and Style**. В **Arrow type**, выберите **Cone**.
14. Выберите **Scale factor** и отметьте галочкой.
15. В текстовом поле **associated** введите 30.
16. В **Color** выберите **Black**.
17. В инструменте **3D Plot Group 2**, кликните **Plot**.

Следующий график напряжения в первичной обмотке.

### *1D график 3*

1. В инструменте **Home**, кликните **Add Plot Group** и выберите **1D Plot Group**.
2. В окне **Model Builder** щелкните правой кнопкой мышки на **1D Plot Group**

3 и выберите **Rename**.

3. В диалоговом окне **Rename 1D Plot Group** введите Induced voltage in primary in the **New label**.

4. Кликните **OK**.

5. В окне **Settings** window в 1D Plot Group, разверните **Plot Settings**.

6. Выберите **x-axis label** и отметьте галочкой.

7. В текстовом поле associated введите Time (seconds).

8. Выберите **y-axis label** и отметьте галочкой.

9. В текстовом поле associated введите Induced voltage in primary (V).

В инструменте **Induced voltage in primary**, кликните **Global**.

*Входное первичное напряжение*

1. В **Settings** в окне Global, кликните **Replace Expression** в правой верхней части the **y-axis data** section. Из menu, выберите **Component 1>Magnetic Fields>Coil parameters>mf.VCoil\_1 - Coil voltage** Разверните the **y-Axis Data** section. В таблицу введите следующие параметры

Таблица 2.5.8. – Напряжение первичной обмотки

| Expression | Unit | Description                        |
|------------|------|------------------------------------|
| mf.VCoil_1 | V    | Induced voltage in primary winding |

2. Кликните чтобы развернуть **Legends**. Очистите **Show legends** и поставьте галочки.
3. В инструменте **Induced voltage in primary**, кликните **Plot**.

График напряжения во вторичной обмотке изображен на рисунке 2.6.

*1D график 4*

1. В инструменте **Home**, кликните **Add Plot Group** и выберите **1D Plot Group**.
2. В окне **Model Builder** щелкните правой кнопкой мышки на **1D Plot Group 4** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename 1D Plot Group** введите Induced voltage in secondary в **New label**.
1. Кликните **OK**.

2. В окне **Settings** в 1D Plot Group, разверните **Plot Settings**.
  3. Выберите the **x-axis label** и отметьте галочкой.
  4. В текстовом поле associated введите Time (seconds).
  5. Выберите the **y-axis label** и отметьте галочкой.
  6. В текстовом поле associated введите Induced voltage in secondary (V).
- В инструменте **Induced voltage in secondary**, кликните **Global**.

#### *Входное вторичное напряжение*

1. В окне **Settings** window в Global, кликните **Replace Expression** в верхней правой области **y-axis data**. From the menu, выберите **Component 1>Magnetic Fields>Coil parameters>mf.VCoil\_2 - Coil voltage**.
2. Разверните the **y-Axis Data** section. В таблицу введите следующие параметры

Таблица 2.5.9. – Напряжение вторичной обмотки

| Expression | Unit | Description                          |
|------------|------|--------------------------------------|
| mf.VCoil_2 | V    | Induced voltage in secondary winding |

3. Разверните the **Legends** section. Clear the **Show legends** check box.
  4. В инструменте **Induced voltage in secondary**, кликните **Plot**.
- Plot the current in the primary winding and compare the plot with [Figure 7](#).

#### *1D график 5*

1. В инструменте **Home** toolbar, кликните **Add Plot Group** и выберите **1D Plot Group**.
2. В окне **Model Builder** щелкните правой кнопкой мышки на **1D Plot Group 5** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename 1D Plot Group** введите Current in primary winding в **New label**.
4. Кликните **OK**.
5. В окне **Settings** в 1D Plot Group, разверните **Plot Settings**.
6. Выберите **x-axis label** и отметьте галочкой.
7. В текстовом поле associated введите Time (seconds).

8. Выберите **y-axis label** и отметьте галочкой.
9. В текстовом поле associated введите Current in primary winding (A).

#### *Global 1*

1. В инструменте **Current in primary winding** кликните **Global**.
2. В окне **Settings** в Global, кликните **Replace Expression** в верхнем правом углу области **y-axis data**. Из меню, выберите **Component 1>Magnetic Fields>Coil parameters>mf.ICoil\_1 - Coil current**.
3. Разверните **y-Axis Data**. В таблицу введите следующие параметры:
4. Разверните **Legends**. Очищаем **Show legends** и отмечаем галочкой.
5. В инструменте **Current in primary winding**, кликните **Plot**.

Таблица 2.5.10. – Токи в первичной обмотке

| Expression | Unit | Description                |
|------------|------|----------------------------|
| mf.ICoil_1 | A    | Current in primary winding |

#### *1D график 6*

1. В инструменте **Home**, кликните **Add Plot Group** и выберите **1D Plot Group**.
2. В окне **Model Builder** щелкните правой кнопкой мышки на **1D Plot Group 6** и выберите **Rename**.
3. В диалоговом окне **Rename 1D Plot Group** введите Current in secondary winding.
4. Кликните **OK**.
5. В окне **Settings** в 1D Plot Group, разверните **Plot Settings**.
6. Выберите **x-axis label** и отметьте галочкой.
7. В текстовое поле associated вводим Time (seconds).
8. Выбираем the **y-axis label** и отмечаем галочками.
9. В текстовом поле associated введите Current in secondary winding (A).

В инструменте **Current in secondary winding** кликните **Global**.

#### *Токи во вторичной обмотке*

1. В окне **Settings** в Global, кликните **Replace Expression** в верхней правой

части области **y-axis data**. Из меню выберите **Component 1>Magnetic Fields>Coil parameters>mf.ICoil\_2 - Coil current**

2. Разверните **y-Axis Data**. В таблицу введите следующие параметры:

Разверните **Legends**. Очистите **Show legends** и отметьте галочками

3. В инструменте **Current in secondary winding**, кликните **Plot**. Сравнить график с Рисунком

Таблица 2.5.11. – Токи во вторичной обмотке

| Expression | Unit | Description                  |
|------------|------|------------------------------|
| mf.ICoil_2 | A    | Current in secondary winding |

Изменим модель, для моделирования понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации 1000 и  $R_p = R_s$ . Так же изменим напряжения питания  $V_s = 25\text{kV}$

## GLOBAL DEFINITIONS

### Параметры

1. В окне **Model Builder**, разверните **Global Definitions**, затем кликните **Parameters**.

2. В окне **Settings** в Parameters, разверните the **Parameters**.

3. В таблицу введите следующие параметры:

Таблица 2.5.12. – Параметры катушек

| Name     | Expression | Value        | Description                        |
|----------|------------|--------------|------------------------------------|
| $R_s$    | 100[ohm]   | 100 $\Omega$ | Secondary side resistance          |
|          |            |              |                                    |
| $N_p$    | 3e5        | 3E5          | Number of turns in primary winding |
|          |            |              |                                    |
| $V_{ac}$ | 25[kV]     | 2.5E4 V      | Supply voltage                     |

## ADD STUDY

1. В инструменте **Home**, кликните **Add Study** чтобы открыть окно **Add Study**.

2. Перейти в окно **Add Study**.

3. Найти подраздел **Studies**. В **Select study** выбрать **Preset Studies>Time Dependent**.

4. Кликните **Add Study** в окне инструментов.

5. В инструменте **Home**, кликните **Add Study** чтобы закрыть окно the **Add Study**.

## **STUDY 2**

1. В окне **Model Builder**, кликните **Study 2**.
2. В окне **Settings** в **Study**, разверните the **Study Settings**.
3. Очистите **Generate default plots** и отметьте галочками.

### *Анализ геометрии катушек*

On the **Study** toolbar, кликните **Study Steps** и выберите **Other>Coil Geometry Analysis**.

### *Шаг 2: Зависимость от времени*

1. В окне **Model Builder** под **Study 2** щелкните правой кнопкой мышки на **Step 2: Coil Geometry Analysis** и выберите **Move Up**.
2. В окне **Model Builder** под **Study 2** кликните **Step 2: Time Dependent**.
3. В окне **Settings** в **Time Dependent**, разверните the **Study Settings**.
4. В текстовом поле **Times** введите range(0,5e-4,0.05).
5. Выберите **Relative tolerance** и отметьте галочкой.
6. В associated введите 0.001.

### *Решение 3*

1. В инструменте **Study**, кликните **Show Default Solver**.
2. В окне **Model Builder**, разверните the **Solution 3 (sol3)**.
3. В окне **Model Builder**, разверните the **Study 2>Solver Configurations>Solution 3 (sol3)>Time-Dependent Solver 1** node.
4. Щелкните правой кнопкой мышки на **Study 2>Solver Configurations>Solution 3 (sol3)>Time-Dependent Solver 1** и выберите **Fully Coupled**.
5. Щелкните правой кнопкой мышки на **Study 2>Solver Configurations>Solution 3 (sol3)>Time-Dependent Solver 1>Direct** и выберите **Enable**.
6. В окне **Model Builder** под **Study 2>Solver Configurations>Solution 3**

(sol3)>**Time-Dependent Solver 1** кликните **Fully Coupled 1**.

7. В окне **Settings** в Fully Coupled, разверните **Method and Termination**.

8. В **Jacobian update**, выберите **On every iteration**.

9. В текстовое поле **Maximum number of iterations** введите 25.

10. В инструменте **Study**, кликните **Compute**.

## RESULTS

График напряжения в первичной обмотке понижающего трансформатора.

*1D график 7*

1. В инструменте **Home**, кликните **Add Plot Group** и выберите **1D Plot Group**.

2. В окне **Model Builder** window, Щелкните правой кнопкой мышки на **1D Plot Group 7** и выберите **Rename**.

3. В диалоговом окне **Rename 1D Plot Group** введите Induced voltage in primary-II.

4. Кликните **OK**.

5. В окне **Settings** в 1D Plot Group, разверните the **Data**.

6. В **Data set** выберите **Study 2/Solution 3 (sol3)**.

7. Разверните **Plot Settings**. Выберите **x-axis label** и отметьте галочкой.

8. В текстовое поле associated введите Time (seconds).

9. Выберите **y-axis label** и отметьте галочкой.

10. В текстовом поле associated введите Induced voltage in primary (V).

*Global 1*

В инструменте **Induced voltage in primary** кликните **Global**.

*Входное напряжение первичной обмотки-2*

1. В окне **Settings** в Global, кликните **Replace Expression** в верхней правой области **y-axis data**. Из меню, выберите **Component 1>Magnetic Fields>Coil parameters>mf.VCoil\_1 - Coil voltage**

2. Разверните **y-Axis Data**. В таблицу введите следующие параметры:

3. Разверните **Legends**. Очистите **Show legends** и отметьте галочками.

4. В инструменте **Induced voltage in primary-II**, кликните **Plot**.

Таблица 2.5.13. Напряжение первичной обмотки

| Expression | Unit | Description                |
|------------|------|----------------------------|
| mf.VCoil_1 | V    | Induced voltage in primary |

И, наконец, график напряжения во вторичной обмотке для понижающего трансформатора.

#### *1D график 8*

1 В инструменте **Home**, кликните **Add Plot Group** и выберите **1D Plot Group**.

2 В окне **Model Builder** щелкните правой кнопкой мышки на **1D Plot Group 8** и выберите **Rename**.

3 В диалоговом окне **Rename 1D Plot Group** введите Induced voltage in secondary-II.

4 Кликните **OK**.

5 В окне **Settings** в 1D Plot Group, разверните **Data**.

6 В **Data set** выберите **Study 2/Solution 3 (sol3)**.

7 Разверните **Plot Settings**. Выберите **x-axis label** и отметьте галочкой.

8 В текстовое поле associated введите (seconds).

9 Выберите **y-axis label** и отметьте галочкой.

10 В текстовое поле associated введите Induced voltage in secondary (V).

В инструменте **Induced voltage in secondary-II**, кликните **Global**.

Таблица 2.5.14. Напряжение вторичной обмотки

| Expression | Unit | Description                  |
|------------|------|------------------------------|
| mf.VCoil_2 | V    | Induced voltage in secondary |

1. В окне **Settings** в **Global**, кликните **Replace Expression** в верхней части области **y-axis data**. Из меню, выберите **Component 1>Magnetic Fields>Coil parameters>mf.VCoil\_2 - Coil voltage**.
2. Разверните **y-Axis Data**. В таблицу введите следующие параметры:
3. Разверните **Legends**. Очистите **Show legends** и отметьте галочками.
4. В инструменте **Induced voltage in secondary-II** кликните **Plot**.

### 2.5.5 Результаты

На рисунке 2.5.13 показано распределение магнитных потоков. На рисунке 2.5.14 показаны распределения токов в обмотках при  $t=50\text{мс}$ . Рисунок 2.5.14 и Рисунок 2.5.15 отображают напряжения в первичной и вторичной обмотках соответственно. Так как число витков на каждой обмотке равно, индуцированное напряжение в обеих обмотках такие же, как в уравнении 2. Токи, протекающие через первичную и вторичную обмотки показаны на рисунке 2.5.7 и рисунке 8 соответственно. Рисунок 2.5.19 отображает напряжение, индуцированное в первичной обмотке для понижающего трансформатора с коэффициентом трансформации  $N_p/N_s=1000$  и напряжением питания 25 кВ.

Индукцированное напряжение во вторичной обмотке для понижающего трансформатора отображается на рисунке 2.20. Это Наведенное напряжение в 1000 раз меньше по сравнению с напряжением в первичной обмотке, показанной на рисунке 2.19.

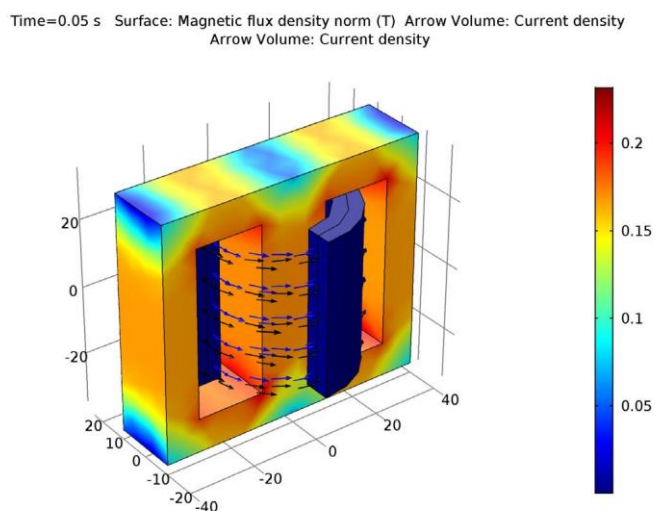


Рисунок 2.5.13: Магнитные потоки и токи в обмотке при  $t = 50\text{ms}$ .

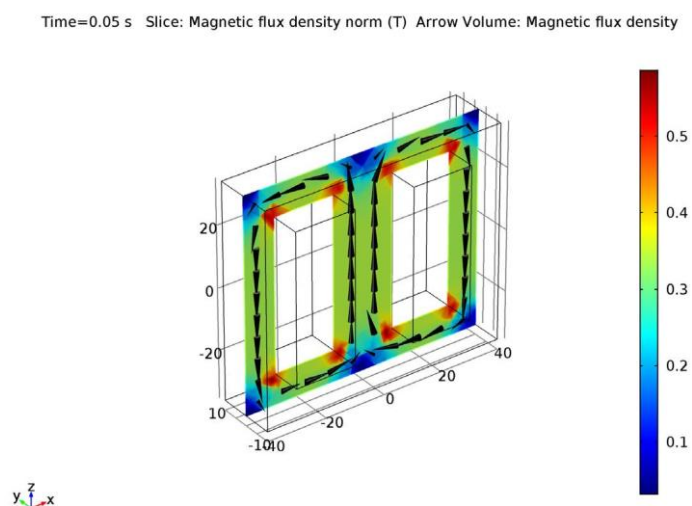


Рисунок 2.5.14: Магнитные потоки в сердечнике  $t = 50\text{ms}$ .

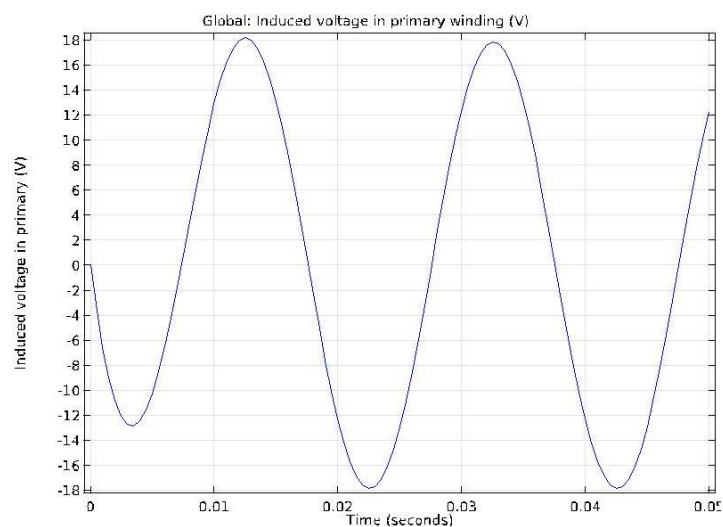


Рисунок 2.5.15: Напряжение в первичной обмотке во времени

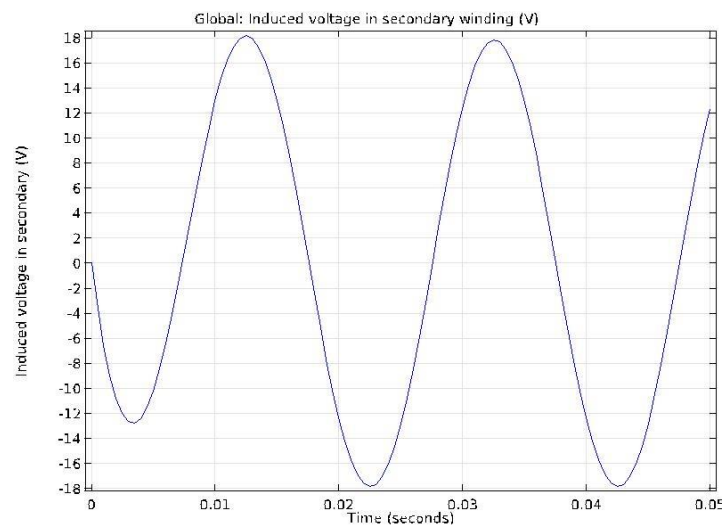


Рисунок 2.5.16: Напряжение вторичной обмотки во времени

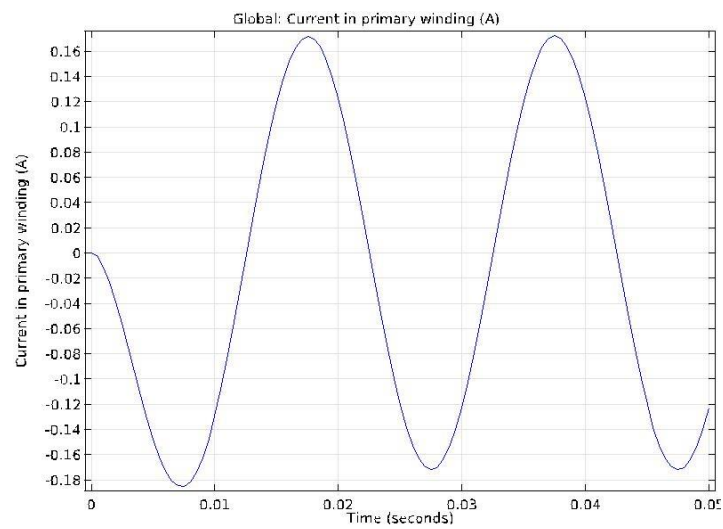


Рисунок 2.5.17: Токи в первичной обмотке во времени.

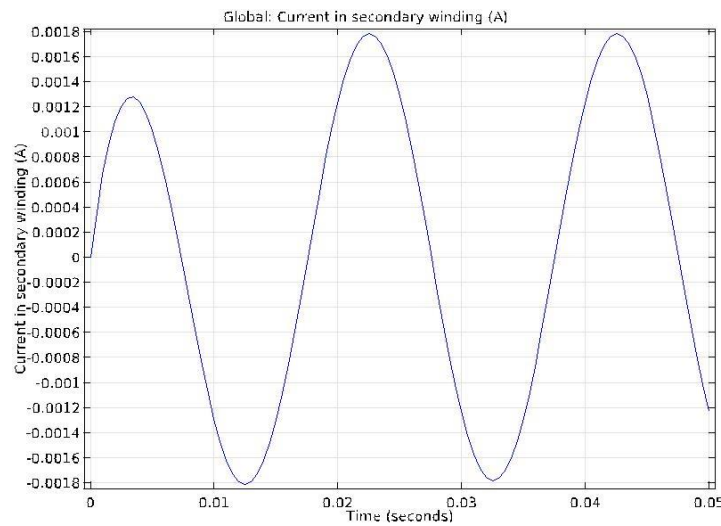


Рисунок 2.51.8: Тока во вторичной обмотке во времени

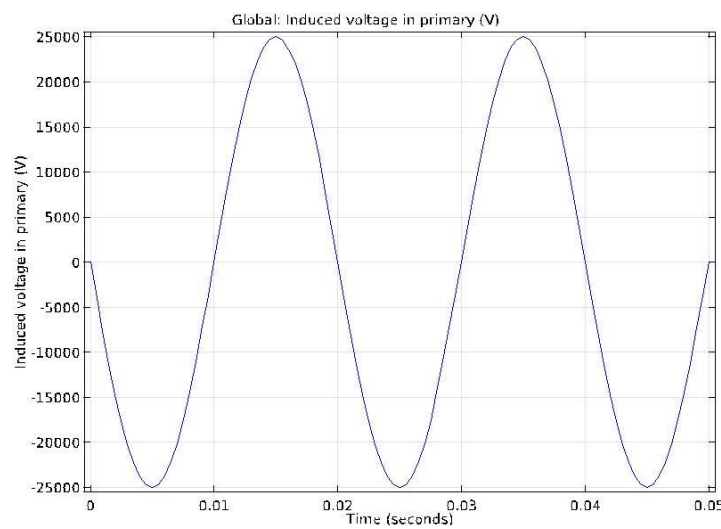


Рисунок 2.5.19: Напряжение в первичной обмотке во времени для понижающего трансформатора

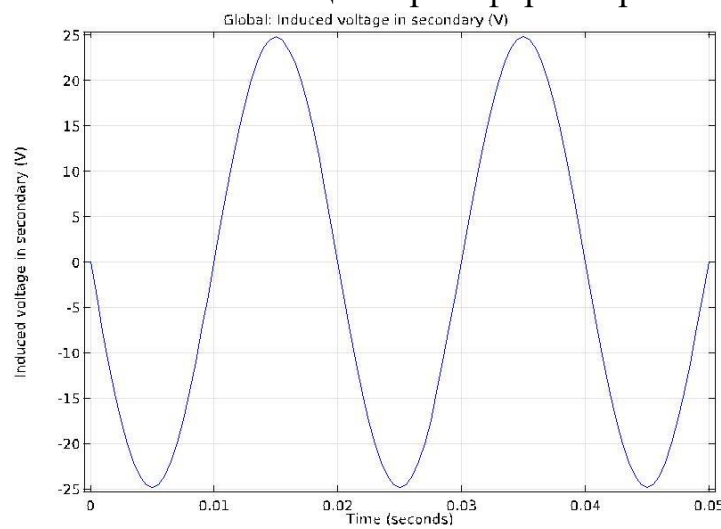


Рисунок 2.5.20: Напряжение во вторичной обмотке во времени для понижающего трансформатора

## 2.6 Лабораторная работа №2

### Создание приложения трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS

#### 2.6.1 Цель работы

Освоить навыки создания приложений в COMSOL MULTIPHYSICS и работы с ними.

#### 2.6.2 Введение

Application Builder — это единственное решение, позволяющее создавать мультифизические приложения не просто в одной программной среде, а в одном окне и в едином файловом формате. Это упрощает разработку приложений для моделирования, превращая их в действительно революционное решение, доступное обычному пользователю».

Благодаря прямой интеграции Среды разработки приложений с Построителем моделей, данные из моделей можно легко передавать между этими инструментами в рамках единой среды. К примеру, любую функцию Построителя моделей можно быстро перенести в Среду разработки приложений и сразу пользоваться ей. Для совместной работы не требуется никаких интерфейсов, все нужные инструменты находятся под рукой.

#### 2.6.3 Ход работы

##### 1. Создание приложения.

Для создания приложения необходимо перейти во вкладку Home и запустить Application Builder в левой верхней части экрана.

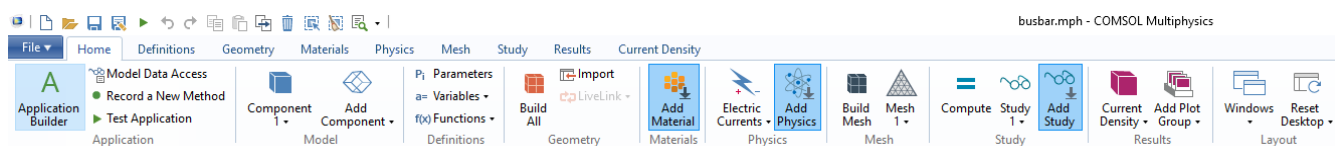


Рисунок 2.6.1. Меню Application Builder

Откроется интерфейс среды разработки приложений.

##### 2. Создание формы

После запуска Application Builder мы видим пустое, только что созданное приложение. Для получения возможности работы с приложением создаем форму (Кликаем New Form)

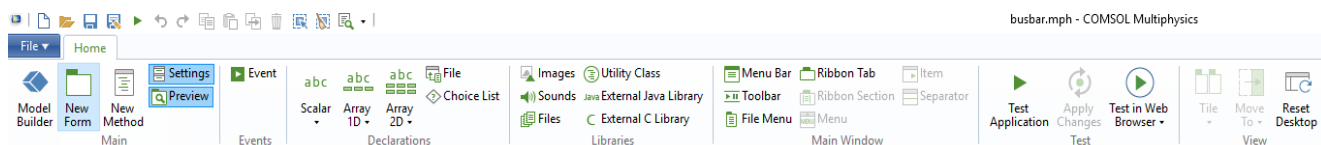


Рисунок 2.6.2. Создание формы приложения

Запустится мастер форм, в котором содержатся различные компоненты и объекты модели, которые можно добавить в приложение. Выбранные параметры будут доступны пользователю. Так же можно добавить графические окна

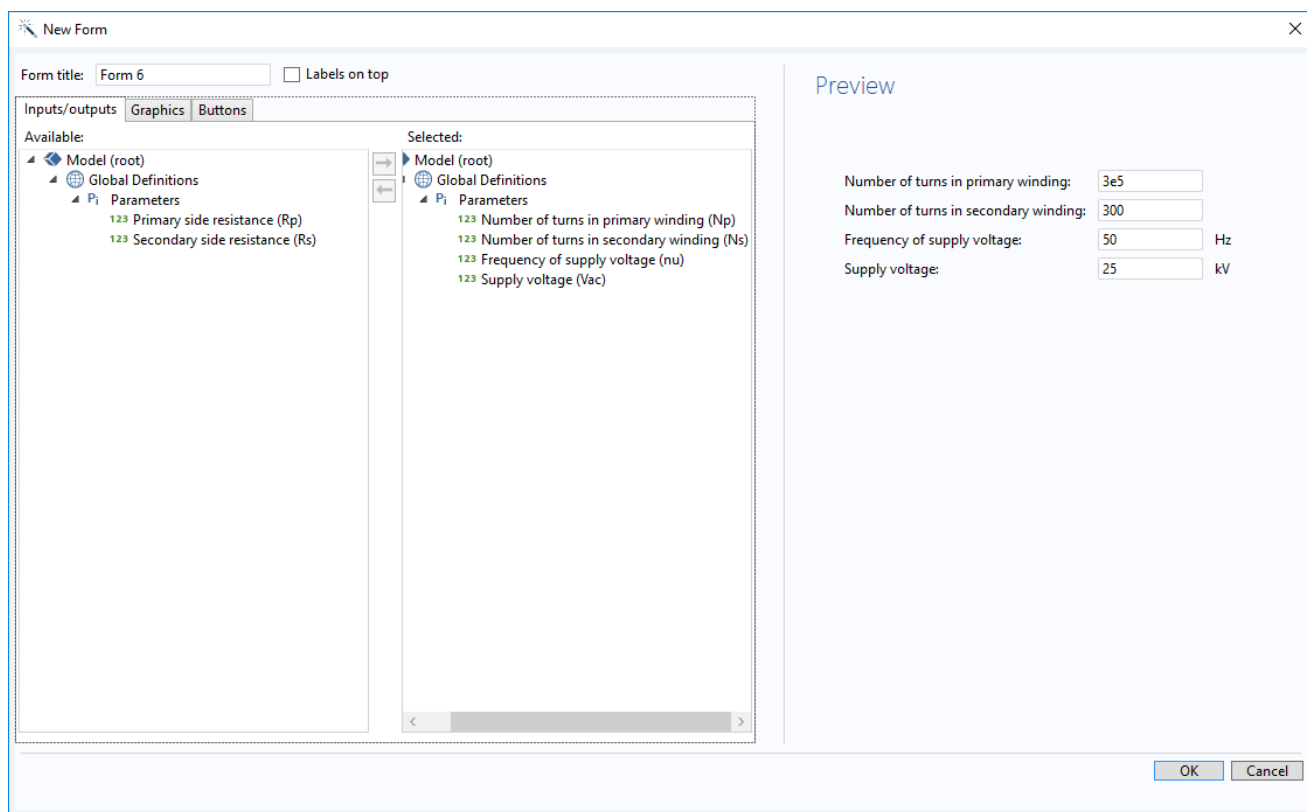


Рисунок. 2.6.3. Мастер форм (параметры)

В открывшемся окне выберем следующие: число обмоток в первичной и вторичной обмотках (Number of turns in primary windings) и напряжение питания (Supply voltage).

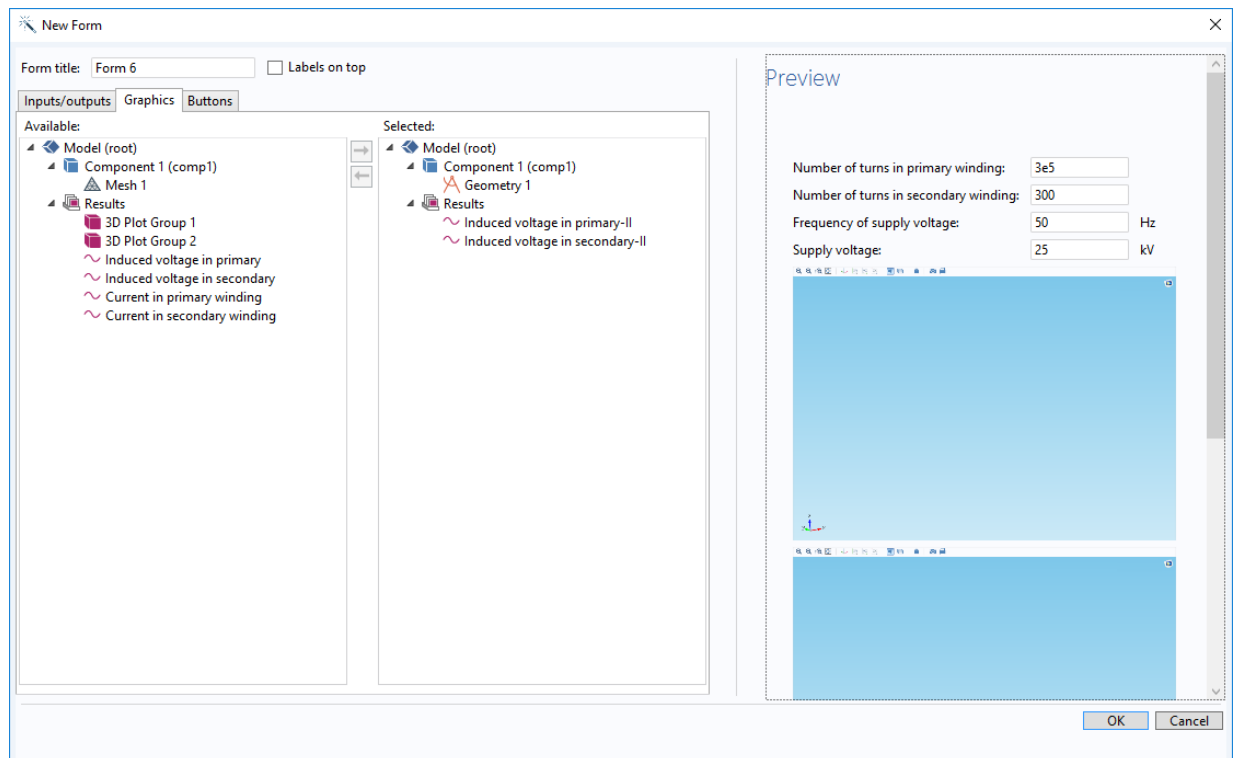


Рисунок 2.6.4. Мастер форм (графики)

Во вкладке Graphics, выберем графики напряжения в первичной и вторичной обмотках (Induced voltage in).

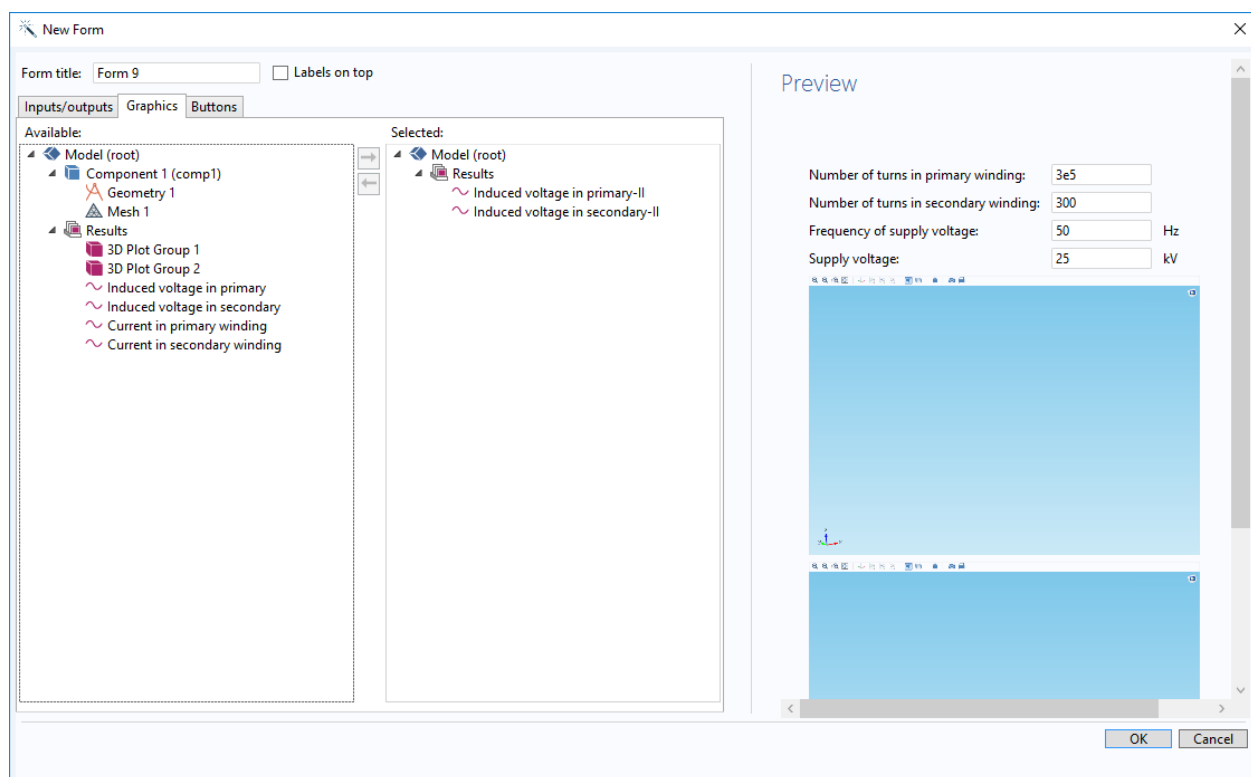


Рисунок 2.6.5. Мастер форм (кнопки)

Во вкладке Buttons, выберем кнопки Compute Study 1, Compute Study 2 которые запускают расчет.

В правой части мастера форм (Preview) показано, как будет выглядеть готовая форма.

Кликаем ОК.

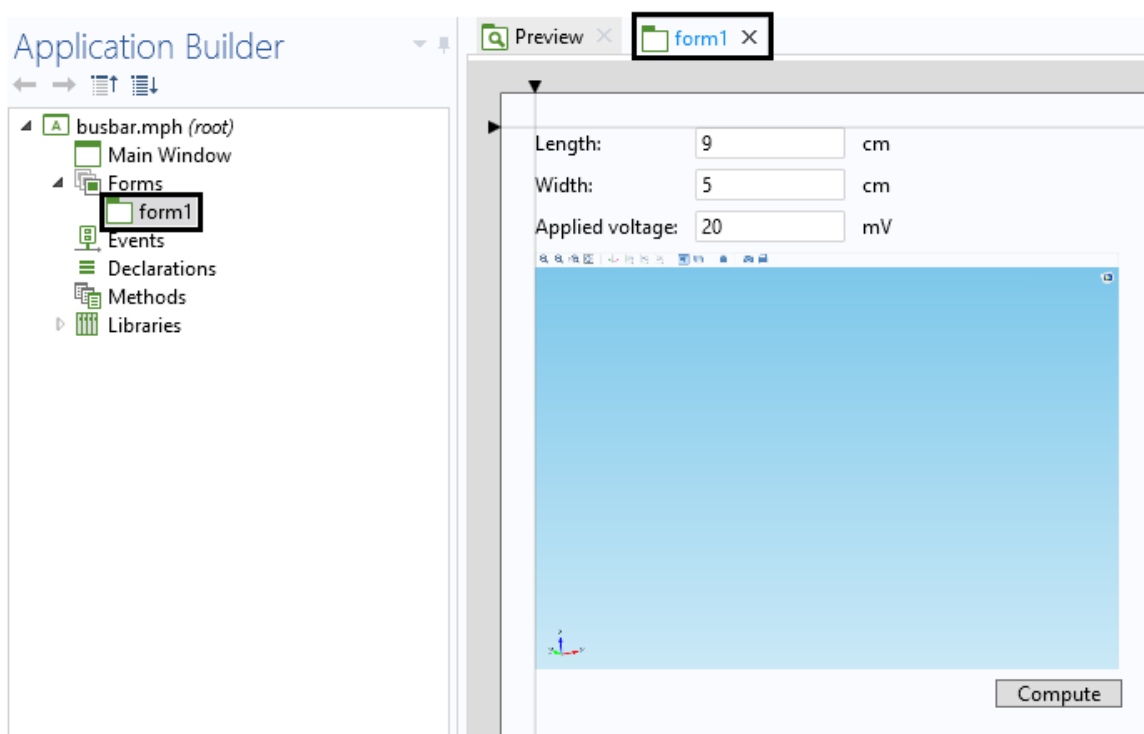


Рисунок 2.6.6. Форма 1

После этого, наша форма добавилась в Application Builder. Можно приступить к редактированию.

На данном этапе можно проверить приложение, кликнув Test Application. Так же можно перемещать и изменять размер элементов в нашей форме с помощью мышки.

### 3. Редактирование приложения.

В редактирование приложения входит:

#### 4.1 Структурирование приложения

#### 4.2 Добавление и редактирование кнопок

#### 4.3 Ограничение допустимых значений параметров, принимаемых полями ввода

#### 4.4 Добавление кнопки сохранения.

#### 4.1 Структурирование приложения.

При изменении размеров формы, приложение никак на это не реагирует, пустые поля остаются незаполненными. Для того чтобы это исправить нужно перейти из режима эскиза (Sketch) в режим сетки (Grid)

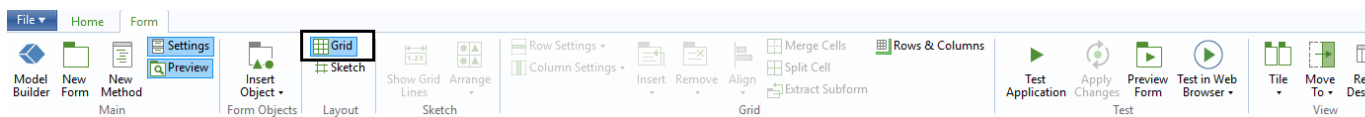


Рисунок 2.6.7. Режим сетки

При этом появятся линии сетки, на которых расположены все добавленные элементы.

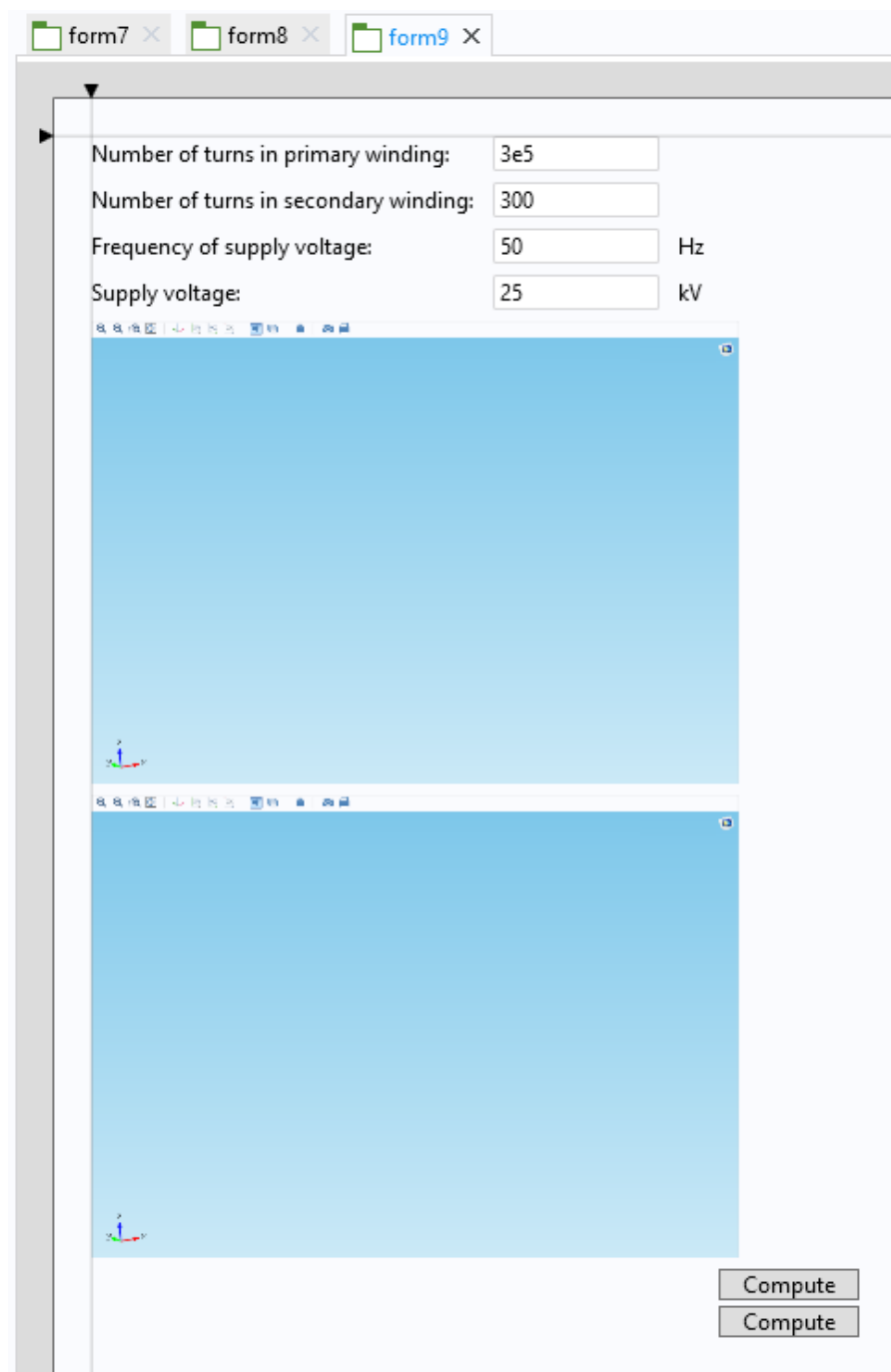


Рисунок 2.6.8. Линии сетки

Чтобы графическое окно изменяло размер при изменении размера формы, нужно кликнуть на строку, в которой расположены графические окна и выбрать **Grow row**, аналогичное действие со столбцом **Grow column**

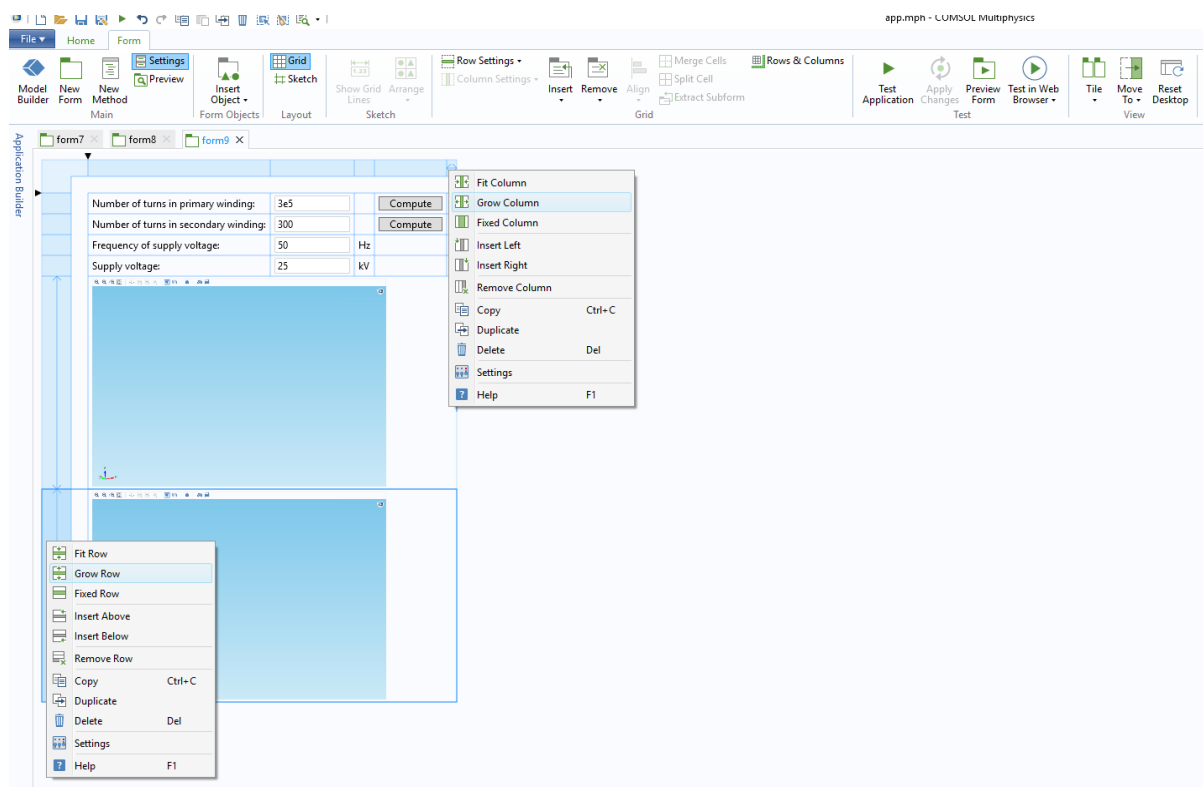


Рисунок 2.6.9. Структурирование приложения

И наконец, для графического окна, нужно включить настройки Align-> Fill Horizontally и Fill Vertically (Заполнять пространство по горизонтали и вертикали)

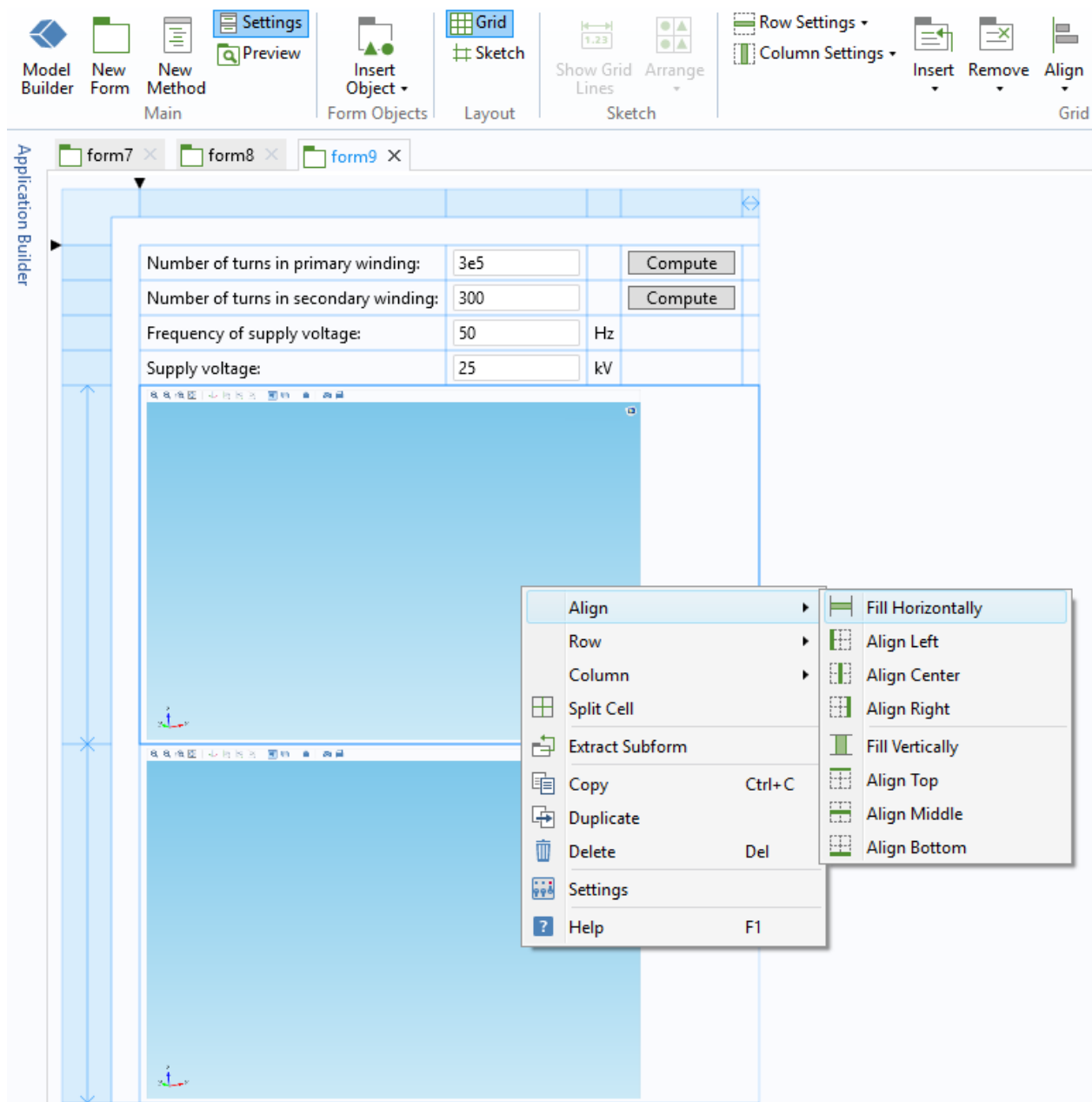


Рисунок 2.6.10. Заполнять пространство

Теперь, графическое окно, тоже будет изменять размер, при растяжении или сжатии формы приложения.

## 4.2 Добавление и редактирование кнопок

При нажатии на кнопку, в правой части экрана открывается меню настроек кнопки, в которых можно переименовать кнопку, добавить к ней подсказки, заменить текст рисунком, изменить ее функции.

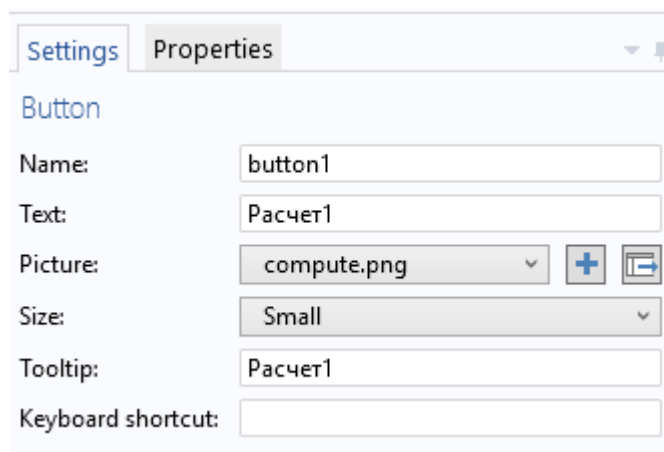


Рисунок 2.6.11. Редактирование кнопок

В меню Picture, выбрали рисунок расчета, а в окне Size выбрали размер Large, для кнопки. Так же можно переименовать кнопку (Name), изменить её текст (Text), добавить всплывающую подсказку, при наведении на неё мышки (Tooltip) и добавить бинд на горячую клавишу (Keyboard shortcut)

С данными настройками кнопка приобрела следующий вид



Чтобы добавить новую кнопку, нужно выбрать ячейку и в меню Form Object из вкладки Insert Object выбрать Button

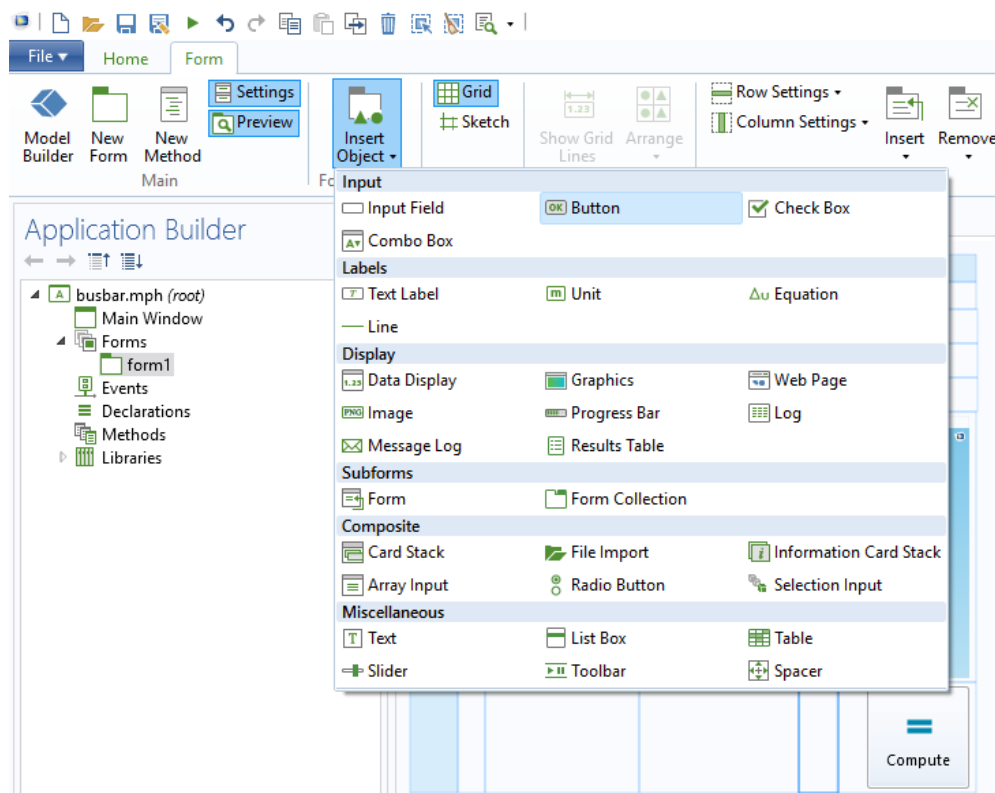


Рисунок 2.6.12. Добавление кнопки

Зададим новой кнопке следующие графические значения

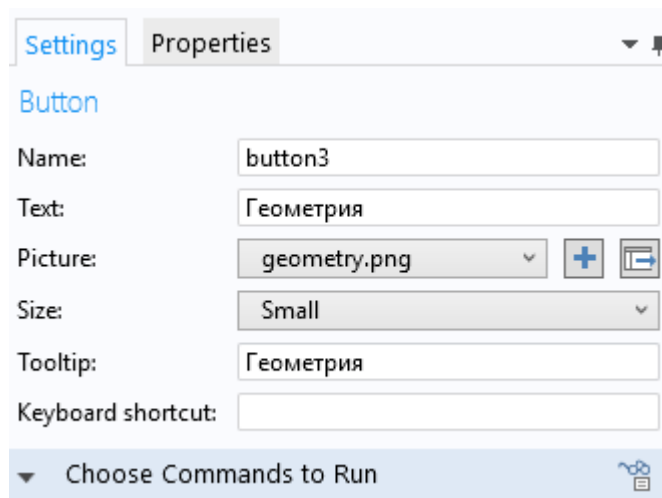


Рисунок 2.6.13. Графические настройки кнопки 2

Далее свяжем с кнопкой действие построить геометрию, для этого в соответствующем меню настройки кнопок в правой части экрана выберем Geometry 1 и кликнем Run и Plot. Так же добавим аргумент для Plot Geometry с помощью кнопки Edit Argument.

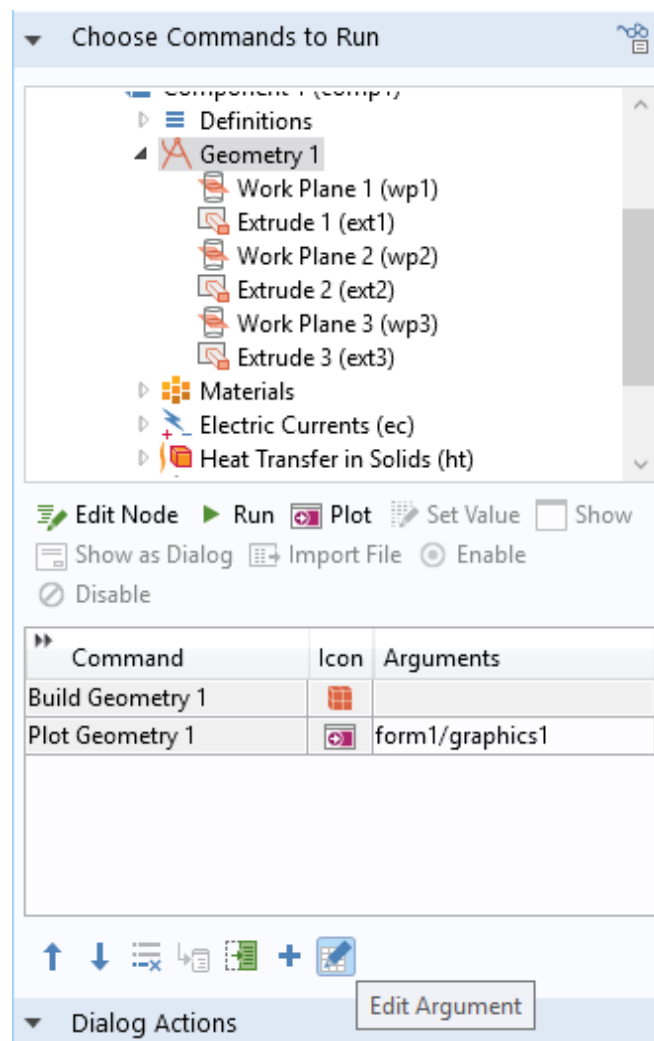


Рисунок 2.6.14. Командные настройки кнопки 2

#### 4.3 Ограничение допустимых значений параметров, принимаемых полями ввода

Для того, чтобы задать пределы параметров, которые пользователь может изменять, нужно выбрать поле ввода параметров и в настройках справа Data Validation устанавливаем галочки напротив Minimum и Maximum и вводим пределы параметров, а также выберем Integer, чтобы ограничить ввод дробных значений.

The screenshot shows a 'Data Validation' dialog box with the following fields and values:

- Unit dimension check:** A dropdown menu set to 'Append unit to number' with a blue '+' button to its right.
- Unit expression:** An empty text input field.
- Filter:** A dropdown menu set to 'Integer'.
- Minimum:** A checkbox that is checked, followed by a text input field containing the value '1'.
- Maximum:** An unchecked checkbox, followed by a text input field containing the value '1000'.
- Error message:** A text input field containing the Russian text 'Значение должно быть больше 0'.

Рисунок 2.6.15. Настройки ограничения допустимых значений параметров

#### **4.4 Добавление кнопки сохранения.**

Добавим кнопку, аналогично разделу 4.2

Для того, чтобы связать кнопку с действием сохранения, в Choose Commands to Run развернем GUI Commands->File Commands->Save Application As и нажмем Run.

Графические и командные настройки показаны на рисунке 17

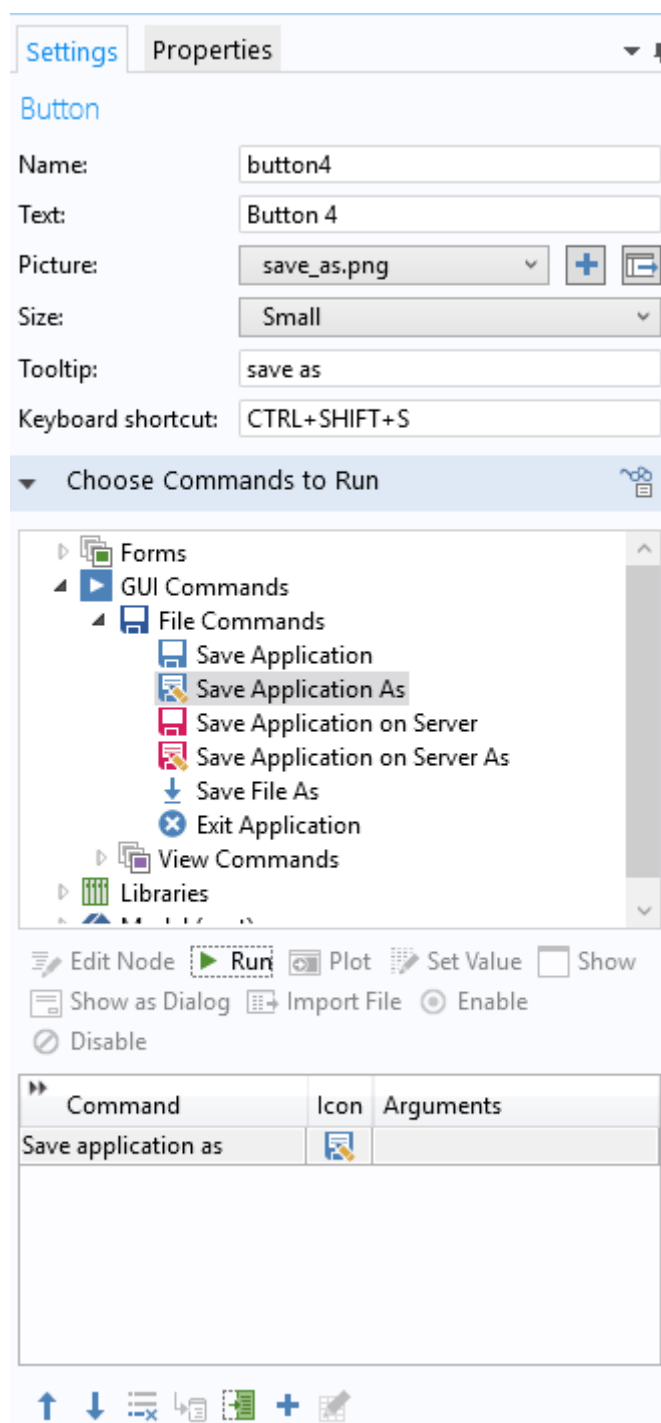


Рисунок 2.6.16. Настройки кнопки сохранения.

The screenshot shows a software application window with three tabs at the top: 'form7', 'form8', and 'form9'. The 'form9' tab is active. The form contains four rows of input fields and buttons:

|                                       |                                  |                                       |                                  |
|---------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------|
| Number of turns in primary winding:   | <input type="text" value="3e5"/> | <input "="" type="button" value="="/> | <input type="text"/>             |
| Number of turns in secondary winding: | <input type="text" value="300"/> | <input "="" type="button" value="="/> | <input type="text"/>             |
| Frequency of supply voltage:          | <input type="text" value="50"/>  | Hz                                    | <input type="button" value="A"/> |
| Supply voltage:                       | <input type="text" value="25"/>  | kV                                    | <input type="button" value="V"/> |

Below the input fields are two large, empty rectangular areas, each with a toolbar at the top containing icons for search, zoom, and other functions.

Рисунок. 2.6.17 Форма приложения после создания кнопок и структурирования

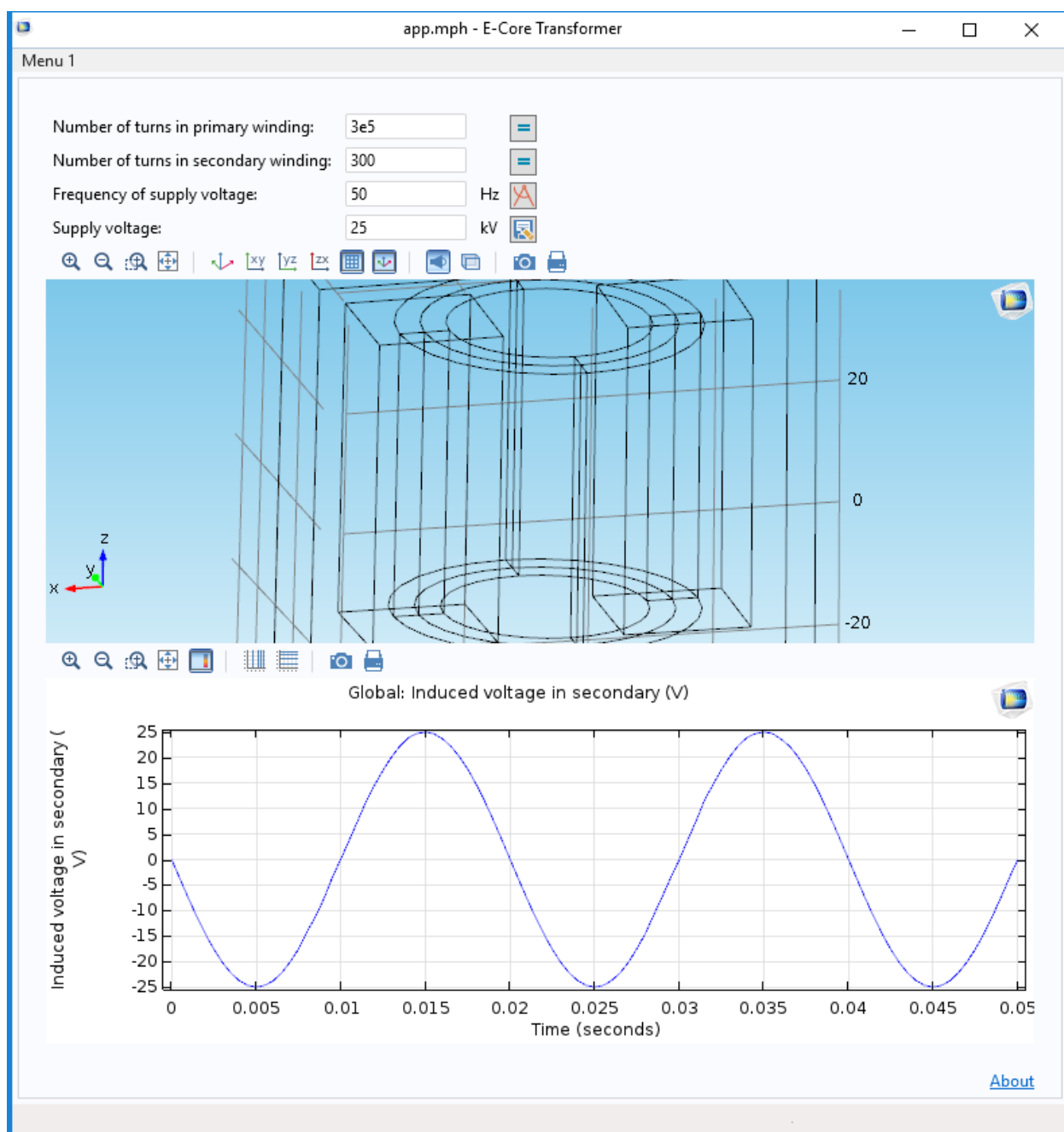


Рисунок 2.6.18. Созданное приложение.

## 2.7 Лабораторная работа №3

### Создание модели однофазного кабеля в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS

#### 2.7.1 Цель работы

Расширить умения работы с программным комплексом COMSOL MULTIPHYSICS, а также изучить структуру кабеля и его свойства

#### Исходные данные

Таблица 2.7.1. – Исходные данные

| Номер варианта | Радиус проводника, мм | Радиус диэлектрика, мм | Радиус экрана, мм |
|----------------|-----------------------|------------------------|-------------------|
| 1              | 2,5                   | 5                      | 0,625             |
| 2              | 2,65                  | 5,3                    | 0,6625            |
| 3              | 3                     | 6                      | 0,75              |
| 4              | 3,25                  | 6,5                    | 0,8125            |
| 5              | 3,85                  | 7,7                    | 0,9625            |
| 6              | 4,65                  | 9,3                    | 1,1625            |
| 7              | 5,4                   | 10,8                   | 1,35              |
| 8              | 5,9                   | 11,8                   | 1,475             |
| 9              | 6,65                  | 13,3                   | 1,6625            |
| 10             | 7,9                   | 15,8                   | 1,975             |
| 11             | 8,9                   | 17,8                   | 2,225             |
| 12             | 9,75                  | 19,5                   | 2,4375            |
| 13             | 10,7                  | 21,4                   | 2,675             |
| 14             | 11,9                  | 23,8                   | 2,975             |
| 15             | 13,3                  | 26,6                   | 3,325             |

#### 2.7.2 Краткая информация

Электрические кабели повсеместно применяются для передачи данных и электроэнергии. Применяются самые разные линии электропередач от малых в виде волноводов на печатных платах, до

высоковольтных линий электропередач. Они должны функционировать в различных и в том числе экстремальных режимах условиях эксплуатации, например, трансатлантический телеграфный кабель. Линиям передач необходимо развиваться с учетом всех необходимых требований, чтобы гарантировать их надежную работу в заданных условиях. Кроме того, они могут являться предметом исследований с целью дальнейшей оптимизации конструкции включая выполнение требований по механической прочности и малому весу. Кабели и волноводы могут относиться к различным диапазонам от низкочастотных до оптических т.е. до оптоволоконных кабелей. При проектировании инженеры часто оперируют с распределенными или удельными (т.е. приходящимися на единицу длины) параметрами. Эти параметры можно использовать для расчета качества функционирования кабеля, его характеристического импеданса, а также потерь в нем, при распространении сигнала.

### **2.7.3. Описание модели**

В данной модели рассматривается расчет электрических и магнитных полей в частотном диапазоне для сечения кабеля, а все остальные свойства могут быть получены из электрического или магнитного анализа. Электрический анализ проводится с помощью интерфейса «Электрические токи» и позволит получить распределение электрических полей в диэлектрике и рассчитать проводимость системы. А расчет магнитных полей с помощью интерфейса «Магнитных полей» позволяет учесть скин-эффект и рассчитать электрический импеданс проводника.

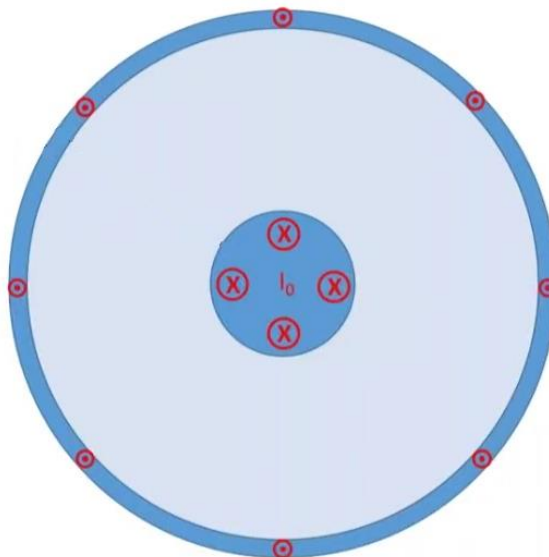


Рисунок 2.7.1. Сечение кабеля

#### 2.7.4. Ход работы.

Нажмите **File** в меню, выберите **New**.

1. В окне **New**, кликните **Model Wizard**.

##### Создание модели

1. В окне **Model Wizard**, кликните **2D**.

2. В **Select physics** выберите **AC/DC>Magnetic Fields (mf)**.

3. Кликните **Add**.

4. В **Select physics** выберите **AC/DC>Electrical Circuit (cir)**.

5. Кликните **Add**.

6. Кликните **Study**.

7. В **Select study** выберите **Preset Studies for Selected Physics Interfaces>Frequency Domain**.

8. Кликните **Done**.

##### Глобальные параметры.

Определить все необходимые параметры.

##### *Параметры*

1. В инструменте **Home**, кликните **Parameters**.

2. В подменю **Settings**, разверните **Parameters**.
3. Введите параметры, показанные в таблице ниже

Таблица 2.7.2. – Параметры кабеля

| Name         | Expression                                                                                                            |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| aR           | 0.405[mm]                                                                                                             |
| dR           | 1.045[mm]                                                                                                             |
| eR 0.1[mm]   | 0.1[mm]                                                                                                               |
| V0           | 1[V]                                                                                                                  |
| I0 1[A]      | 1[A]                                                                                                                  |
| eps_d        | 2.25                                                                                                                  |
| sigma_d      | 1e-14[S/m]                                                                                                            |
| mu_d         | 1                                                                                                                     |
| f_max        | 1e9[Hz]                                                                                                               |
| delta_q      | $\sqrt{2/(2\pi \cdot f_{\max} \cdot \mu_{\text{coax}} \cdot \mu_0 \cdot \text{const} \cdot \sigma_{\text{c\_coax}})}$ |
| mur_coax     | 1                                                                                                                     |
| d            | 1[m]                                                                                                                  |
| sigma_c_coax | 5.98e7[S/m]                                                                                                           |

#### Геометрия 1.

3. В **Model Builder** разверните **Component 1**, щелкните правой кнопкой мыши на **Geometry 1** и выберите **Circle**.
4. В текстовом поле **Radius** введите
5. Разверните **Layers** и в текстовом поле **Thickness** напротив Layer 1 и Layer 2 введите eR и dR соответственно.
6. В инструменте **Geometry**, кликните **Build All**.

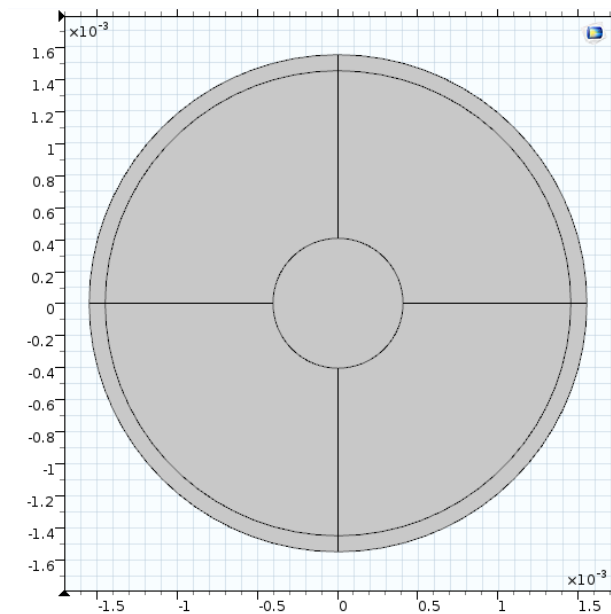


Рисунок 2.7.2. Окно геометрии

Окно геометрии представлено на Рисунке 2.

#### Настройка материалов.

1. Щелкните правой кнопкой мыши на **Materials** в **Model Builder** и выберите **Add Material**.
2. В правой части экрана выберите **Cooper**.
3. Щелкните правой кнопкой мыши на **Materials** в **Model Builder** и выберите **Blank Material**.
4. Выберите области, показанные на рисунке 3.
5. В **Settings** для **Material 2** во вкладке **Material Contents** в столбец **Value** введите следующие параметры:  $\sigma_d$ ,  $\epsilon_d$ ,  $\mu_d$ .

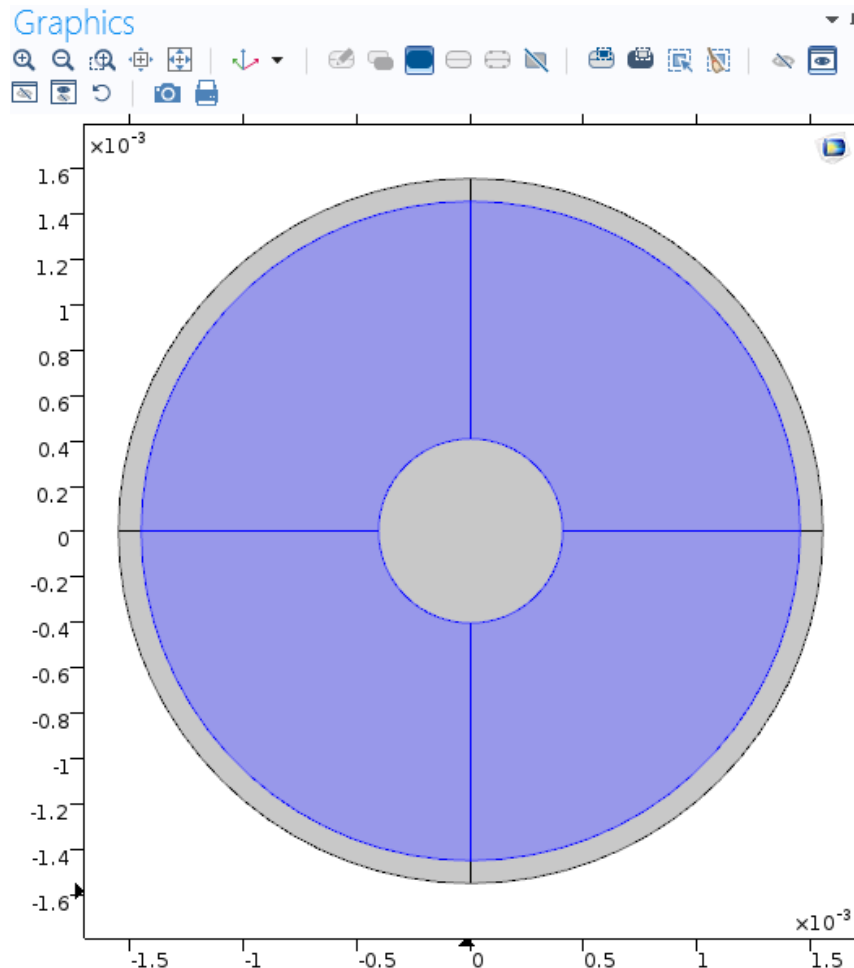


Рисунок 2.7.3. Присвоение диэлектрических свойств

### Настройка электрических токов **Electrical Currents (ec)**.

1. Выделите **Electrical Currents** в **Model Builder**.
2. В **Domain Section** оставьте только области 3,4,6,7.
3. В текстовое поле **Out-of-plane-thickness** введите  $d$ .
4. Щелкните правой кнопкой мыши на **Electrical Currents**, выберите **Ground** и выберите области 11,12,16,19.
5. Щелкните правой кнопкой мыши на **Electrical Currents**, выберите **Terminal** и выберите области 11,12,16,19.
6. Выберите **Terminal type: Voltage** и в текстовое поле **V0** введите  $V_0$ .

### Настройка магнитных полей **Magnetic Fields (mf)**

1. Выделите **Magnetic Fields** в **Model Builder**.
2. В текстовое поле **Out-of-plane-thickness** введите  $d$ .
3. Щелкните правой кнопкой мыши на **Magnetic Fields** в **Model Builder** и выберите **Single Turn Coils**

4. В открывшейся вкладки выберите области 1,2,5,8,9.
5. Отметьте галочкой **Coil Group**.
6. Щелкните правой кнопкой мыши на **Single Turn Coils** и выберите **Reversed Current Direction** и выберите область 9.

### Настройка сетки Mesh 1

1. Выделите **Mesh 1** в **Model Builder** и выберите **User-controlled mesh**.
2. В **Geometry entity control** выберите **Domain** и область 9.
3. Щелкните правой кнопкой мыши на **Free Triangular 1** и выберите **Size**.
4. Выберите **Predefined Extra fine**.
5. Щелкните правой кнопкой мыши на **Mesh 1** и выберите **Mapped**.
6. Щелкните правой кнопкой мыши на **Mapped** и выберите **Distribution**.
7. Выберите область 1 и в текстовом поле **Number of elements** введите 8.
8. Щелкните правой кнопкой мыши на **Mapped** и выберите **Distribution**.
9. Выберите область 2.
10. В **Distribution Properties** выберите **Predefined distribution type**.
11. В текстовое поле **Number of elements** введите 25.
12. В текстовое поле **Element ratio** введите 8.
13. Отметьте галочкой **Symmetric distribution**.
14. Щелкните правой кнопкой мыши на **Mesh 1** и выберите **Boundary Layers**
15. В **Geometry entity selection** выберите области 1,2,5,8,9
16. В **Boundary Layers properties** выберите границы 11,12,16,19
17. В текстовое поле **Number of boundary layers** введите 3
18. В **Thickness of first layer** выберите **manual**.
19. В текстовое поле **Thickness** введите delta\_q.

## Study 1.

1. Выделите **Study 1>Step 1:Frequency domain** в **Model Builder**.
2. В текстовое поле **Frequencies** введите  $10^{(\text{range}(0,0.25,9.1))}$
3. Нажмите **Compute**.

### Расчет удельных параметров кабеля.

1. В **Model Builder** щелкните правой кнопкой мыши на **Component 1>Definitions** и выберите **Variables**.
2. Введите следующие значения:

Таблица 2.7.3. - Переменные

| Name  | Expression                                                                                                             |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| R     | $\text{real}((\text{mf.ZCoil}_1)/d)$                                                                                   |
| G     | $\text{real}((\text{ec.Y11})/d)$                                                                                       |
| L     | $\text{imag}((\text{mf.ZCoil}_1)/(\text{freq}^2 \cdot \pi)/d)$                                                         |
| C     | $\text{imag}((\text{ec.Y11})/(\text{freq}^2 \cdot \pi)/d)$                                                             |
| gamma | $\sqrt{(R + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot L) \cdot (G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot C)}$ |
| Z0    | $\sqrt{(R + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot L)/(G + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot C)}$       |

3. Щелкните правой кнопкой мыши на **Result** и выберите **1D Plot Group**.
4. Щелкните правой кнопкой мыши на **1D Plot Group** и выберите **Global**.
5. В **Expression** введите R, L, C, G в четыре строки.
6. Сравните полученный график с рисунком 4.

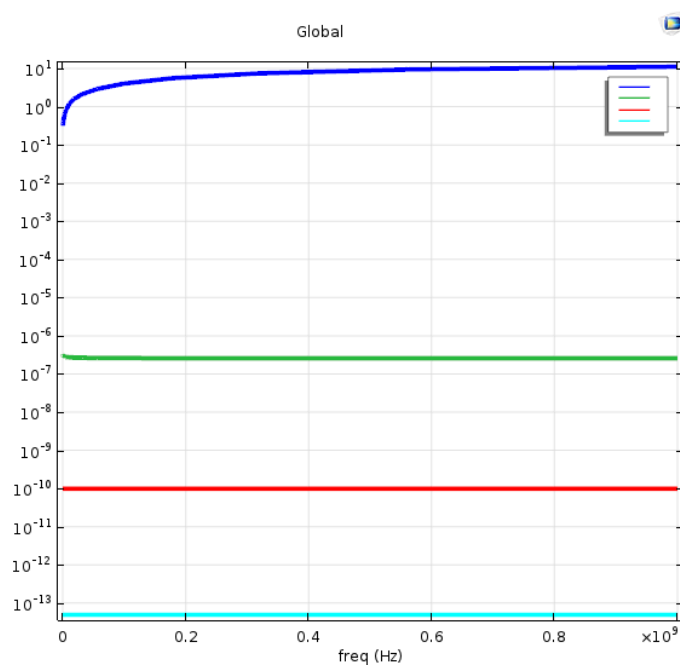


Рисунок 2.7.4. График зависимости параметров кабеля от частоты

## 2.8 Лабораторная работа №4

### Создание цепи с распределенными параметрами программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS

#### 2.8.1 Цель работы

Научиться работать с многокомпонентными моделями в COMSOL MULTIPHYSICS, а также изучить структуру кабеля и его свойства

#### Исходные данные

Таблица 2.8.1. – Исходные данные

| Номер варианта | Длина линии, м |
|----------------|----------------|
| 1              | 10             |
| 2              | 11             |
| 3              | 12             |
| 4              | 13             |
| 5              | 14             |
| 6              | 15             |
| 7              | 16             |
| 8              | 17             |
| 9              | 18             |
| 10             | 19             |
| 11             | 20             |
| 12             | 21             |
| 13             | 22             |
| 14             | 23             |
| 15             | 24             |

#### 2.8.2 Краткая информация

Цепи с распределенными параметрами это такие цепи, длина которых соизмерима с длиной электромагнитной волны и напряжения, и токи изменяются вдоль этих цепей. Длинный кабель является примером цепи с распределенными параметрами.

### 2.8.3. Описание модели

С помощью первичных параметров, найденных в лабораторной работе №3, производим расчет цепи с помощью уравнений длинных линий. Для описания вторичных параметров часто используют  $S$  – параметры – это элементы матрицы рассеяния. Они показывают амплитуды падающих и отраженных волн.

### 2.8.4. Ход работы

Нажмите **File** в меню, выберите **Open**, откройте Лабораторную работу №3 – Модель сечения кабеля.

1. В **Model Builder** кликните правой кнопкой мыши на **Definitions**, раскройте **Functions** и выберите **Interpolation**.
2. В **Table** выберите **Table 1**.
3. В таблицу **Functions** введите следующие значения:

Таблица 2.8.2 – Интерполяция функций

| Function name | Position in file |
|---------------|------------------|
| R             | 1                |
| G             | 2                |
| L             | 3                |
| C             | 4                |

4. В **Interpolation** выберите **Cubic spline**.

#### Глобальные параметры.

Определить все необходимые параметры.

#### *Параметры*

4. В инструменте **Home**, кликните **Parameters**.
5. В подменю **Settings**, разверните **Parameters**.
6. Введите параметры, показанные в таблице ниже.
7. Кликните **Plot**.
8. В графическом окне кликните y-Axis Log Scale.

#### Компонент 2.

1. Нажмите **Add Component** во вкладке **Home** и выберите **1D**.

### Создание геометрии.

1. Щелкните правой кнопкой мыши на **Component 2>Geometry 2** в **Model Builder**.
2. В текстовые поля **Left endpoint** и **Right endpoint** введите 0 и 10 соответственно.

### Выбор и настройка физики

1. Щелкните правой кнопкой мыши на **Component 2** в **Model Builder** и выберите **Add Physics**.
2. В правой части экрана выберите **Transmission Line**.
3. Выберите **Component 2>Transmission line>Transmission Line Equation 1**.
4. В открывшемся меню в **Transmission Line Equation** в текстовые поля введите  $R(\text{freq}[1/\text{Hz}])$ ,  $L(\text{freq}[1/\text{Hz}])$ ,  $G(\text{freq}[1/\text{Hz}])$ ,  $C(\text{freq}[1/\text{Hz}])$
5. Щелкните правой кнопкой мыши по **Component 2>Transmission line** и выберите **Lumped Port**.
6. В **Boundary Section** выберите порт 1.
7. В **Wave excitation at this port** выберите **On**.
8. Щелкните правой кнопкой мыши по **Component 2>Transmission line** и выберите **Lumped Port**.
9. В **Boundary Section** выберите порт 2.

### Настройка сетки

1. Щелкните правой кнопкой мыши по **Component 2>Mesh 2** и выберите **Edge**.
2. Щелкните правой кнопкой мыши по **Component 2>Mesh 2>Edge** и выберите **Distribution**.
3. В текстовое поле **Number of elements** введите 200.

### Новое исследование

1. В панели инструментов откройте **Study** и выберите **Add Study**.

2. Уберите галочку с **Transmission Line**, а в **Study 1** с **Electric Current** и **Component 2>Mesh 2**
3. В текстовое поле **Frequencies** введите `range(10000000,100000000,2000000000)`.
4. Нажмите кнопку **Compute**.

### 2.8.9 Результаты

1. Щелкните правой кнопкой мыши по **Result** и выберите **1D Plot Group**.
2. Щелкните правой кнопкой мыши по **1D Plot Group** и выберите **Global**.
3. В **Expression** введите `tl.S11dB` и `tl.S12dB`.
4. Сравните полученный график с рисунком.

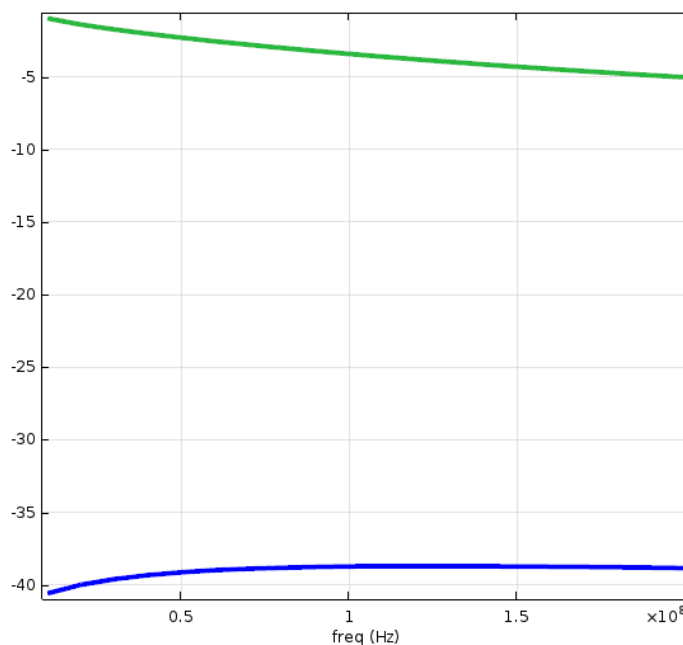


Рисунок 2.8.1 S - параметры

## **2.9. Выводы по главе 2.**

Создан лабораторный практикум, состоящий из 4 лабораторных работа «Создание модели трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS», «Создание приложения трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS», «Создание модели однофазного кабеля в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS», «Создание цепи с распределенными параметрами программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS». К каждой лабораторной работе написаны методические указания, созданы варианты для выполнения, а также тестовые примеры в приложениях А-Г.

Целью лабораторных работ является знакомство и получение навыков работы в COMSOL MULTIPHYSICS и получения навыков моделирования, а также закрепления материала об объектах моделирования.

## Глава 3. Определение параметров двухфазного кабеля.

### 3.1. Создание модели двухфазного кабеля.

#### Исходные данные

Таблица 3. – Исходные данные

| Номер варианта | Радиус<br>проводника aR, мм | Радиус<br>диэлектрика dR,<br>мм | Радиус экрана eR,<br>мм |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|
| 1              | 8                           | 5                               | 0,625                   |
| 2              | 9,3                         | 5,3                             | 0,6625                  |
| 3              | 11                          | 6                               | 0,75                    |
| 4              | 11,8                        | 6,5                             | 0,8125                  |
| 5              | 14,4                        | 7,7                             | 0,9625                  |
| 6              | 16,5                        | 9,3                             | 1,1625                  |
| 7              | 20,4                        | 10,8                            | 1,35                    |
| 8              | 22,6                        | 11,8                            | 1,475                   |
| 9              | 26,4                        | 13,3                            | 1,6625                  |
| 10             | 28,3                        | 15,8                            | 1,975                   |
| 11             | 31,6                        | 17,8                            | 2,225                   |
| 12             | 34,6                        | 19,5                            | 2,4375                  |
| 13             | 38                          | 21,4                            | 2,675                   |
| 14             | 41,5                        | 23,8                            | 2,975                   |
| 15             | 47                          | 26,6                            | 3,325                   |

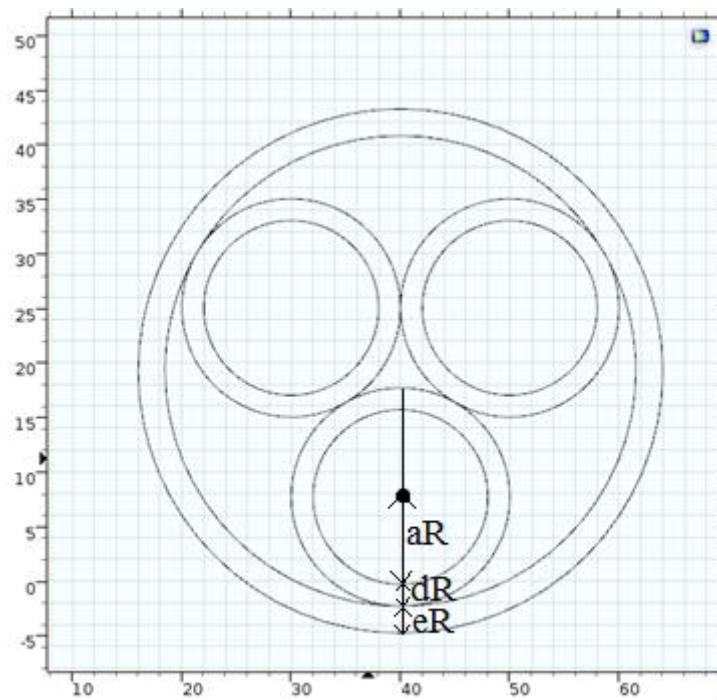


Рисунок 3. Геометрия трехфазного кабеля

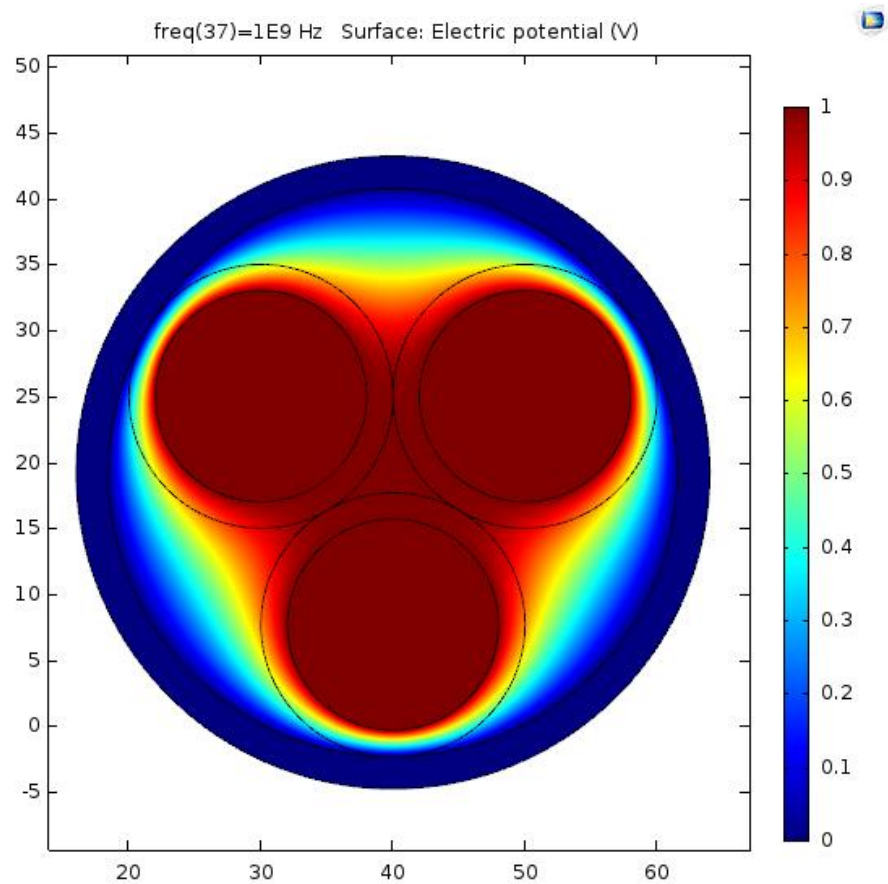


Рисунок 3.а. Электрические потенциалы в трехфазном кабеле

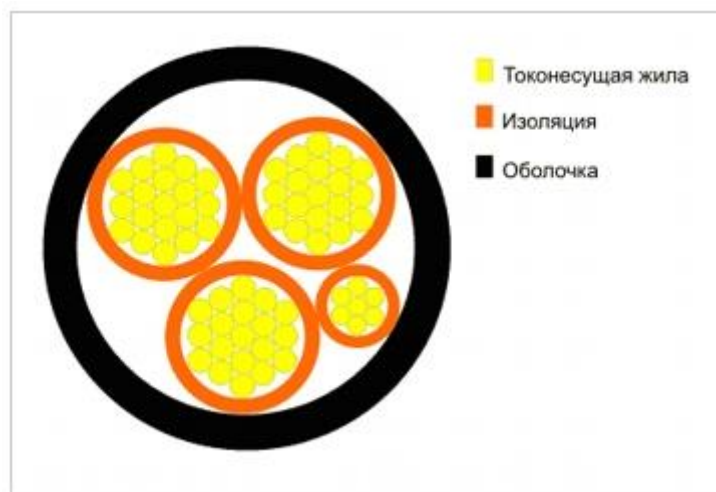


Рисунок 3.6. Сечение кабеля ВВГ

Для примера возьмем геометрические характеристики кабеля ВВГнг 2х50

### 3.1.1. Описание создания модели

Нажмем **File** в меню и выберем **New**.

1. В окне **New**, кликните **Model Wizard**.

**Создание модели**

9. В окне **Model Wizard**, кликнем **2D**.

10. В **Select physics** выберем **AC/DC>Magnetic Fields (mf)**.

11. Кликнем **Add**.

12. В **Select physics** выберем **AC/DC>Electrical Circuit (cir)**.

13. Кликнем **Add**.

14. Кликнем **Study**.

15. В **Select study** выберем **Preset Studies for Selected Physics Interfaces>Frequency Domain**.

16. Кликнем **Done**.

**Глобальные параметры.**

Определить все необходимые параметры.

*Параметры*

9. В инструменте **Home**, кликнем **Parameters**.

10. В подменю **Settings**, развернем **Parameters**.

11. Введите параметры, показанные в таблице ниже

Таблица 3.1. - Параметры кабеля

| Name         | Expression                                                                                                                  |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| aR           | 37.5[mm]                                                                                                                    |
| h1           | 75[mm]                                                                                                                      |
| w            | 150[mm]                                                                                                                     |
| V0           | 1[V]                                                                                                                        |
| I0 1[A]      | 1[A]                                                                                                                        |
| eps_d        | 2.25                                                                                                                        |
| sigma_d      | 1e-14[S/m]                                                                                                                  |
| mu_d         | 1                                                                                                                           |
| f_max        | 1e9[Hz]                                                                                                                     |
| delta_q      | $\sqrt{2/(2\pi \cdot f_{\text{max}} \cdot \mu_{\text{coax}} \cdot \mu_0 \cdot \text{const} \cdot \sigma_{\text{c\_coax}})}$ |
| mur_coax     | 1                                                                                                                           |
| d            | 1[m]                                                                                                                        |
| sigma_c_coax | 5.98e7[S/m]                                                                                                                 |

**Геометрия 1.**

7. Загрузим построенную геометрию и в инструменте **Geometry**, кликнем **Build All**.

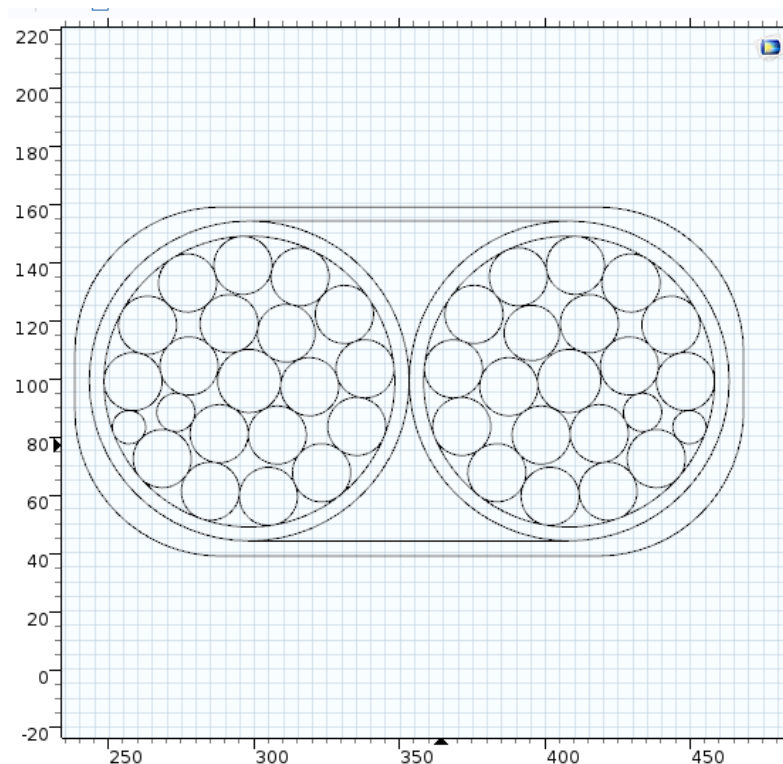


Рисунок 3.1.1. Окно геометрии

Окно геометрии представлено на Рисунке 3.1.1.

#### Настройка материалов.

6. Щелкнем правой кнопкой мыши на **Materials** в **Model Builder** и выберите **Add Material**.
7. В правой части экрана выберем **Cooper**.
8. Щелкнем правой кнопкой мыши на **Materials** в **Model Builder** и выберем **Blank Material**.
9. Выберем все проводящие области.
10. В **Settings** для **Material 2** во вкладке **Material Contents** в столбец **Value** введите следующие параметры:  $\sigma_d$ ,  $\epsilon_d$ ,  $\mu_d$ .

#### Настройка электрических токов **Electrical Currents (ec)**.

7. Выделим **Electrical Currents** в **Model Builder**.
8. В текстовое поле **Out-of-plane-thickness** введем  $d$ .
9. Щелкните правой кнопкой мыши на **Electrical Currents**, выберем **Ground** и выберем области 19,20,34,39.
10. Щелкнем правой кнопкой мыши на **Electrical Currents**, выберем

**Terminal** и выберем области окружности проводников.

11.Выберите **Terminal type: Voltage** и в текстовое поле **V0** введите V0.

### Настройка магнитных полей **Magnetic Fields (mf)**

7. Выделите **Magnetic Fields** в **Model Builder**.

8. В текстовое поле **Out-of-plane-thickness** введите d.

9. Щелкнем правой кнопкой мыши на **Magnetic Fields** в **Model Builder** и выберем **Single Turn Coils**

10.В открывшейся вкладки выберем все проводящие области.

11.Отметим галочкой **Coil Group**.

12.Щелкнем правой кнопкой мышки на **Single Turn Coils** и выберем **Reversed Current Direction** и выберем области 19,20,18.

### Настройка сетки **Mesh 1**

20.Выделим **Mesh 1** в **Model Builder** и выберем **User-controlled mesh**.

21.В **Geometry entity control** выберем **Domain** и область 9.

22.Щелкнем правой кнопкой мыши на **Free Triangular 1** и выберем **Size**.

23.Выберем **Predefined Extra fine**.

24.Щелкнем правой кнопкой мыши на **Mesh 1** и выберем **Mapped**.

25.Щелкнем правой кнопкой мыши на **Mapped** и выберем **Distribution**.

26.Выберем область 1 и в текстовом поле **Number of elements** введем 8.

27.Щелкнем правой кнопкой мыши на **Mapped** и выберем **Distribution**.

28.Выберите область 2.

29. В **Distribution Properties** выберем **Predefined distribution type**.

30.В текстовое поле **Number of elements** введем 25.

31.В текстовое поле **Element ratio** введем 8.

32.Отметим галочкой **Symmetric distribution**.

33.Щелкнем правой кнопкой мыши на **Mesh 1** и выберем **Boundary Layers**

34.В **Geometry entity selection** выберем области 1,2,5,8,9

35.В **Boundary Layers properties** выберем границы 11,12,16,19

36. В текстовое поле **Number of boundary layers** введем 3

37. В **Thickness of first layer** выберем **manual**.

38. В текстовое поле **Thickness** введем  $\delta_q$ .

### Study 1.

4. Выделим **Study 1 > Step 1: Frequency domain** в **Model Builder**.

5. В текстовое поле **Frequencies** введем  $10^{(\text{range}(0,0.25,9.1))}$

6. Нажмем **Compute**.

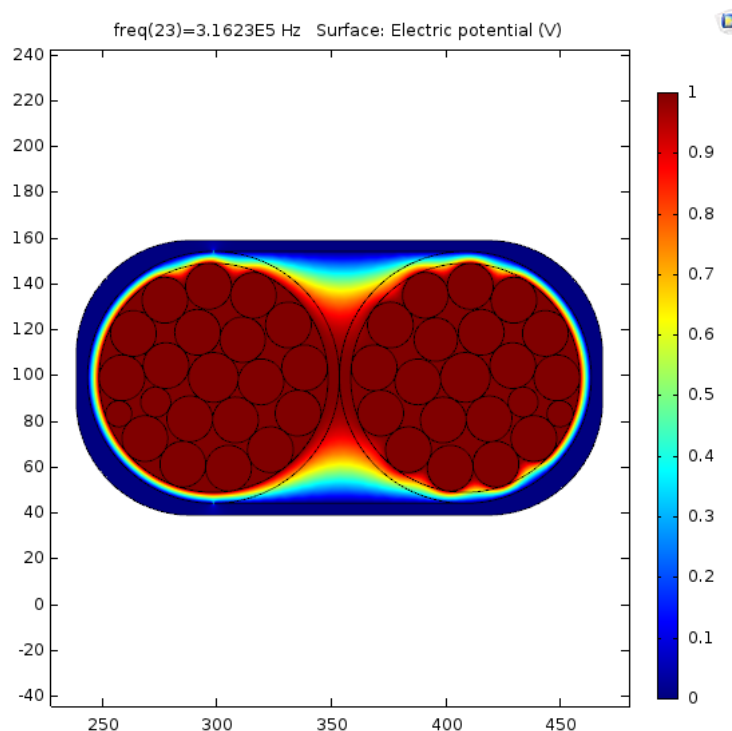


Рисунок 3.1.2. Электрическое поле

### Расчет удельных параметров кабеля.

7. В **Model Builder** щелкнем правой кнопкой мыши на **Component 1 > Definitions** и выберем **Variables**.

8. Введем следующие значения:

### 3.2. Расчет удельных параметров кабеля

Таблица 3.1.2. – Расчет удельных параметров кабеля

| Name | Expression                     |
|------|--------------------------------|
| R    | $\text{real}((mf.ZCoil\_1)/d)$ |
| G    | $\text{real}((ec.Y11)/d)$      |

Продолжение таблицы 3.1.2. – Расчет удельных параметров кабеля

|       |                                                                                                                              |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| L     | $\text{imag}((\text{mf.ZCoil}_1)/(\text{freq} \cdot 2 \cdot \pi)/d)$                                                         |
| C     | $\text{imag}((\text{ec.Y11})/(\text{freq} \cdot 2 \cdot \pi)/d)$                                                             |
| gamma | $\text{sqrt}((R + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot L) \cdot (G + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot C))$ |
| Z0    | $\text{sqrt}((R + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot L)/(G + i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{freq} \cdot C))$       |

9. Щелкнем правой кнопкой мыши на **Result** и выберем **1D Plot**

**Group.**

10. Щелкнем правой кнопкой мыши на **1D Plot Group** и выберем

**Global.**

11. В **Expression** введем R, L, C, G в четыре строки.

В результате получим зависимость удельных параметров кабеля от частоты и значения данных параметров.

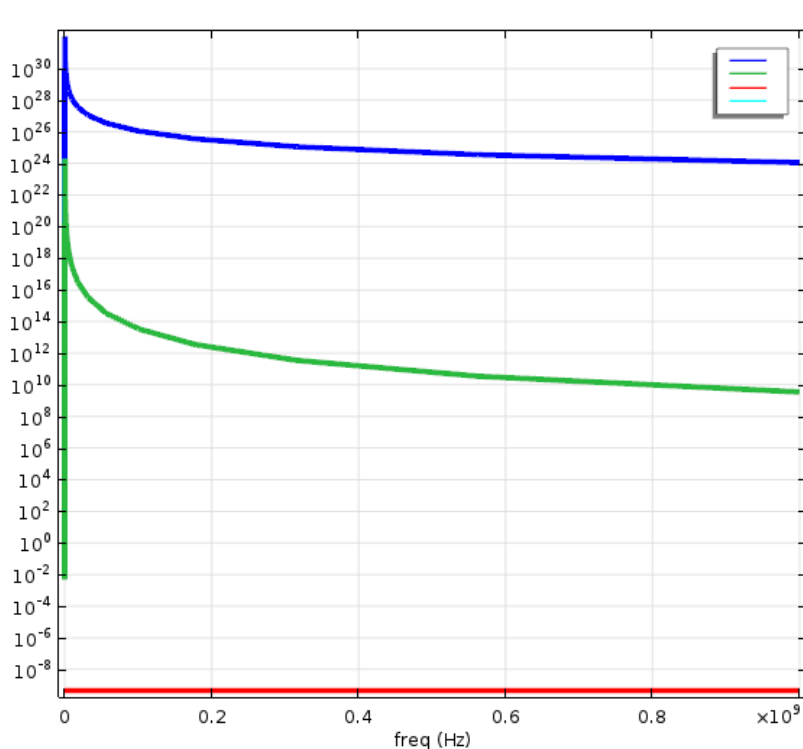


Рисунок 3.1.3. Зависимость R,L,C,G от частоты

### Выводы по главе 3.

Исследована возможность улучшения моделей, для более обширного применения, а именно возможность расчета параметров многофазных кабелей.

## **Глава 4 Финансовый менеджмент, ресурс эффективность и ресурсосбережение**

### **4.1 Актуальность**

В рамках данной ВКР был разработан электронный курс по дисциплине «Математическое моделирование в электроэнергетике», а также лабораторные работы и методические указания.

В разработанном лабораторно-методическом практикуме более подробно рассмотрено моделирование элементов электроэнергетики в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS, используя метод конечных элементов.

### **4.2 Задачи исследования**

В настоящем исследовании решены следующие задачи:

1. Проведён анализ задачи математического моделирования в электроэнергетике. Анализ литературы по математическому моделированию.
2. Проведён анализ существующих систем управления электронными курсами (LMS) и выбор подходящей системы.
3. Разработаны элементы электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике».
4. Создана лабораторная работа «Создание модели трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS».
5. Создана лабораторная работа «Создание приложения модели трансформатора в программном комплексе COMSOL MULTIPHYSICS».
6. Создана лабораторная работа «Создание модели кабеля в COMSOL MULTIPHYSICS».
7. Создана лабораторная работа «Создание цепи с распределенными параметрами в COMSOL MULTIPHYSICS».

#### 4.3. Бюджет научного исследования

В рамках данного проекта был создан электронный курс «Математическое моделирование в электроэнергетике», а также лабораторно-методическое обеспечение данной дисциплины в виде четырех лабораторных работ и тестовых примеров к ним. Все работы выполнялись руководителем магистерской диссертации и исполнителем – магистрантом. Рабочая группа проекта состоит из двух непосредственных исполнителей; магистранта, который создает отдельные части электронного курса и лабораторные работы, обладает специальными знаниями и опытом; и руководителя проекта, к его основным функциям можно отнести координацию деятельности магистранта и оценка готовности проекта.

Месячный должностной оклад работника:

$$З_{\text{м}} = З_{\text{б}} \cdot (k_{\text{пр}} + k_{\text{д}}) \cdot k_{\text{р}},$$

где  $З_{\text{б}}$  – базовый оклад, руб.;

$k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, (определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{д}}$  – коэффициент доплат и надбавок (в НИИ и на промышленных предприятиях – за расширение сфер обслуживания, за профессиональное мастерство, за вредные условия: определяется Положением об оплате труда);

$k_{\text{р}}$  – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

Основная заработная плата **руководителя** (от ТПУ) рассчитывается на основании отраслевой оплаты труда. Отраслевая система оплаты труда в ТПУ предполагает следующий состав заработной платы:

1) оклад – определяется предприятием. В ТПУ оклады распределены в соответствии с занимаемыми должностями, например, ассистент, ст. преподаватель, доцент, профессор. Базовый оклад  $З_{\text{б}}$  определяется исходя из размеров окладов, определенных штатным расписанием предприятия.

Размер окладов ППС и НС ТПУ представлен на корпоративном портале ТПУ: <http://portal.tpu.ru/departments/otdel/peo/documents>.

2) стимулирующие выплаты – устанавливаются руководителем подразделений за эффективный труд, выполнение дополнительных обязанностей и т.д.

3) иные выплаты; районный коэффициент.

Таблица 4.1. – Рабочая группа

| Исполнители  | З <sub>б</sub> ,<br>руб. | k <sub>пр</sub> | k <sub>д</sub> | k <sub>р</sub> | З <sub>м</sub> ,<br>руб | З <sub>дн</sub> ,<br>руб. | Т <sub>р</sub> ,<br>раб.<br>дн. | З <sub>осн</sub> ,<br>руб. |
|--------------|--------------------------|-----------------|----------------|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Руководитель | 23264                    | 0,3             | 1              | 1,3            | 39319                   | 1310                      | 12                              | 15720                      |
| Магистрант   | -                        | -               | -              | -              | -                       | -                         | -                               | -                          |

Дополнительная заработная плата научно-производственного персонала

В данную статью включается сумма выплат, предусмотренных законодательством о труде, например, оплата очередных и дополнительных отпусков; оплата времени, связанного с выполнением государственных и общественных обязанностей; выплата вознаграждения за выслугу лет и т.п. (в среднем – 12 % от суммы основной заработной платы).

Дополнительная заработная плата рассчитывается исходя из 10-15% от основной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнении темы:

$$З_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot З_{\text{осн}}$$

где  $З_{\text{доп}}$  – дополнительная заработная плата, руб.;

$k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной зарплаты;

$З_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.

В таблице приведен расчёт основной и дополнительной заработной платы.

Таблица 4.2 – Заработная плата исполнителей

| Заработная плата                 | Руководитель | Магистрант |
|----------------------------------|--------------|------------|
| Основная зарплата                | 15720        | -          |
| Дополнительная зарплата          | 1572         | -          |
| Отчисления во внебюджетные фонды | 3458         |            |
| Итого по статье $C_{\text{зп}}$  | 20750        |            |

Отчисления на социальные нужды. Статья включает в себя отчисления во внебюджетные фонды.

$$C_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,2 \cdot (15720 + 1572) = 3458$$

,где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

Таблица 4.3 – Затраты на покупку оборудования

| Наименование оборудования | Стоимость, руб |
|---------------------------|----------------|
| Компьютер                 | 38600          |
| Принтер                   | 5300           |
| Сканер                    | 4100           |
| Итого:                    | 48000          |

Таблица 4.4 – Затраты на покупку материалов

| Наименование материала | Количество | Стоимость, руб |
|------------------------|------------|----------------|
| Бумага формата А4      | 1000       | 200            |
| Бумага формата А3      | 10         | 35             |
| Картридж ч/б           | 1          | 400            |
| Картридж цветной       | 1          | 800            |
| Итого:                 | 1435       |                |

### ***Научные и производственные командировки***

В эту статью включаются расходы по командировкам научного и производственного персонала, связанного с непосредственным выполнением конкретного проекта, величина которых принимается в размере 10% от основной и дополнительной заработной платы всего персонала, занятого на выполнении данной темы.

### **Накладные расходы**

В эту статью включаются затраты на управление и хозяйственное обслуживание, которые могут быть отнесены непосредственно на конкретную тему. Кроме того, сюда относятся расходы по содержанию,

эксплуатации и ремонту оборудования, производственного инструмента и инвентаря, зданий, сооружений и др. В расчетах эти расходы принимаются в размере 70 - 90 % от суммы основной заработной платы научно-производственного персонала данной научно-технической организации.

Накладные расходы составляют 80-100 % от суммы основной и дополнительной заработной платы, работников, непосредственно участвующих в выполнение темы.

Расчет накладных расходов ведется по следующей формуле:

$$C_{\text{накл}} = k_{\text{накл}} \cdot (З_{\text{осн}} + З_{\text{доп}}) = 0,8 \cdot (15720 + 1572) = 13833$$

где  $k_{\text{накл}}$  – коэффициент накладных расходов.

#### **4.4. Планирование исследования**

Планирование проекта является неотъемлемой частью работы. Правильное планирование всех этапов от разработки проекта до конечного продукта, позволяет более точно и рационально использовать денежные средства и необходимые трудовые ресурсы. Календарный план работ сведен в таблицу 4.5.

Таблица 4.5. – Календарный план работ по проекту

| № Работы | Название                                                                                 | Длительность, дни | Дата начала работ | Дата окончания работ | Состав участников (ФИО ответственных исполнителей) |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------------------------------------|
| 1        | Разработка технического задания                                                          | 4                 | 1.01              | 4.01                 | Руководитель                                       |
| 2        | Изучение литературы                                                                      | 5                 | 5.01              | 10.01                | Магистрант                                         |
| 3        | Анализ существующего лабораторного практикума                                            | 3                 | 10.01             | 12.01                | Магистрант                                         |
| 4        | Выбор системы управления курсом                                                          | 2                 | 13.01             | 14.01                | Магистрант                                         |
| 5        | Выбор программного комплекса для моделирования                                           | 3                 | 15.01             | 17.01                | Магистрант                                         |
| 6        | Согласование результатов с руководителем                                                 | 3                 | 18.01             | 21.01                | Руководитель                                       |
| 7        | Изучение программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS                                      | 10                | 22.01             | 3.02                 | Магистрант                                         |
| 8        | Изучение особенностей моделирования трансформатора, как основного элемента энергосистемы | 2                 | 4.02              | 6.02                 | Магистрант                                         |
| 9        | Создание модели трансформатора к лабораторной работе №1                                  | 20                | 7.02              | 27.02                | Магистрант                                         |

|    |                                                                                  |   |       |       |              |
|----|----------------------------------------------------------------------------------|---|-------|-------|--------------|
| 10 | Согласование результатов с руководителем                                         | 5 | 28.02 | 3.03  | Руководитель |
| 11 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №1                        | 2 | 4.03  | 6.03  | Магистрант   |
| 12 | Разработка тестового примера                                                     | 2 | 7.03  | 8.03  | Магистрант   |
| 13 | Анализ результатов                                                               | 2 | 9.03  | 10.03 | Магистрант   |
| 14 | Создание приложения модели трансформатора к лабораторной работе №2               | 2 | 11.03 | 12.03 | Магистрант   |
| 15 | Согласование результатов с руководителем                                         | 3 | 13.03 | 15.03 | Руководитель |
| 16 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №2                        | 2 | 16.03 | 17.03 | Магистрант   |
| 17 | Разработка тестового примера                                                     | 2 | 26.03 | 27.03 | Магистрант   |
| 18 | Анализ результатов                                                               | 2 | 28.03 | 29.02 | Магистрант   |
| 19 | Изучение особенностей моделирования кабеля, как основного элемента энергосистемы | 2 | 30.03 | 31.03 | Магистрант   |
| 20 | Создание модели кабеля к лабораторной работе №3                                  | 4 | 3.04  | 7.04  | Магистрант   |
| 21 | Согласование результатов с руководителем                                         | 3 | 8.04  | 10.04 | Руководитель |
| 22 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №3                        | 2 | 11.04 | 12.04 | Магистрант   |

|    |                                                                                                 |   |       |       |              |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---|-------|-------|--------------|
| 23 | Разработка тестового примера                                                                    | 2 | 13.04 | 14.04 | Магистрант   |
| 24 | Анализ результатов                                                                              | 2 | 15.04 | 16.04 | Магистрант   |
| 25 | Изучение особенностей моделирования цепи с распределенными параметрами                          | 2 | 17.04 | 18.04 | Магистрант   |
| 26 | Создание модели цепи с распределенными параметрами к лабораторной работе №4                     | 2 | 19.04 | 20.04 | Магистрант   |
| 27 | Согласование результатов с руководителем                                                        | 3 | 21.04 | 23.04 | Руководитель |
| 28 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №4                                       | 2 | 24.04 | 25.04 | Магистрант   |
| 29 | Разработка тестового примера                                                                    | 2 | 26.04 | 27.04 | Магистрант   |
| 30 | Анализ результатов и проверка                                                                   | 2 | 28.04 | 29.04 | Руководитель |
| 31 | Планирование дополнительного исследования                                                       | 4 | 30.04 | 3.05  | Руководитель |
| 32 | Исследование параметров трехфазного кабеля с помощью программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS | 4 | 4.05  | 7.05  | Магистрант   |
| 33 | Согласование результатов с руководителем                                                        | 2 | 8.05  | 9.05  | Руководитель |

|        |                                                                                        |     |       |       |              |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|-------|-------|--------------|
| 34     | Оформление проекта (ВКР) в соответствии со стандартами СО ТПУ                          | 8   | 10.05 | 18.05 | Магистрант   |
| 35     | Принятие лабораторного практикума руководителем и Принятие проекта (ВКР) руководителем | 8   | 19.05 | 27.05 | Руководитель |
| Итого: |                                                                                        | 128 |       |       |              |

Целью первого этапа является разработка технического задания. Далее был проведен обзор и анализ литературы. Данный этап был направлен на формирование информационной базы проекта.

Далее был выполнен выбор инструментальных средств выполнения проектируемых лабораторных работ, разработаны методические указания и созданы тестовые примеры выполнения четырех лабораторных работ. Также проанализированы результаты и внесены соответствующие правки.

Готовый проект представлен руководителю для оценки результатов производственной работы.

Время необходимое для разработки электронного курса по дисциплине «Математическое моделирование», составляет около 107 календарных дней.

Таблица 4.6. – Календарный план-график

| № работы | Вид работ                       | Исполнитель  | Т <sub>к</sub> , кал, дн. | Продолжительность выполнения работ                                                  |         |      |        |      |
|----------|---------------------------------|--------------|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------|------|--------|------|
|          |                                 |              |                           | январь                                                                              | февраль | март | апрель | май  |
|          |                                 |              |                           | 1-31                                                                                | 1-28    | 1-31 | 1-30   | 1-31 |
| 1        | Разработка технического задания | Руководитель | 4                         |  |         |      |        |      |
| 2        | Изучение литературы             | Магистрант   | 5                         |  |         |      |        |      |

|    |                                                                                          |              |    |                                                                                    |                                                                                      |                                                                                       |  |  |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|----|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| 3  | Анализ существующего лабораторного практикума                                            | Магистрант   | 3  |   |                                                                                      |                                                                                       |  |  |
| 4  | Выбор системы управления курсом                                                          | Магистрант   | 2  |   |                                                                                      |                                                                                       |  |  |
| 5  | Выбор программного комплекса для моделирования                                           | Магистрант   | 3  |   |                                                                                      |                                                                                       |  |  |
| 6  | Согласование результатов с руководителем                                                 | Руководитель | 3  |   |                                                                                      |                                                                                       |  |  |
| 7  | Изучение программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS                                      | Магистрант   | 10 |  |    |                                                                                       |  |  |
| 8  | Изучение особенностей моделирования трансформатора, как основного элемента энергосистемы | Магистрант   | 2  |                                                                                    |   |                                                                                       |  |  |
| 9  | Создание модели трансформатора к лабораторной работе №1                                  | Магистрант   | 20 |                                                                                    |  |                                                                                       |  |  |
| 10 | Согласование результатов с руководителем                                                 | Руководитель | 5  |                                                                                    |                                                                                      |  |  |  |

|    |                                                                    |              |   |  |  |                                                                                       |  |  |
|----|--------------------------------------------------------------------|--------------|---|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
| 11 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №1          | Магистрант   | 2 |  |  |    |  |  |
| 12 | Разработка тестового примера                                       | Магистрант   | 2 |  |  |    |  |  |
| 13 | Анализ результатов                                                 | Магистрант   | 2 |  |  |    |  |  |
| 14 | Создание приложения модели трансформатора к лабораторной работе №2 | Магистрант   | 2 |  |  |    |  |  |
| 15 | Согласование результатов с руководителем                           | Руководитель | 3 |  |  |  |  |  |
| 16 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №2          | Магистрант   | 2 |  |  |  |  |  |
| 17 | Разработка тестового примера                                       | Магистрант   | 2 |  |  |  |  |  |
| 18 | Анализ результатов                                                 | Магистрант   | 2 |  |  |  |  |  |
| 19 | Изучение особенностей моделирования кабеля, как                    | Магистрант   | 2 |  |  |  |  |  |

|    |                                                                                             |                  |   |  |  |  |  |  |
|----|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---|--|--|--|--|--|
|    | основного<br>элемента<br>энергосистемы                                                      |                  |   |  |  |  |  |  |
| 20 | Создание модели<br>кабеля к<br>лабораторной<br>работе №3                                    | Магистран<br>т   | 4 |  |  |  |  |  |
| 21 | Согласование<br>результатов с<br>руководителем                                              | Руководите<br>ль | 3 |  |  |  |  |  |
| 22 | Разработка<br>методических<br>указаний к<br>лабораторной<br>работе №3                       | Магистран<br>т   | 2 |  |  |  |  |  |
| 23 | Разработка<br>тестового<br>примера                                                          | Магистран<br>т   | 2 |  |  |  |  |  |
| 24 | Анализ<br>результатов                                                                       | Магистран<br>т   | 2 |  |  |  |  |  |
| 25 | Изучение<br>особенностей<br>моделирования<br>цепи с<br>распределенным<br>и параметрами      | Магистран<br>т   | 2 |  |  |  |  |  |
| 26 | Создание модели<br>цепи с<br>распределенным<br>и параметрами к<br>лабораторной<br>работе №4 | Магистран<br>т   | 2 |  |  |  |  |  |

|    |                                                                                                 |              |   |  |  |  |  |                                                                                       |                                                                                       |
|----|-------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|---|--|--|--|--|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 27 | Согласование результатов с руководителем                                                        | Руководитель | 3 |  |  |  |  |    |                                                                                       |
| 28 | Разработка методических указаний к лабораторной работе №4                                       | Магистрант   | 2 |  |  |  |  |    |                                                                                       |
| 29 | Разработка тестового примера                                                                    | Магистрант   | 2 |  |  |  |  |    |                                                                                       |
| 30 | Анализ результатов и проверка                                                                   | Руководитель | 2 |  |  |  |  |    |                                                                                       |
| 31 | Планирование дополнительного исследования                                                       | Руководитель | 4 |  |  |  |  |   |                                                                                       |
| 32 | Исследование параметров трехфазного кабеля с помощью программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS | Магистрант   | 4 |  |  |  |  |  |                                                                                       |
| 33 | Согласование результатов с руководителем                                                        | Руководитель | 2 |  |  |  |  |                                                                                       |  |
| 34 | Оформление проекта (ВКР) в соответствии со                                                      | Магистрант   | 8 |  |  |  |  |                                                                                       |  |

|    |                                                                                                          |                  |   |  |  |  |  |                                                                                     |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|---|--|--|--|--|-------------------------------------------------------------------------------------|
|    | стандартами СО<br>ТПУ                                                                                    |                  |   |  |  |  |  |                                                                                     |
| 35 | Принятие<br>лабораторного<br>практикума<br>руководителем и<br>Принятие<br>проекта (ВКР)<br>руководителем | Руководите<br>ль | 8 |  |  |  |  |  |

### ***Прямой проход по сети***

*Раннее начало каждой работы* можно определить, двигаясь по графику слева направо. Всякая первая работа может начаться в момент  $t=0$ . В точке «схождения» нескольких работ (например, работа 4) отражается самое позднее завершение всех работ, предшествующих данной точке. Тогда раннее начало последующей работы определяется максимальной из сумм раннего начала предшествующей работы и продолжительности этой же работы:

$$t_{\text{рн}}(j) = \max[t_{\text{рн}}(i) + T(i)]$$

,где  $t_{\text{рн}}(j)$  – раннее начало последующей работы;

$t_{\text{рн}}(i)$  – раннее начало предшествующей работы;

$T(i)$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях.

*Раннее окончание работы* рассчитывается по формуле

$$t_{\text{по}}(i) = t_{\text{рн}}(i) + T(i)]$$

*Критический путь* – максимальное время выполнения работ по всей теме в целом:

$$T_{\text{кр}} = T[L_{\text{max}}(1, \text{зав.})]$$

,где  $L_{\max}(1, \text{зав.})$  – максимальный путь от первой работы до завершающей.

Следует учесть, что раннее начало завершающей работы сети принимают равным ее позднему началу:

$$t_{\text{рн}}(\text{зав.}) = t_{\text{пн}}(\text{зав.})$$

а раннее окончание завершающей работы сети принимают равным ее позднему окончанию:

$$t_{\text{ро}}(\text{зав.}) = t_{\text{по}}(\text{зав.})$$

### **Обратный проход по сети**

Определение поздних сроков работ начинается с завершающей работы и ведется строго в обратном порядке, приближаясь к начальной работе.

*Позднее начало каждой работы* можно определить, двигаясь по графику справа налево. В точке «схождения» нескольких работ (например, 6 работа) используется самое раннее время завершения из входящих в нее работ:

$$t_{\text{пн}}(i) = \min t_{\text{пн}}(j) - T(i)$$

где  $t_{\text{пн}}(i)$  – позднее начало  $i$ -ой работы;

$\min t_{\text{пн}}(j)$  – минимальная величина позднего начала  $j$ -ой работы;

$T(i)$  – продолжительность выполнения  $i$ -ой работы в календарных днях.

*Позднее окончание работы* рассчитывается с учетом точки «схождения» нескольких работ (например, работа 6) по следующей формуле:

$$t_{\text{по}}(i) = \min t_{\text{пн}}(j)$$

где  $t_{\text{по}}(i)$  – позднее окончание  $i$ -ой работы;

$\min t_{\text{пн}}(j)$  – минимальная величина позднего начала работ, приходящихся на точку «схождения»  $i$ -ой работе.

### **Расчет резервов времени работы**

*Резерв времени полного пути.* Его величина показывает, на сколько в сумме могут быть увеличены продолжительности работ, принадлежащих полному пути:

$$R(L_n) = T_{кр} - T(L_n)$$

где  $T_{кр}$  – продолжительность критического пути;

$T(L_n)$  – продолжительность любого другого пути.

*Полный резерв времени работы* означает, что эта работа может начаться позднее, чем указано датами раннего начала. Использование этого резерва на одной из работ, аннулирует полные резервы времени всех остальных работ, лежащих на этом пути:

$$R_{\Pi}(i) = \min t_{\Pi}(j) - t_{\Pi}(i)$$

где  $\min t_{\Pi}(j)$  – минимальное позднее начало последующих работ, приходящихся на точку «схождения» к предшествующей работе;

$t_{\Pi}(i)$  – раннее окончание предшествующей работы.

Продолжительность критического пути больше продолжительности любого другого пути сетевого графика. Полный резерв времени работ критического пути равен нулю.

*Свободный резерв времени работы* указывает максимальное время, на которое можно увеличить продолжительность отдельной работы или отсрочить ее начало. Он является независимым резервом, т.к. его использование на одной из работ не меняет величины свободных резервов времени остальных работ:

$$R_c(i) = t_{рн}(j) - t_{рн}(i)$$

где  $t_{рн}(j)$  – раннее начало последующей работы;

$t_{рн}(i)$  – раннее начало предшествующей работы.

Сетевой график – графическое отображение комплекса работ по теме с установленными между ними взаимосвязями.

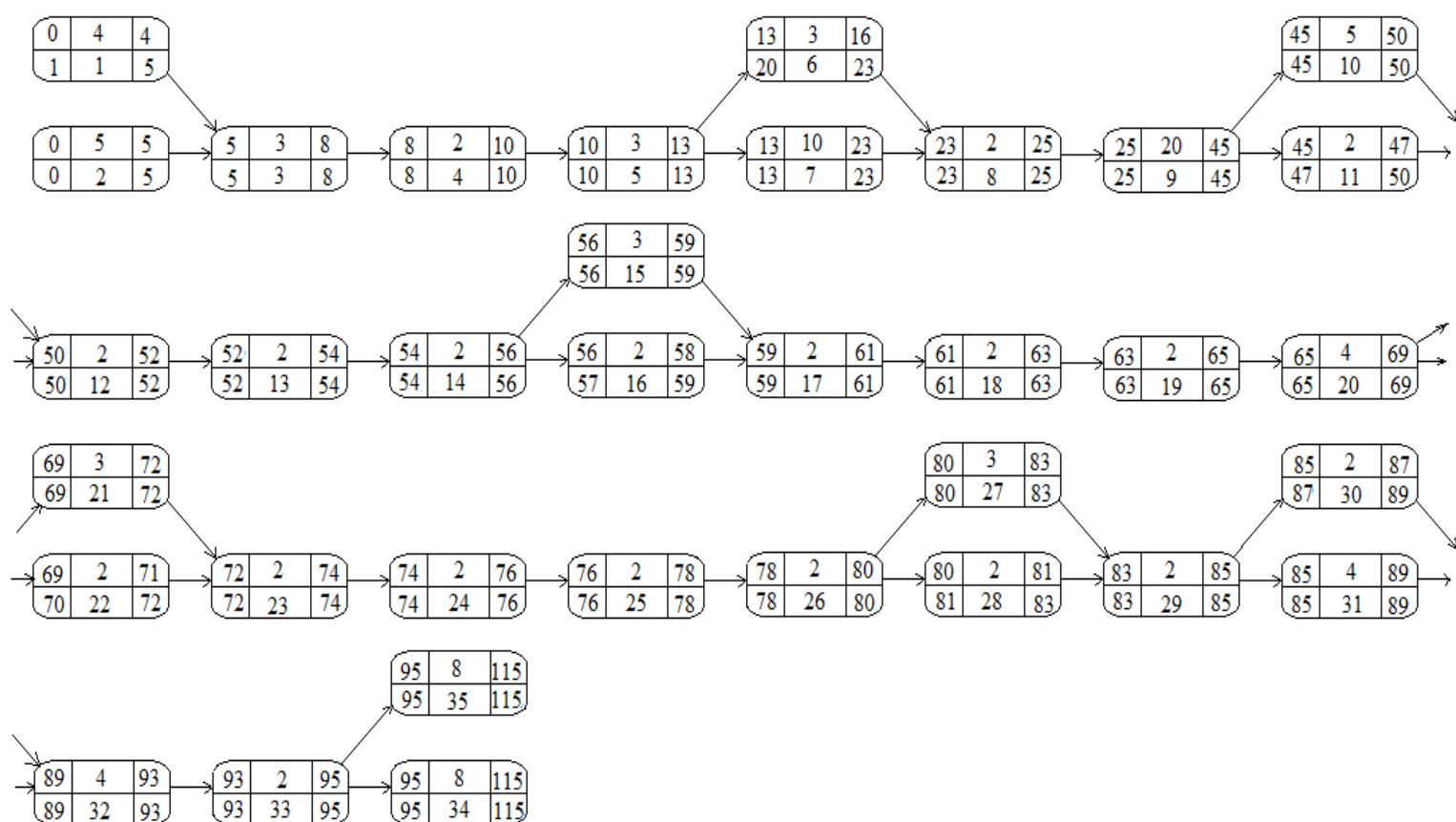


Рисунок 4.1. Сетевой график

#### 4.7. Параметры сетевого графика

| Название работы                                                                          | №<br>раб. | $T_{\text{кал}}$ | $t_{\text{рн}}$ | $t_{\text{ро}}$ | $t_{\text{пн}}$ | $t_{\text{по}}$ | $R_{\text{п}}$ | $R_{\text{с}}$ |
|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|
| Разработка технического задания                                                          | 1         | 4                | 0               | 4               | 1               | 5               | 0              | 5              |
| Изучение литературы                                                                      | 2         | 5                | 0               | 5               | 0               | 5               | 0              | 5              |
| Анализ существующего лабораторного практикума                                            | 3         | 3                | 5               | 8               | 5               | 8               | 0              | 3              |
| Выбор системы управления курсом                                                          | 4         | 2                | 8               | 10              | 8               | 10              | 0              | 2              |
| Выбор программного комплекса для моделирования                                           | 5         | 3                | 10              | 13              | 10              | 13              | 0              | 3              |
| Согласование результатов с руководителем                                                 | 6         | 3                | 13              | 16              | 20              | 23              | 7              | 10             |
| Изучение программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS                                      | 7         | 10               | 13              | 23              | 13              | 23              | 0              | 10             |
| Изучение особенностей моделирования трансформатора, как основного элемента энергосистемы | 8         | 2                | 23              | 25              | 23              | 25              | 0              | 2              |
| Создание модели трансформатора к лабораторной работе №1                                  | 9         | 20               | 25              | 45              | 25              | 45              | 0              | 20             |
| Согласование результатов с руководителем                                                 | 10        | 5                | 45              | 50              | 45              | 50              | 0              | 5              |
| Разработка методических указаний к лабораторной работе №1                                | 11        | 2                | 45              | 47              | 47              | 50              | 2              | 5              |
| Разработка тестового примера                                                             | 12        | 2                | 50              | 52              | 50              | 52              | 0              | 2              |
| Анализ результатов                                                                       | 13        | 2                | 52              | 54              | 52              | 54              | 0              | 2              |
| Создание приложения модели трансформатора к лабораторной работе №2                       | 14        | 2                | 54              | 56              | 54              | 56              | 0              | 2              |
| Согласование результатов с руководителем                                                 | 15        | 3                | 56              | 59              | 56              | 59              | 0              | 3              |
| Разработка методических указаний к лабораторной работе №2                                | 16        | 2                | 56              | 68              | 57              | 59              | 1              | 3              |
| Разработка тестового примера                                                             | 17        | 2                | 59              | 61              | 59              | 61              | 0              | 2              |

|                                                                                                 |    |   |    |    |    |    |   |   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|---|----|----|----|----|---|---|
| Анализ результатов                                                                              | 18 | 2 | 61 | 63 | 61 | 63 | 0 | 2 |
| Изучение особенностей моделирования кабеля, как основного элемента энергосистемы                | 19 | 2 | 63 | 65 | 63 | 65 | 0 | 2 |
| Создание модели кабеля к лабораторной работе №3                                                 | 20 | 4 | 65 | 69 | 65 | 69 | 0 | 4 |
| Согласование результатов с руководителем                                                        | 21 | 3 | 69 | 72 | 69 | 72 | 0 | 3 |
| Разработка методических указаний к лабораторной работе №3                                       | 22 | 2 | 69 | 71 | 70 | 72 | 1 | 3 |
| Разработка тестового примера                                                                    | 23 | 2 | 72 | 74 | 72 | 74 | 0 | 2 |
| Анализ результатов                                                                              | 24 | 2 | 74 | 76 | 74 | 76 | 0 | 2 |
| Изучение особенностей моделирования цепи с распределенными параметрами                          | 25 | 2 | 76 | 78 | 76 | 78 | 0 | 2 |
| Создание модели цепи с распределенными параметрами к лабораторной работе №4                     | 26 | 2 | 78 | 80 | 78 | 80 | 0 | 2 |
| Согласование результатов с руководителем                                                        | 27 | 3 | 80 | 83 | 80 | 83 | 0 | 3 |
| Разработка методических указаний к лабораторной работе №4                                       | 28 | 2 | 80 | 81 | 81 | 83 | 1 | 3 |
| Разработка тестового примера                                                                    | 29 | 2 | 83 | 85 | 93 | 85 | 0 | 2 |
| Анализ результатов и проверка                                                                   | 30 | 2 | 85 | 87 | 87 | 89 | 2 | 4 |
| Планирование дополнительного исследования                                                       | 31 | 4 | 85 | 89 | 85 | 89 | 0 | 4 |
| Исследование параметров трехфазного кабеля с помощью программного комплекса COMSOL MULTIPHYSICS | 32 | 4 | 89 | 93 | 89 | 93 | 0 | 4 |
| Согласование результатов с руководителем                                                        | 33 | 2 | 93 | 95 | 93 | 95 | 0 | 2 |

|                                                                                        |    |   |    |     |    |     |   |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|---|----|-----|----|-----|---|---|
| Оформление проекта (ВКР) в соответствии со стандартами СО ТПУ                          | 34 | 8 | 95 | 115 | 95 | 115 | 0 | 0 |
| Принятие лабораторного практикума руководителем и Принятие проекта (ВКР) руководителем | 35 | 8 | 95 | 115 | 95 | 115 | 0 | 0 |
| Резерв времени полного пути $R(L_{\text{п}}) = 10$                                     |    |   |    |     |    |     |   |   |
| Критический путь $T_{\text{кр}} = 115$                                                 |    |   |    |     |    |     |   |   |

#### **4.5. Смета на выполнение договора**

В данном разделе произведем расчет сметы расходов, которая включает в себя затраты на сырье, материалы, на заработную плату, на приобретения необходимого оборудования для разработки и на прочие расходы.

##### **Смета**

##### **Расходов на выполнение научного исследования**

**№ 5АМ5Г10 от «01» января 2017 г.**

**на 2017 год**

Срок действия договора до 31.05.2017

| Наименование статей расходов                              | Статьи расходов по<br>кодам ЭКР | Всего,<br>руб. |
|-----------------------------------------------------------|---------------------------------|----------------|
| Фонд заработной платы основной                            | 211                             | 15720          |
| Фонд заработной платы дополнительной                      |                                 | 1572           |
| Фонд заработной платы общий                               |                                 | 17292          |
| Начисления на выплаты по оплате труда,<br>30.2 %          | 213                             | 5187           |
| Оплата услуг связи                                        | 221                             | 500            |
| Расходы на оборудование                                   |                                 | 48000          |
| Расходы на материалы                                      |                                 | 1435           |
| Итого прямые расходы                                      |                                 | 72414          |
| Накладные расходы, 10 %                                   |                                 | 8046           |
| НДС, 18 %                                                 |                                 | 14482          |
| Итого прямые расходы с учетом накладных<br>расходов и НДС |                                 | 94942          |

#### **4.6. Вывод по главе 4**

В третьей главе выпускной квалификационной работы были рассчитаны затраты на создание электронного курса «Математическое моделирование в электроэнергетике». В процессе работы было выполнено следующее:

1. Представлена организационная структура проекта;
2. Сформирован план выполнения проекта и рассчитаны основные затраты
3. Выполнена смета расходов на выполнения работ

Длительность запланированных работ составляет 128 календарных дней. Прямые расходы с учетом НДС и накладных расходов составляют 94942 рублей.

Основной целью данного проекта является улучшение качества преподавания дисциплины

В связи с этим, прямой эффект от внедрения созданных лабораторных работ достаточно сложно рассчитать, что выходит за пределы данного исследования.