

В 2011 году защищена дипломная работа на тему:

**Компьютерная модель установившегося режима работы токопровода
с жесткими шинами**

**Автор работы студентка физико-математического факультета
ЮРГТУ (НПИ) – Климова Е.И.**

Руководитель к.т.н., доцент Селюк С.С.

Краткая характеристика работы

Содержание

	Стр.
Введение	7
1 Постановка задачи	11
1.1 Постановка задачи расчёта электромагнитного поля	12
1.2 Постановка задачи расчёта температурного поля	17
1.2.1 Физическая постановка	17
1.2.2 Уравнение распространения тепла в шинах токопровода	20
1.3 Постановка задачи расчёта упруго-напряженного состояния токопровода	25
2 Компьютерная модель	28
2.1 Отладка задач ELCUT	28
2.1.1 Расчет электромагнитного поля	28
2.1.2 Расчет температурного поля	30
2.1.3 Расчет перемещений под действием электромагнитной силы	33
2.1.3 Расчет температурных расширений	35
2.1.5 Совместный учет температурных расширений и перемещений под действием электромагнитной силы	36
3 Вычислительные эксперименты	38
3.1 Расчет электромагнитного поля и сил.....	38
3.2 Исследование тепловых расширений.....	40
3.3 Совместное исследование перемещений под воздействием	

	2
электромагнитной силы и тепловых расширений.....	42
4 Безопасность жизнедеятельности	50
4.1 Анализ негативных факторов в компьютерной лаборатории	50
4.1.1 Микроклимат в компьютерной лаборатории	52
4.1.2 Освещение в компьютерной лаборатории	53
4.1.3 Шум в компьютерной лаборатории	55
4.1.4 Электромагнитные поля в компьютерной лаборатории	56
4.1.5 Электробезопасность в компьютерной лаборатории	58
4.2 Меры для устранения негативных факторов компьютерной лаборатории	60
4.2.1 Обеспечение условий микроклимата на рабочем месте	60
4.2.2 Обеспечение условий оптимального освещения	61
4.2.3 Обеспечение оптимальных параметров шума в компьютерной лаборатории	62
4.2.4 Обеспечение условий защиты от электромагнитных полей	63
4.2.5 Обеспечение электробезопасности	64
4.2.6 Организация рабочего места	65
4.3 Чрезвычайные ситуации	68
5 Организационно – экономическая часть	73
5.1 Прикладные аспекты использования ПК ELCUT	73
5.2 Календарное планирование	76
5.3 Стоимостная оценка проекта	78
5.4 Оценка научно-технической результативности инженерных решений с ПК ELCUT	84
Заключение	86
Список использованных источников	87
Приложение	89

2 Компьютерная модель

2.1 Отладка задач ELCUT

2.1.1 Расчет электромагнитного поля

Для анализа ЭМП средствами ПК ELCUT была создана задача для расчёта стационарного магнитного поля. Геометрическая модель сечения токопровода приведена на рис.2.1.

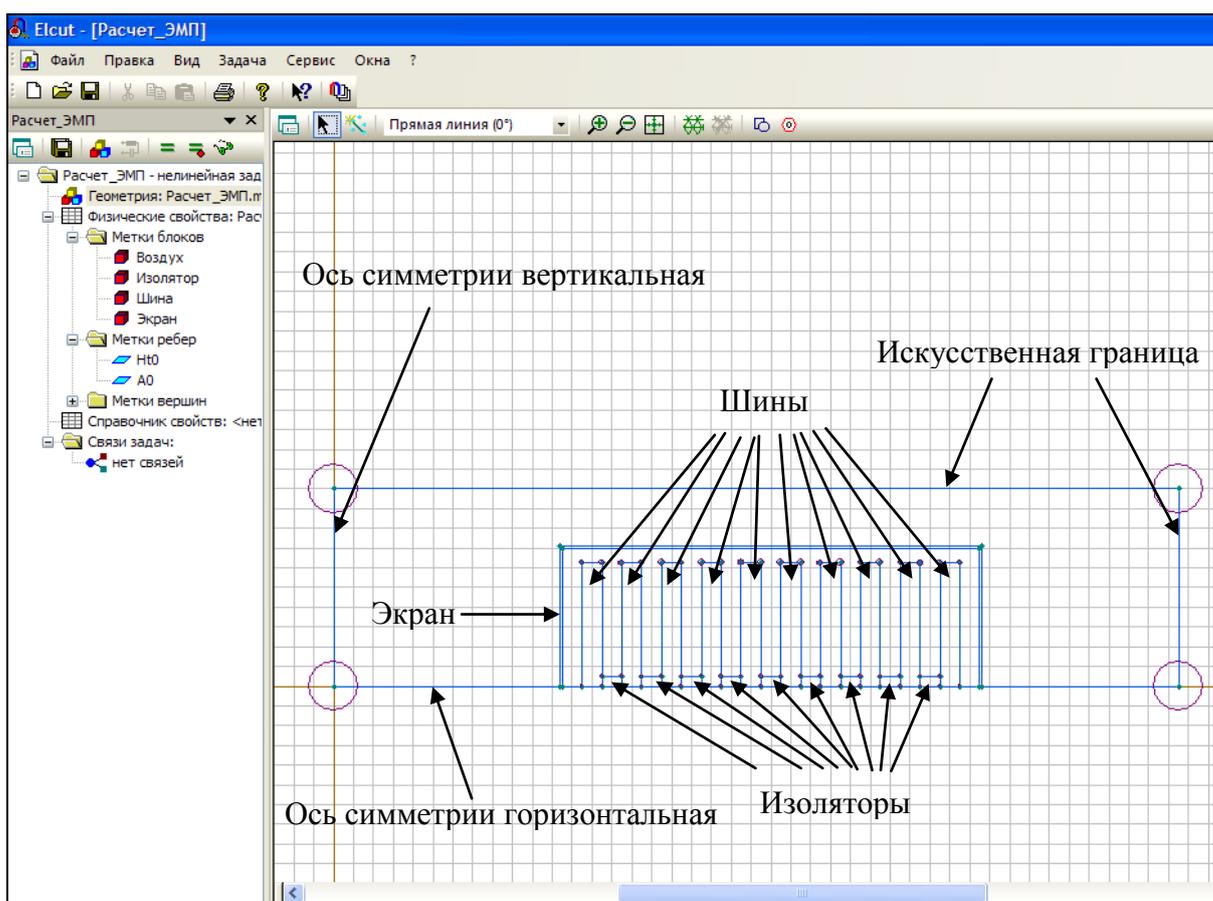


Рисунок 2.1 – Геометрическая модель для расчета ЭМП токопровода (свободное пространство заполнено воздухом)

Материальные операторы заданы в блоках с метками:

«Воздух, Изолятор» – метки блоков с удельной магнитной проницаемостью $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

«Шина» – метка блока с удельной магнитной проницаемостью $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м и заданной плотностью тока;

«Экран» – метка блока с удельной магнитной проницаемостью $\mu = \mu(\bar{H})$ Гн/м (конструкционная сталь), задается основной кривой намагничивания (рис.2.2);

«A0» – ребро с нулевым условием Дирихле для векторного магнитного потенциала;

«Ht0» – ребро с нулевым условием Неймана для векторного магнитного потенциала (нулевой касательной составляющей ЭМП).

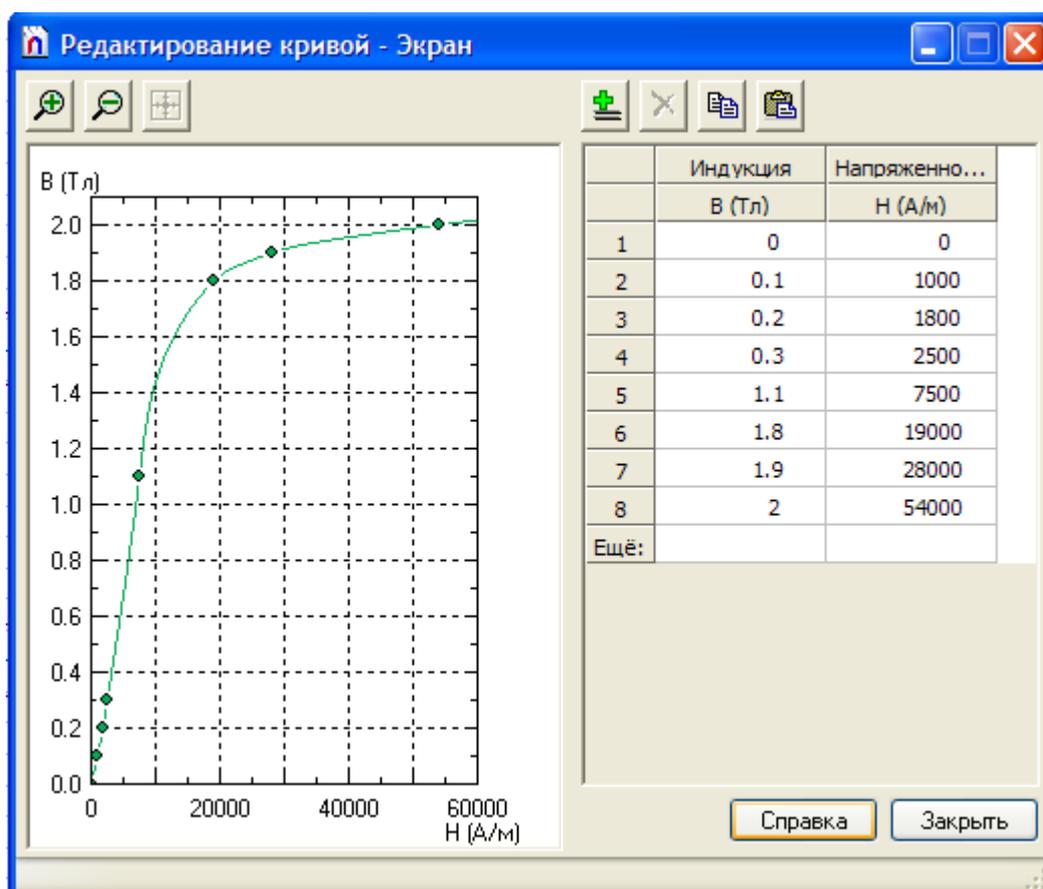


Рисунок 2.2 – Основная кривая намагничивания стали экрана

Согласно краевой задаче (1.8 – 1.14) граничные условия присваиваются:

«A0» – искусственной границе и вертикальной оси симметрии;

«Ht0» – горизонтальной оси симметрии.

Отладка задачи произведена в ходе вычислительного эксперимента для определения влияния ферромагнитного экрана толщиной 2 мм на распределение магнитного поля. Картина поля приведена на рис.2.3.

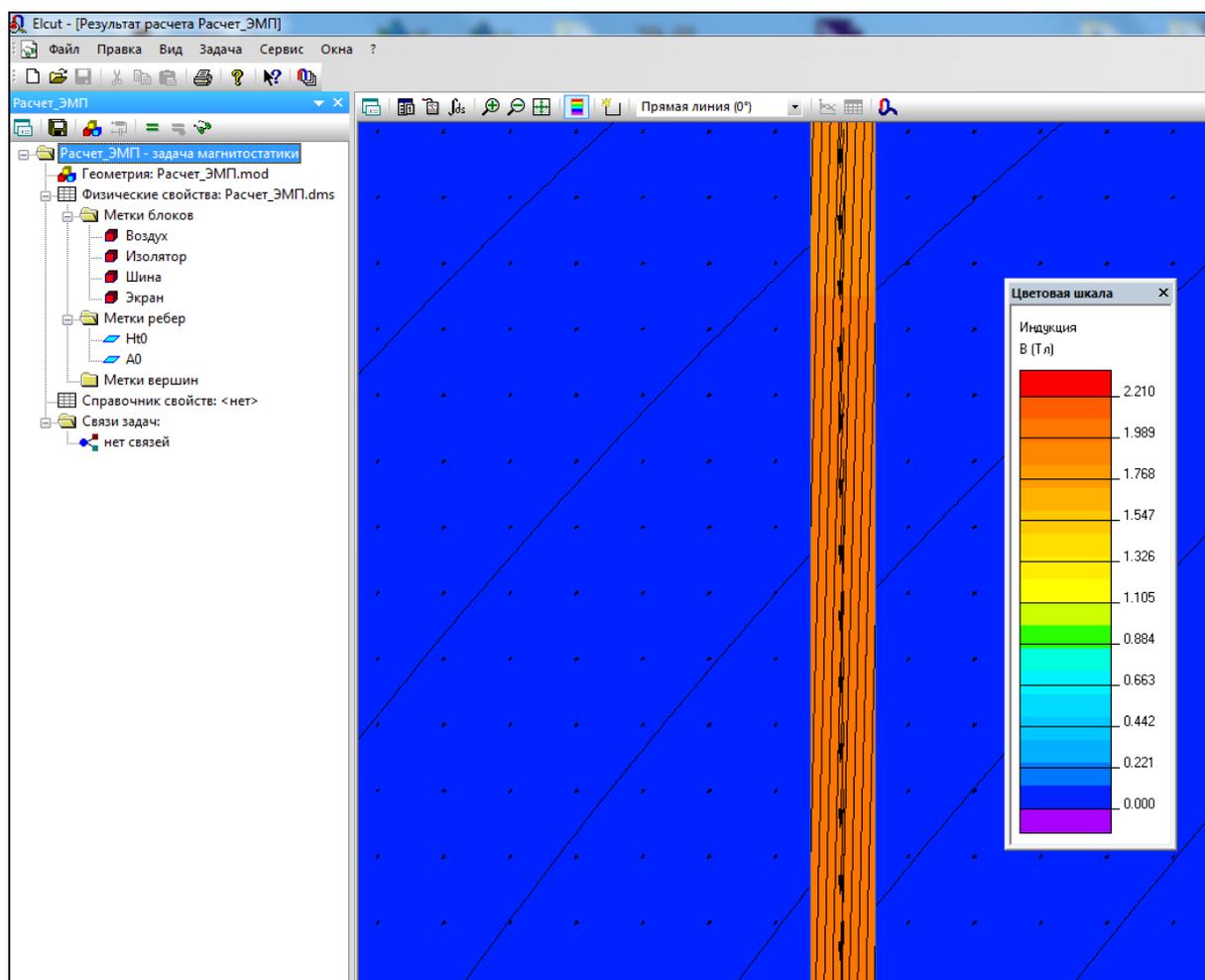


Рисунок 2.3 – Картина ЭМП в экране и воздухе, полный ток в одной шине 9 кА (в расчетной области 4,5 кА), количество узлов сетки 163723, время расчета 62 секунды

Результаты расчетов показывают, что наибольшее магнитостатическое поле распределено по экрану (до 2,05 Тл). Вне экрана значение индукции не превышает 0,09 Тл. Внешние углы сильно насыщаются. Индукция в них составляет 0,35 Тл. Магнитная проницаемость имеет порядок $100\mu_0$. Во внутренних углах достигается максимальное значение индукции порядка 2 Тл.

2.1.2 Расчет температурного поля

Геометрическая модель ELCUT для расчета стационарного температурного поля токопровода приведена на рис.2.4. Искусственная граница отсутствует. Теплообмен поверхности экрана с окружающей средой осуществляется по закону Ньютона. Пространство между шинами и

изоляторами внутри токопровода считается твёрдым телом с коэффициентом удельной теплопроводности воздуха $0,23 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м})$.

Температурное поле рассчитывается с целью определения тепловых расширений. Поэтому предусматривается связь с задачей расчёта напряжений и перемещений.

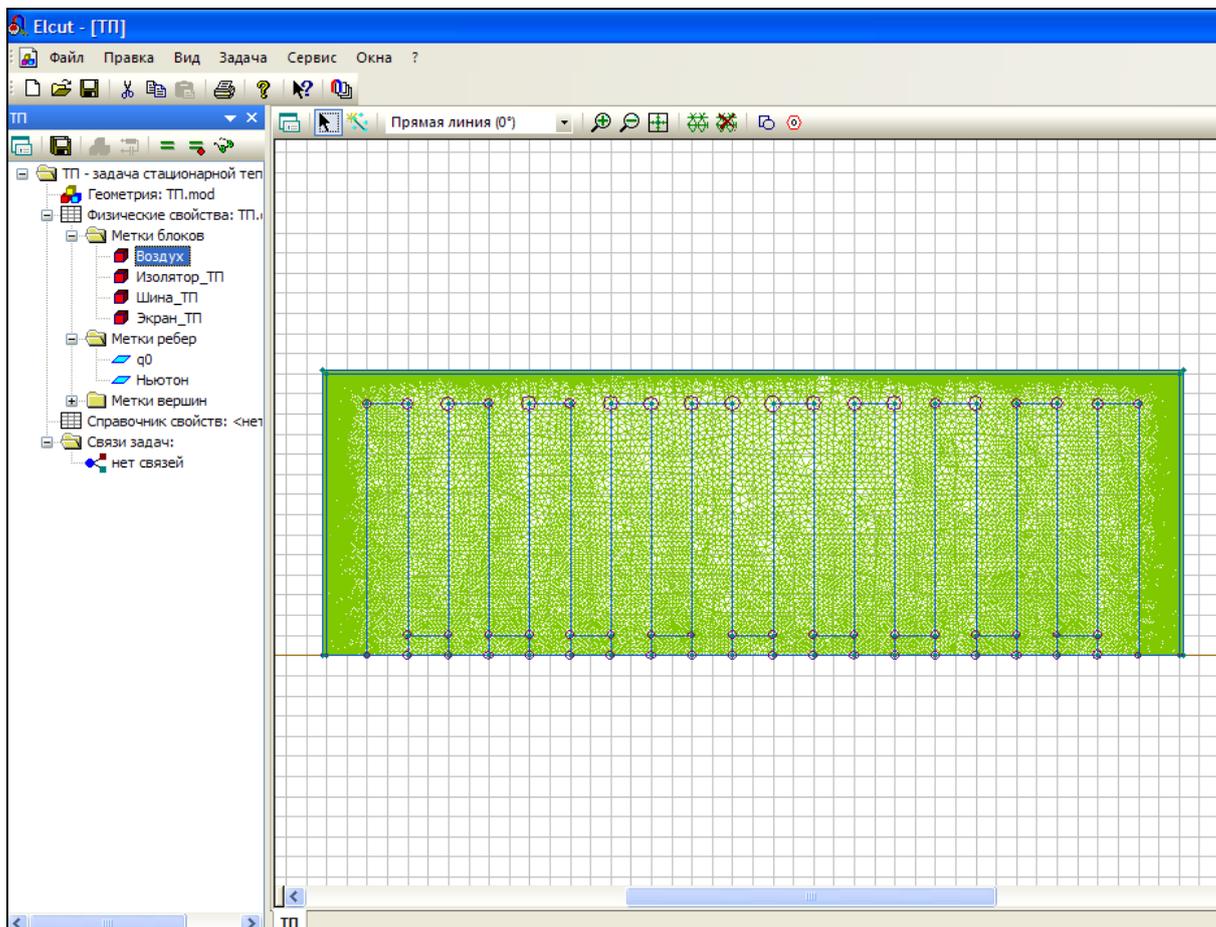


Рисунок 3.4 – Геометрическая модель ELCUT для расчета температурного поля токопровода (сетка содержит 136551 узел)

Материальные операторы заданы в блоках с метками:

«Воздух» – блок с удельным коэффициентом теплопроводности воздуха $0,23 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м})$;

«Изолятор_ТП» – блок с удельным коэффициентом теплопроводности тексталита $0,5 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м})$;

«Шина_ТП» – блок с удельным коэффициентом теплопроводности меди $285 \text{ Вт}/(\text{К}\cdot\text{м})$;

«Экран_ТП» – блок с удельным коэффициентом теплопроводности конструкционной стали 52 Вт/(К·м);

«q0» – ребро с нулевым условием Неймана для температуры (теплоизолированная поверхность);

«Ньютон» – ребро с условием конвективного теплообмена по закону Ньютона с коэффициентом 25 и температурой окружающей среды 20⁰С.

Картина температурного поля с максимальным полным током в шинах по 9 кА приведена на рис.2.5

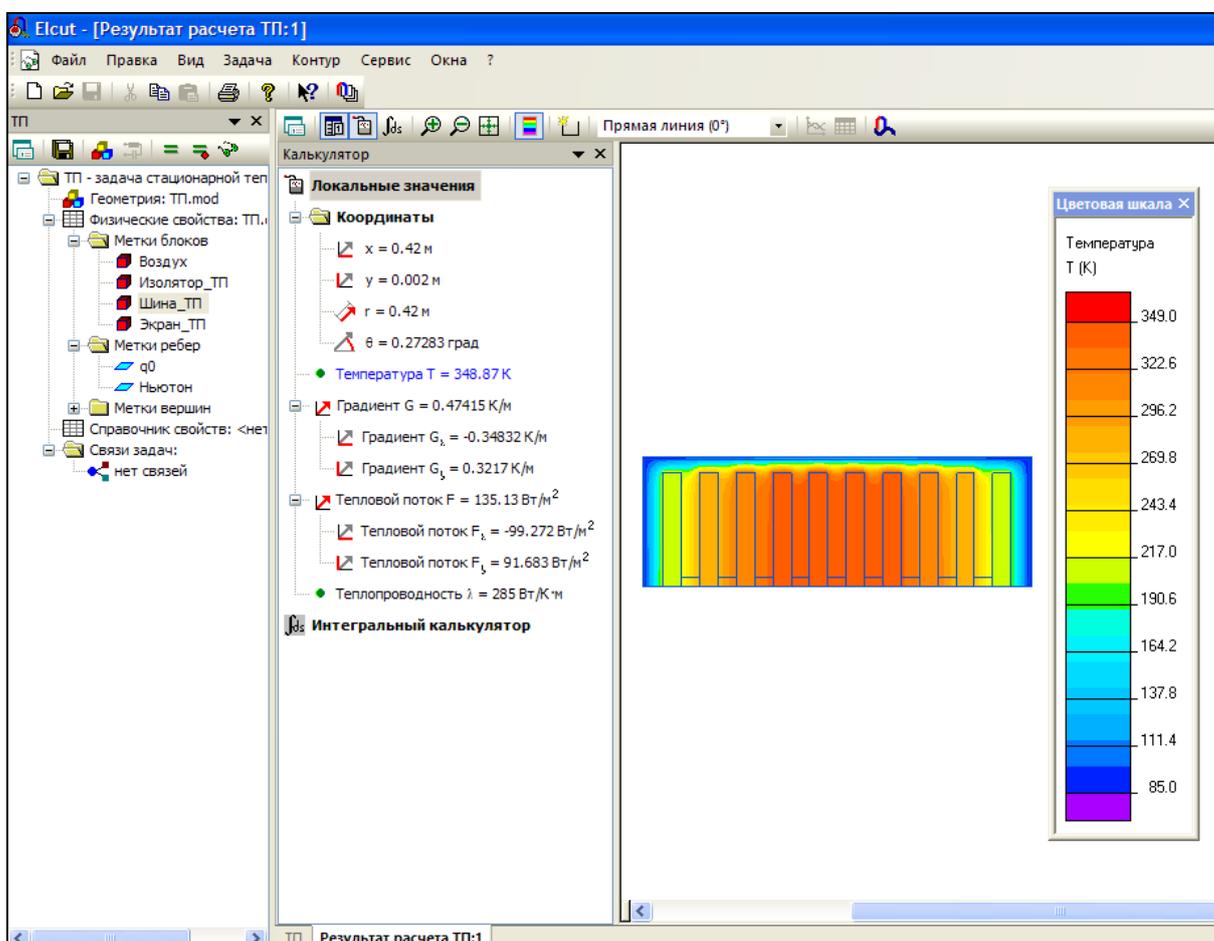


Рисунок 2.5 – Картина температурного поля токопровода при полном токе в шинах по 9 кА, максимальная расчётная температура ≈ 350⁰С

Распределение температуры вдоль горизонтальной оси симметрии при различных значениях тока в шинах приведены на рис.2.6. Максимальное значение температуры приходится на центр токопровода.

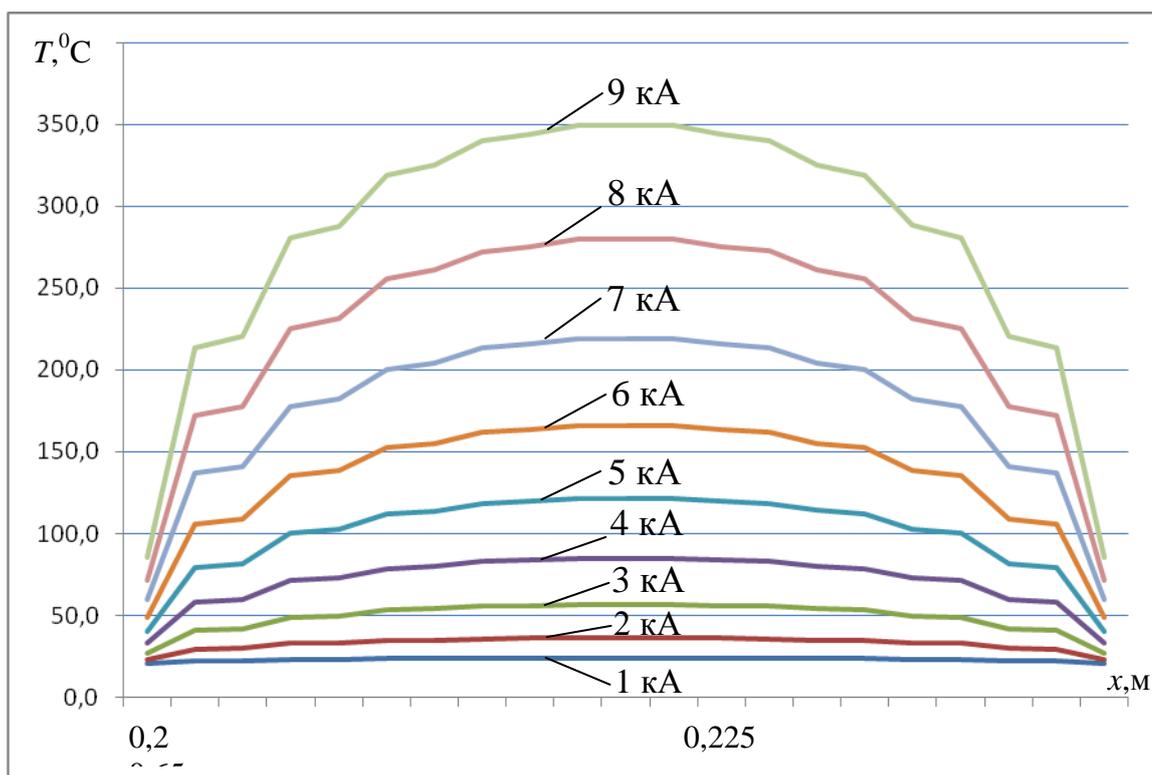


Рисунок 2.6 – Графики температуры вдоль оси горизонтальной симметрии для различных значений тока в каждой шине

Разность температур между центральной зоной и краями расчетной области тем сильнее, чем больше ток в шинах. Так при полном токе 9 кА в каждой шине она достигает до 348°C .

2.1.3 Расчет перемещений под действием электромагнитной силы

Для расчета упругих напряжений и перемещений, порожденных электромагнитной силой, была создана задача «Перемещения ЭМП». Согласно методологии ELCUT, она была размещена в том же каталоге, что и задача магнитостатики. Через меню «Свойства» была организована связь с между задачами (выделено на рис.2.7). При этом файл «Геометрия» (рисунок сечения токопровода) был один и для расчета электромагнитного поля, и для расчёта напряжений и перемещений.

Материальные операторы задаются теми же метками, что и в электромагнитной задаче. Необходимо только присвоить им соответствующие свойства:

«Шина» – метка блока с модулем Юнга $1,2 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициентом Пуассона 0,32 и пределом прочности $0,24 \cdot 10^9$ Н/м² (прокатанная медь).

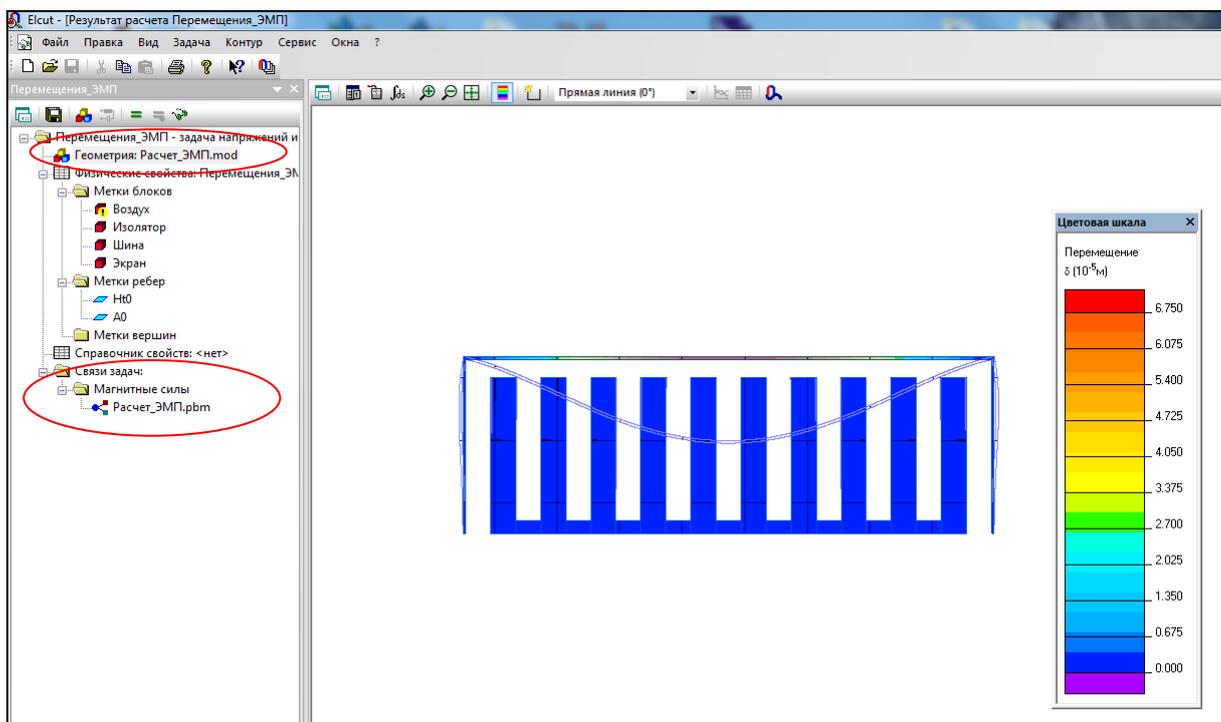


Рисунок 2.7 – Схематическая картина упругих перемещений в сечении токопровода под воздействием электромагнитной силы

«Экран» – метка блока с модулем Юнга $1,96 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициентом Пуассона 0,28 и пределом прочности $1,27 \cdot 10^9$ Н/м² (углеродистая сталь);

«Изолятор» – метка блока с модулем Юнга $0,21 \cdot 10^{11}$ Н/м²; коэффициентом Пуассона 0,3 и пределом прочности $1,1 \cdot 10^9$ Н/м² (текстолит);

«Воздух» – метка блока с модулем Юнга, равным нулю (в этом случае ELCUT исключает данную область из расчетов напряжений и перемещений);

«A0, Ht0» – рёбра с нулевыми перемещениями точек области (упор).

Крепление расчётной области задавалось по горизонтальной оси симметрии. При этом на подвижных рёбрах можно не задавать граничные условия. В результате они деформируются вместе с блоками.

Результаты тестового расчёта приведены на рис.2.7. Наибольшую деформацию испытывает средняя часть экрана. Именно достигает

наибольших значений электромагнитная сила, порождаемая шинами. Абсолютное значение перемещений имеет порядок 10^{-5} метров.

2.1.4 Расчет тепловых расширений

Для расчета упругих напряжений и перемещений, порожденных Джоулевыми потерями в шинах, была создана задача «Перемещения ТП». Она также была размещена в одном каталоге с задачей расчёта температурного поля. Через меню «Свойства» была организована связь с между задачами (выделено на рис.2.8). Файл «Геометрия» (рисунок сечения токопровода) был одним и тем же и для расчета температурного поля, и для расчёта тепловых расширений.

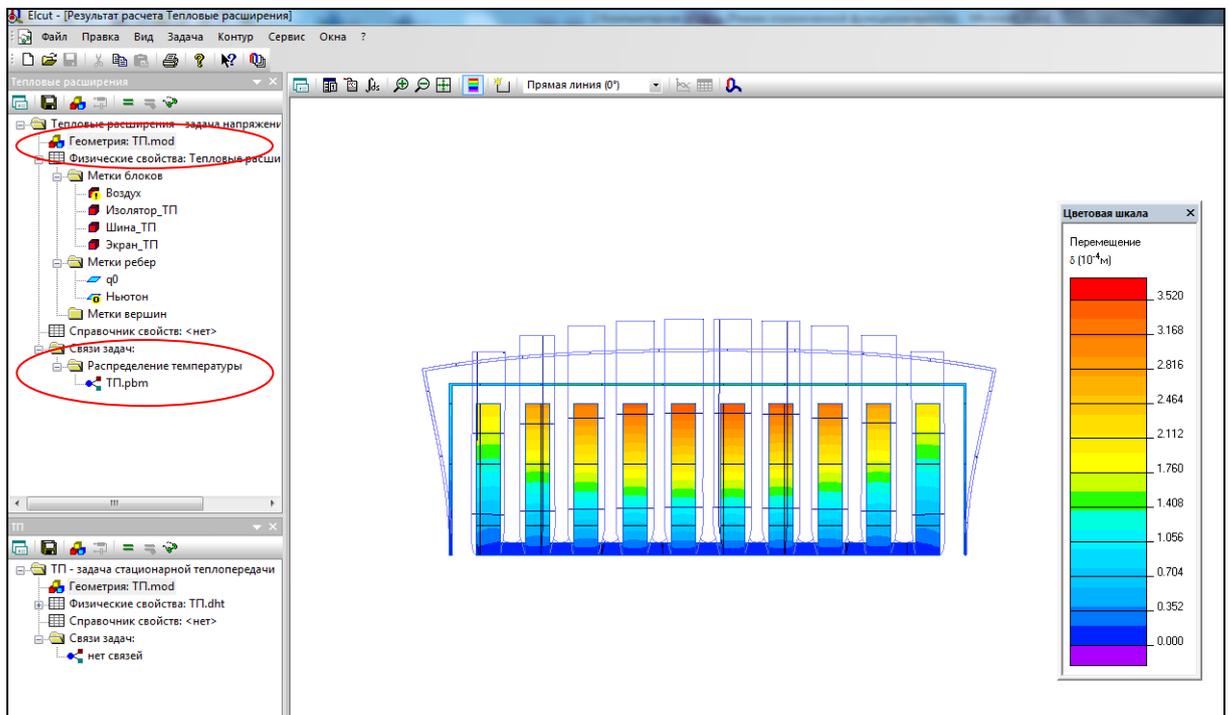


Рисунок 2.8 – Схематическая картина тепловых расширений шин и экрана без учета электромагнитных воздействий

Заметим, что пересечение деформированных границ шин и экрана не свидетельствует об их реальном взаимодействии при работе токопровода. В данном случае масштаб изображения не позволяет других пропорций. Если его увеличить, то графическое отражение деформированного состояния придёт в норму (рис.2.9).

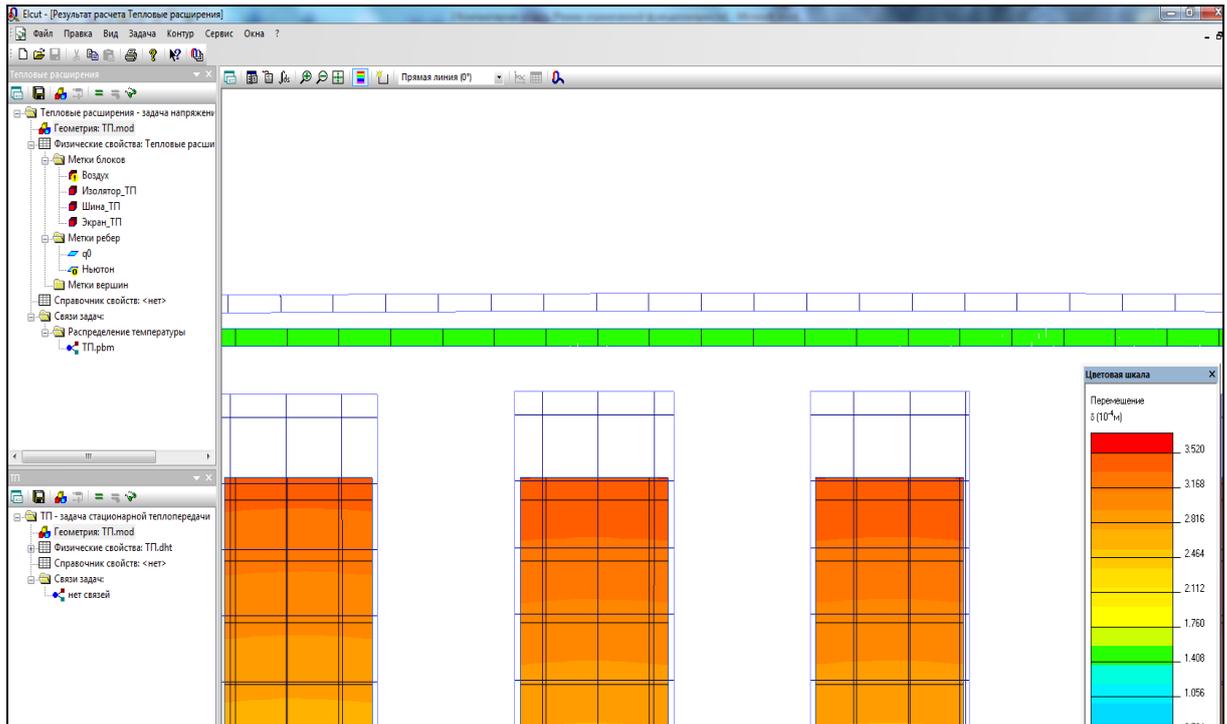


Рисунок 2.9 – Схематическая картина тепловых расширений шин и экрана без учета электромагнитных воздействий

Как видно из рисунка перемещения точек экрана, порождаемые электромагнитной силой, будут направлены в сторону, противоположную тепловым расширениям. Этот участок экрана будет испытывать самые большие напряжения.

2.1.5 Совместный учет температурных расширений и перемещений под действием электромагнитной силы

Для учета тепловых расширений и электромагнитных воздействий в задачу расчета упругих напряжений и деформаций были введены превышения температур в экране и шинах. Коэффициенты тепловых расширений меди и стали (рис. 2.10) выбраны по данным /15/.

Шины, экран и изоляторы прогреты равномерно. Поэтому учет тепловых расширений может быть проведён простым заданием превышения температуры шин и экрана над их начальной температурой. В шинах и изоляторах она составляла величину от 85 до 350 градусов Кельвина. В экране – 80-100.

Свойства метки блока - Шина_ТП

Упругие константы | Нагрузки | Допустимые напряжения

Термические деформации

Коэффициенты теплового расширения
 $\alpha_x = 1.65e-5$ $\alpha_y = 1.65e-5$ $\alpha_z = 1.65e-5$ (1/К)

Превышения температуры
 $\Delta T = 350$ (К) Анизотропный материал

Объемные силы
 $f_x = 0$ $f_y = 0$ (Н/м³) **f**

Декартовы Полярные

а) шина

Свойства метки блока - Экран_ТП

Упругие константы | Нагрузки | Допустимые напряжения

Термические деформации

Коэффициенты теплового расширения
 $\alpha_x = 1.17e-5$ $\alpha_y = 1.17e-5$ $\alpha_z = 1.17e-5$ (1/К)

Превышения температуры
 $\Delta T = 85$ (К) Анизотропный материал

Объемные силы
 $f_x = 0$ $f_y = 0$ (Н/м³) **f**

Декартовы Полярные

б) экран

Свойства метки блока - Шина_ТП

Упругие константы | Нагрузки | Допустимые напряжения

Термические деформации

Коэффициенты теплового расширения
 $\alpha_x = 1.65e-5$ $\alpha_y = 1.65e-5$ $\alpha_z = 1.65e-5$ (1/К)

Превышения температуры
 $\Delta T = 350$ (К) Анизотропный материал

Объемные силы
 $f_x = 0$ $f_y = 0$ (Н/м³) **f**

Декартовы Полярные

в) воздух

Свойства метки блока - Экран_ТП

Упругие константы | Нагрузки | Допустимые напряжения

Термические деформации

Коэффициенты теплового расширения
 $\alpha_x = 1.17e-5$ $\alpha_y = 1.17e-5$ $\alpha_z = 1.17e-5$ (1/К)

Превышения температуры
 $\Delta T = 85$ (К) Анизотропный материал

Объемные силы
 $f_x = 0$ $f_y = 0$ (Н/м³) **f**

Декартовы Полярные

г) изолятор

Рисунок 2.10 – Исходные данные для учета тепловых деформаций

ВЫВОДЫ

На основе программного комплекса ELCUT и отлажены компьютерные модели для:

- расчета электромагнитного поля в сечении токопровода с твердыми шинами;
- расчета температурного поля в сечении токопровода;
- расчета перемещений шин и экрана токопровода, порожденных электромагнитной силой;
- расчета температурных расширений шин и экрана токопровода;
- расчета перемещений, обусловленных электромагнитными силами и температурными расширениями.