

БАЗОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ FEM – АНАЛИЗА ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

Введение. Большинство устройств повседневного использования зависит от передового электромагнитного оборудования. Оптимизация производительности этих сложных устройств требует точного моделирования электромагнитных полей, деталей схем и оценки системы в целом. Рост быстродействия цифровой техники вызывает увеличение тепловой нагрузки и вызывает необходимость более тщательного исследования проблем электромагнитной и тепловой напряженности. ПО инженерного моделирования включает в себя средства развития и оптимизации в виртуальной среде проектов в области электроники. Команды разработчиков определяют архитектуру устройства, проверяют спецификации функциональных блоков, проектируют схемы и компоненты, оценивают взаимодействие на уровне компонентов и системы, а также оптимизируют производительность схем или систем под воздействием внешних условий эксплуатации. Нет области науки или промышленности, в которой нельзя использовать эти численные инструменты для виртуальной работы по оптимизации электрических схем и компонентных взаимодействий, с минимальным использованием натурной реализации. При использовании подобного инструмента появляется возможность сократить время и затраты, связанные с проектированием сложных электрических устройств. Потребители требуют функций, в которых электромагнитные проекты еще более сложные. В результате, возможность дифференциации на рынке еще никогда не была так выражена. В то же время риск отказа устройства и его последствия могут быть катастрофическими.

Программное обеспечение на базе метода конечных элементов (finite element modeling – FEM) позволяет разрабатывать современные электронные системы, такие как авионика, встроенное управление и бортовые коммуникации (включая антенны, их элементы фиксации, роторный эффект и пересечения секций радара). Безопасность реализуется на высоком уровне с выполнением соответствующих стандартов надежности и отношения цена/эффект.

Для реализации данных возможностей в качестве базовых рассматриваются моделирование магнитного поля и потерь в двух длинных параллельных проводниках и моделирование линейных электрических схем. В качестве инструментальной среды использована САПР Ansys Multiphysics.

В процессе проектирования выполнен расчет характеристик нескольких устройств, включающий следующие этапы:

- описание геометрии; генерацию сети конечных элементов; описание физических характеристик;
- расчет с помощью метода конечных элементов;
- визуализацию и интерпретацию результатов моделирования.

1. Инструментальные системы, применяемые для моделирования схем методом конечных элементов. Развитие САПР приводит к сокращению времени проектирования, повышению точности проектирования и скорости разработки. Одной из систем автоматического проектирования является Ansys Multiphysics. Данный продукт предназначен для выполнения моделирования междисциплинарных задач.

Основные особенности элементов в сопряженных междисциплинарных задачах: одиночная модель упрощает междисциплинарное моделирование; поддержка широкого набора сопряженных областей физики; отказоустойчивость при решении высоконелинейных междисциплинарных задач; поддержка параллельных вычислений; влияние нелинейных материалов и геометрии.

На уровне программного обеспечения этапы проектирования соответствуют трем функциям, выполняемым отдельными модулями: модулем ввода данных (препроцессором); модулем вычислений

(процессором); модулем вывода результатов (постпроцессором).

В настоящее время существует множество программных комплексов, применяемых для моделирования схем методом конечных элементов. Среди них можно выделить следующие: ANSYS Multiphysics; Maxwell; COMSOL Multiphysics; ELCUT; Elmer; CodeAster, Salome [1].

2. Моделирование магнитного поля в ANSYS. Рассмотрим моделирование магнитного поля и потерь в двух длинных параллельных проводниках размерами 50x120 мм. Используются токи с частотой 50 Гц, сдвинутые по фазе на 180 градусов. В расчете используются элементы, перечисленные в таблице 1.

Основные этапы моделирования включают в себя [2]: задание используемых элементов и материалов; построение геометрической и конечно-элементной модели; задание граничных условий и нагрузки; просмотр и обработка результатов измерений.

Таблица 1 – Используемые элементы

№	Тип элемента
1	PLANE53
2	PLANE53
3	INFIN110

Зададим свойства материалов, используемых для моделирования. Свойства материалов, применяемые для описываемой конечно-элементной модели, описаны в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства материалов

Свойство	Значение
Материал 1 – воздух	
Relativepermeability	1
MURX	
Electricalresistivity RSVX	1e+32
Материал 2 – первый проводник	
Relativepermeability	1
MURX	
Electricalresistivity RSVX	3e-8
Материал 3 – второй проводник	
Relativepermeability	1
MURX	
Electricalresistivity RSVX	3e-8

Построим геометрическую модель со следующими характеристиками. Введем параметрические переменные геометрических размеров: $D=0.025$ – половина зазора между проводниками, м; $B=0.05$ – ширина проводника, м; $H=0.12$ – высота проводника, м; $Rin=0.24$ – радиус внутренней области, м; $Rout=0.4$ – радиус внешней границы области, м.

Используя инструменты Rectangle ->ByDimensions и Circle ->ByDimensions из главного меню, построим все необходимые области. Внешний вид геометрической модели представлен на рисунке 1.

Далее присвоим атрибуты созданным областям. Область **A1** (проводник): Materialnumber – 2; Real constant – none; Element Type number – 2 Plane53; Elementcoord. Sys – 0. Области **A3** и **A4** (воздух): Material number – 1; Real constant – none; Element Type number – 1 Plane53; Elementcoord. Sys – 0. Область **A2** (зона элементов «бесконечности»): Material number – 1; Real constant – none; Element Type number – 3 INFIN110; Elementcoord. Sys. – 0.

Хведчук Владимир Иванович, к. т. н., доцент кафедры ????

Брестского государственного технического университета; e-mail: liddan@mail.ru.

Антоник Игорь Андреевич, магистрант Брестского государственного технического университета; e-mail: web@svjatogor.by. Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

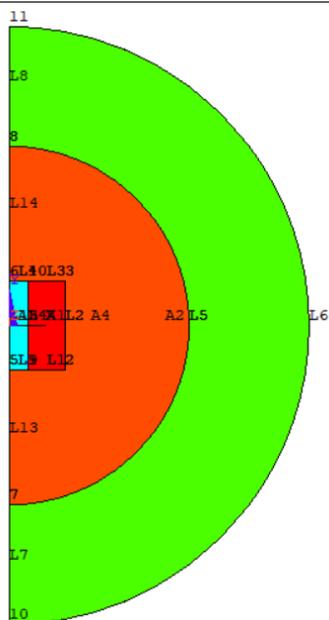


Рисунок 1 – Геометрическая модель

Построим конечно-элементную модель. Для этого произведём сеточное разбиение геометрической модели, используя элемент Meshing ->MeshTool. После выполнения сеточного разбиения симметрично отразим модель. В результате получим модель, представленную на рисунке 2.

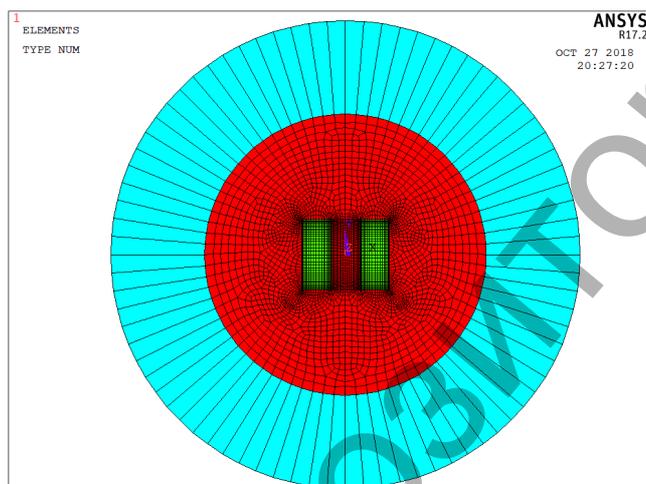


Рисунок 2 – Сеточное разбиение для конечно-элементной модели

Зададим граничные условия и нагрузки. В качестве параметров нагрузки введём следующие переменные: $I1=100$ – общий ток через сечение правого проводника, А; $F1=0$ – общая фаза тока правого проводника, град.; $I2=100$ – общий ток через сечение левого проводника, А; $F2=180$ – общая фаза тока левого проводника, град.; $Omz=50$ – частота тока, Гц.

Вычислим площади правого и левого проводников, полученные значения сохраним в переменных Area1 и Area2. Задайте связь вольтовых степеней свободы узлов проводника (что означает их равенство). Используя полученные значения, вычислим начальные плотности токов в проводниках.

Перейдём в меню решателя. Выберем тип анализа (гармонический) и запустим задачу на решение. Для просмотра результатов зайдём в постпроцессор. Распределение магнитной индукции в проводниках показано на рисунке 3.

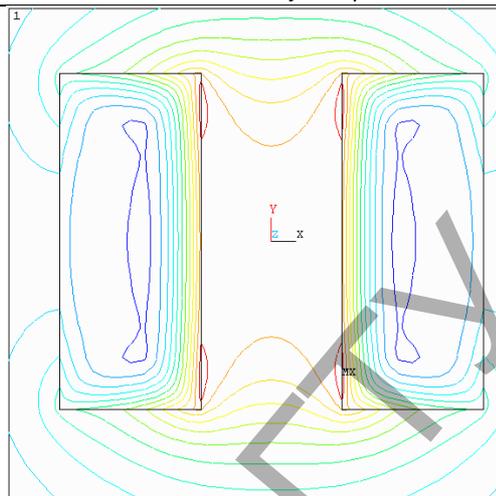


Рисунок 3 – Распределение магнитной индукции в проводниках

Таким же образом можно смоделировать магнитное поле катушки индуктивности. Пусть имеется катушка индуктивности со следующими параметрами: кол-во витков $N=500$; внутренний радиус 40 мм; внешний радиус 80 мм; высота катушки 20 мм; коэффициент заполнения 0.8; ток в обмотке 1А; частота $\omega=60$ Гц. Свойства материалов: относительная магнитная проницаемость $\mu_r=1$ (для катушки); $\mu_r=1$ (для воздуха). Удельное сопротивление материала провода $\rho=3 \cdot 10^{-8}$ Ом/м.

Учитывая осесимметричность модели, решение проведем для четверти сечения катушки (первый квадрант). На рабочей плоскости изобразим четверть сечения катушки в виде прямоугольника. Воздушное пространство изобразим в виде четверти окружности, разбитой на две части по радиусу. Внутренняя часть – воздух, внешняя часть – воздух с моделированием затухания поля на бесконечности. Как и в предыдущей задаче, используем элементы PLANE53 (для разбиения воздушного пространства и площади сечения катушки) и INFIN110 (для моделирования бесконечности).

Создадим область, имитирующую четверть сечения катушки. Внешний вид полученной области показан на рисунке 4.

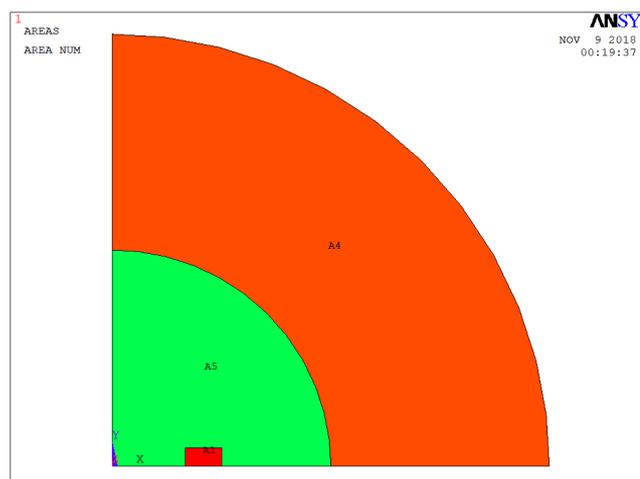


Рисунок 4 – Область, имитирующая четверть сечения катушки

Выполним разбиение областей на конечные элементы. Для разбиения используем вкладку Meshing из меню Preprocessor. Результат сеточного разбиения показан на рисунке 5.

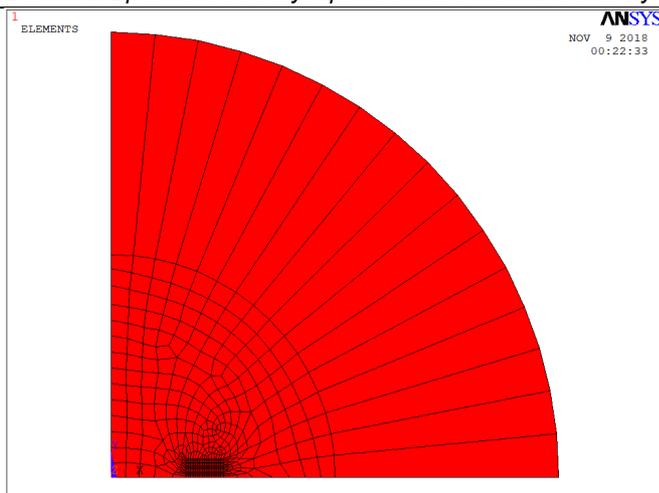


Рисунок 5 – Внешний вид сеточного разбиения для задачи моделирования магнитного поля катушки индуктивности

Зададим начальные условия. Выберем узлы, принадлежащие внешнему радиусу, и присвоим им значение бесконечно удаленной границы. Далее выделим узел в начале координат и присвоим ему начальное смещение, используя Magnetic->Boundary ->Vectorpoten ->onnodes.

Установим вид расчёта. Выберем тип анализа: гармонический, зададим частоту магнитного поля: 60 Гц. Запустим задачу на решение. Внешний вид результатов расчёта магнитной индукции по модулю показан на рисунке 6.

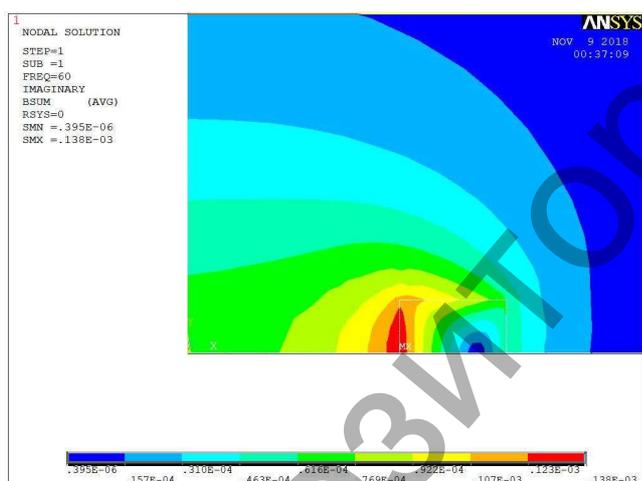


Рисунок 6 – Внешний вид результатов расчёта магнитной индукции по модулю

3. Моделирование схем методом конечных элементов

Рассмотрим моделирование схем в конечно-элементных системах на примере конечно-элементной модели, представленной на рисунке 7. Параметры конечно-элементной модели представлены в таблице 3.

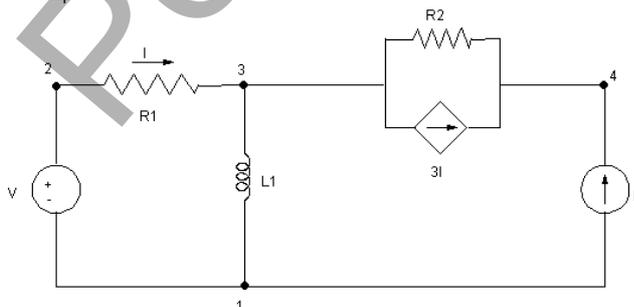


Рисунок 7 – Конечно-элементная модель

Таблица 3 – Параметры конечно-элементной модели

Элемент	Параметр	Значение	Единица измерения
R1	сопротивление	3	Ом
R2	сопротивление	2	Ом
L1	индуктивность	4	
AI	коэффициент усиления тока	-3	
V	напряжение (амплитуда)	15	В
	фаза	30	градусы
I	сила тока	5	А
	Фаза	45	градусы

Для моделирования будет использован программный комплекс ANSYS MultiPhysics 13.0 в командном режиме и конечный элемент CIRCU124. CIRCU124 – это конечный элемент, предназначенный для выполнения моделирования электрических цепей. Он позволяет моделировать как элементы цепей, так и источники сигналов. Роль, выполняемая элементом, задаётся при помощи параметра KEYOPT(1). Элементы, для моделирования которых может использоваться CIRCU124, описаны в таблицах 4 и 5. Параметр KEYOPT(2) описывает вид моделируемого напряжения или тока (постоянное, синусоидальное, импульсное, экспоненциальное) и в таблице не упоминается. Рассматриваются только элементы с KEYOPT(2) = 0 (постоянное напряжение или ток).

Основные параметры источников сигнала с KEYOPT(2) > 0 и их влияние на форму сигнала отражены в моделировании источников тока и напряжения следующих видов: с постоянной амплитудой; синусоидальный; экспоненциальный; импульсный; кусочно-линейный.

Помимо элемента CIRCU124, для моделирования электрических цепей также используется элемент CIRCU125, который позволяет описывать диоды (KEYOPT(1) = 0) и диоды Зенера (стабилитроны, KEYOPT(1) = 1). Этот элемент также позволяет взаимодействовать с электромагнитными и механическими конечными элементами для выполнения полного электромеханического моделирования на уровне объединения параметров. Для взаимодействия предусмотрены интерфейсы, поддерживающие механические конечные элементы MASS21, COMBIN14 и COMBIN39, конечным элементом электрических цепей CIRCU124, и с электромеханическим преобразовательным элементом TRANS126.

Конечно-элементная модель в контексте элементов ANSYS CIRCU124 представлена на рисунке 8.

Для реализации конечно-элементной модели необходимо описать: типы элементов; вещественные константы; точки соединения элементов.

ANSYS Multiphysics поддерживает два режима работы для описания параметров конечных элементов, построения схем и выбора типа анализа: с использованием графического интерфейса (GUI); с использованием командной строки и собственного языка команд APDL.

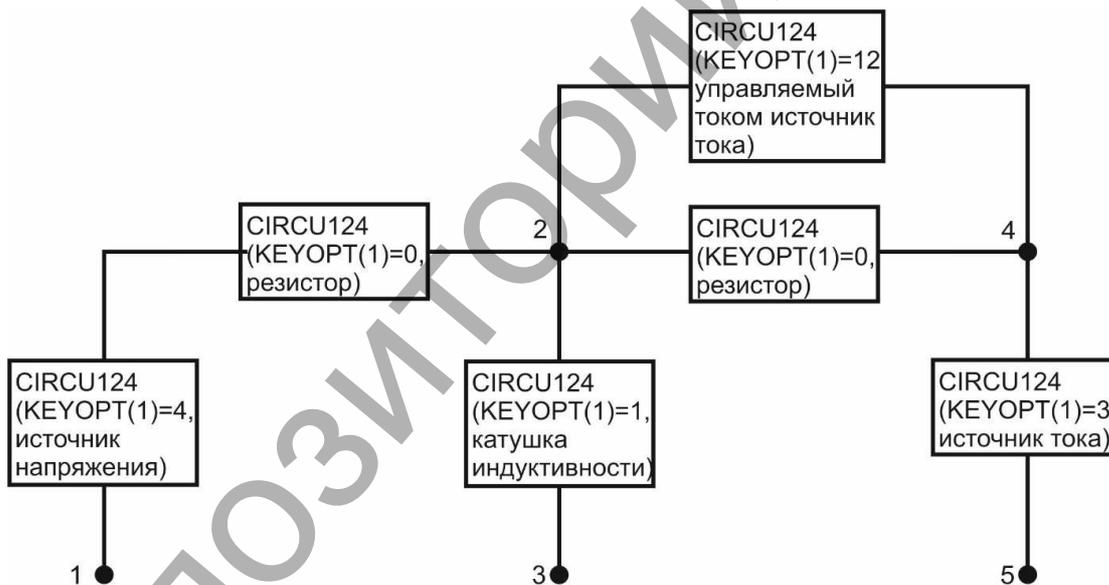
При построении схемы с использованием графического режима используется конструктор схем CircuitBuilder, доступ к элементам которого можно получить, используя меню программы Preprocessor ->Modelling ->Create ->Circuit ->Builder. Работа с использованием конструктора предполагает построение схемы методом поочерёдного выбора необходимых элементов цепей. Недостатком данного метода является отсутствие возможности отменить последнее совершённое действие и невозможность повторного использования описанных элементов в других схемах. Этот недостаток может быть решён использованием файла истории, поскольку ANSYS сохраняет все результаты действий с использованием Circuit Builder в отдельный файл в виде APDL команд, однако из-за необходимости дополнительной поддержки графического отображения элементов схемы данный файл выглядит намного объёмнее APDL кода, написанного вручную. Внешний вид конечно-элементной модели, представленной на рисунке 7, построенный с использованием Circuit Builder, представлен на рисунке 9.

Таблица 4 – Элементы цепей и их свойства, моделируемые при помощи CIRCU124

Элемент цепи	KEYOPT(1)	DOF (степени свободы)	Вещественные постоянные
Резистор	0	VOLT	R1 – Сопротивление (RES)
Катушка индуктивности	1	VOLT	R1 – Индуктивность (IND) R2 – Начальная сила тока (ILO)
Конденсатор	2	VOLT	R1 – Ёмкость (CAP) R2 – Начальное напряжение (VCO)
Катушка индуктивности с двумя обмотками	8	VOLT	R1 – Индуктивность первичной обмотки (IND1) R2 – Индуктивность вторичной обмотки (IND2) R3 – Коэффициент трансформации (K)

Таблица 5 – Источники сигналов и их свойства, моделируемые при помощи CIRCU124

Элемент цепи	KEYOPT(1)	DOF (степени свободы)	Вещественные постоянные
Источник тока	3	VOLT	ДляKEYOPT(2)=0: R1 – Амплитуда (AMPL) R2 – Фаза (PHAS)
Источник напряжения	4	VOLT (I, J) CURR (K)	ДляKEYOPT(2)=0: R1 – Амплитуда (AMPL) R2 – Фаза (PHAS)
Управляемый напряжением источник тока	9	VOLT	R1 – Крутизна характеристики (GT)
Управляемый напряжением источник напряжения	10	VOLT (I, J, L, M) CURR (K)	R1 – Коэффициент усиления напряжения (AV)
Управляемый током источник напряжения	11	VOLT (I, J, L, M) CURR (K, N)	R1 – Крутизна характеристики (RT)
Управляемый током источник тока	12	VOLT (I, J, L, M) CURR (K, N)	R1 – Коэффициент усиления тока (AI)



Начальные ограничения для точек 1, 3, 5 - напряжение, равно нулю

Рисунок 8 – Конечно-элементная модель в контексте элементов ANSYS CIRCU124

Построение схемы с использованием командного языка APDL требует предварительного построения схемы на бумаге или в любом другом удобном виде, поскольку используемые для описания схемы APDL команды требуют указания точек соединения элементов (на рисунке 1 это точки с номерами от одного до четырёх). Однако данный способ позволяет повторно использовать описанные элементы схемы благодаря наличию APDL кода, написанного для реализации той или иной схемы с использованием конечных элементов. Поэтому далее будет использоваться командный способ описания схем.

Для описания типов элементов в ANSYS используется команда ET. Формат команды следующий:
ET, ITYPE, Ename, KOP1, KOP2, KOP3, KOP4, KOP5, KOP6, INOPR, где ITYPE – локальный номер типа элемента;

Ename – название элемента (в данном случае – CIRCU124);
KOP1...KOP6 – KEYOPT-значения для данного типа элемента (для CIRCU124 – согласно таблице 2 и 3);
INOPR – если 1, не использует данный элемент при выводе результатов моделирования для всех элементов данного типа.
Опишем необходимые элементы конечно-элементной модели:
ET, 1, CIRCU124, 4 ! ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ
ET, 2, CIRCU124, 3 ! ИСТОЧНИК ТОКА
ET, 3, CIRCU124, 0 ! РЕЗИСТОР
ET, 4, CIRCU124, 1 ! КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ
ET, 5, CIRCU124, 12 ! УПРАВЛЯЕМЫЙ ТОКОМ ИСТОЧНИК ТОКА

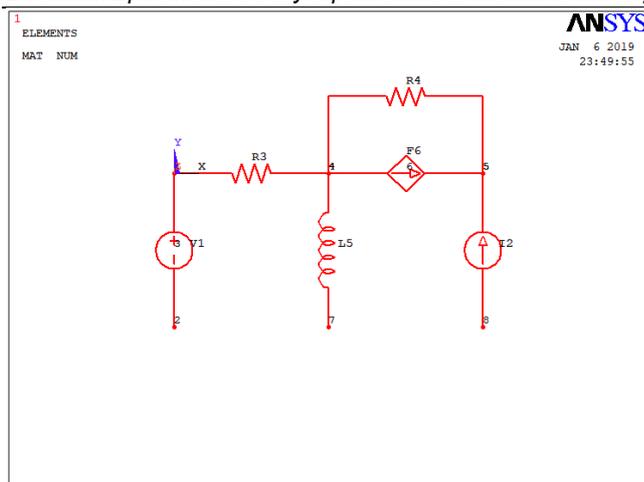


Рисунок 9 – Внешний вид конечно-элементной модели, построенной с использованием Circuit Builder

Для описания вещественных констант в ANSYS используется команда R. Формат команды следующий:

R, NSET, R1, R2, R3, R4, R5, R6,

где NSET – номер множества (связывает вещественную константу с определённым элементом);

R1...R6 – вещественные константы элемента (для CIRCU124 – согласно таблице 2 и 3).

Опишем необходимые вещественные константы для конечно-элементной модели:

R, 1, 15, 30 ! ИСТОЧНИК НАПРЯЖЕНИЯ

R, 2, 5, -45 ! ИСТОЧНИК ТОКА

R, 3, 3 ! R1

R, 4, 2 ! R2

R, 5, 4 ! L1

R, 6, -3 ! УПРАВЛЯЕМЫЙ ТОКОМ ИСТОЧНИК ТОКА

Реализуем конечно-элементную модель с использованием вышеописанных элементов и вещественных констант:

Команда TYPE используется для задания типа элемента (устанавливает текущий тип элемента, используемый последующими командами). Команда REAL связывает вещественную константу с типом элементов, установленным командой TYPE.

Команда E описывает элемент с указанием точек соединения. Формат команды E следующий:

E, I, J, K, L, M, N, O, P

где I – номер первой точки, к которой привязывается элемент, описанный командами TYPE и R;

J...P – номера второй и последующей точек, с которыми связывается элемент (если есть).

После описания конечно-элементной модели необходимо настроить и выполнить решение. Настроим тип анализа и опишем необходимые начальные данные. Для данной конечно-элементной модели необходимо задать начальные ограничения, а именно – нулевой потенциал для точки 1, которая является общим проводом в данной схеме.

Начальные ограничения для узлов в ANSYS APDL задаются с использованием команды D. Формат команды следующий:

D, NODE, Lab, VALUE, VALUE2, NEND, NINC, Lab2, Lab3, Lab4, Lab5, Lab6,

где NODE – номер узла, для которого необходимо задать начальные ограничения;

Lab – задаваемая степень свободы (в данном контексте – вид начального ограничения), для электрических схем поддерживаются значения VOLT (напряжение) и EMF (электродвижущая сила – ЭДС),

VALUE и VALUE2 – значение задаваемого начального ограничения (VALUE2 используется, если параметр Lab поддерживает задание второго значения, например, в случае задания комплексных составляющих VALUE будет задавать действительную часть комплексного числа, а VALUE2 – его мнимую составляющую);

NEND и NINC – позволяют использовать вышеописанную команду для задания начальных ограничений на отрезке NODE...NEND с шагом NINC;

Lab2...Lab6 – дополнительные задаваемые степени свободы, к которым будут применены вышеописанные ограничения (например, можно задать вектора магнитного поля AX, AY и AZ с использованием одной команды при магнитном анализе).

Код команды SOLU для описания решения и необходимых начальных данных следующий:

```
/SOLU
ANTYP,HARM ! ТИП АНАЛИЗА: ГАРМОНИЧЕСКИЙ
D,1,VOLT,0 ! НАЧ. ОГРАНИЧЕНИЯ ДЛЯ ТОЧКИ 1 –
НУЛЕВОЕ НАПРЯЖЕНИЕ
PI=4*ATAN(1)
HARFRQ,1/(2*PI) ! ИЗМЕНЕНИЕ ЧАСТОТЫ ДЛЯ
ГАРМОНИЧЕСКОГО АНАЛИЗА
OUTPR,ALL,ALL ! НАСТРОЙКИ ВЫВОДА: ДЛЯ ВСЕХ
ЭЛ-ТОВ И ЧАСТОТ
HROUT,OFF ! ВЫВОД: КОМПЛЕКСНЫЕ ЧИСЛА КАК
АМПЛИТУДА И ФАЗА
SOLVE
FINISH
```

Заключение. В результате выполнено моделирование магнитного поля и потерь в двух длинных параллельных проводниках и моделирование линейных электрических схем системе FEM – анализа. Вышеприведённые описания позволяют смоделировать значения напряжений и токов, протекающих через каждый элемент схемы. Благодаря объединению простых конечных элементов в более сложные, имеется возможность моделировать схемы различной степени сложности. Объединение реализуется на базе языка APDL, позволяющего описание собственных конечных элементов на базе простых конечных элементов (например, на основе CIRCU124 и CIRCU125) в схемы. Для решения задачи междисциплинарных задач выполняется объединение конечных элементов различных типов в единую конечно-элементную модель. Для моделирования электромагнитного поля, возникающего в электрической цепи, например, магнитного поля катушки с несколькими обмотками, используются элемент CIRCU124 – для описания электрической составляющей катушки, и SOLID97 – для описания геометрии катушки. Результаты работы могут быть использованы для разработки тестирующего контента для обучающих систем.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Аналитический обзор пакетов прикладных программ для моделирования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=6869>
2. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.

Материал поступил в редакцию 07.02.2019

KHVEDCHUK V. I., ANTONIK I. A. The basic elements of the FEM-analysis for electric circuits

Paper is devoted to the means of constructing a finite element model for modeling in the ANSYS tool system. Questions of calculation of a magnetic field of two parallel conductors, calculation of the electric circuit presented in the form of finite elements are considered. It is possible to simulate the values of voltages and currents flowing through each element of the circuit, and a relatively small set of elements, supported by finite elements, by combining simple finite elements into more complex, allows you to model the circuit of varying degrees of complexity.