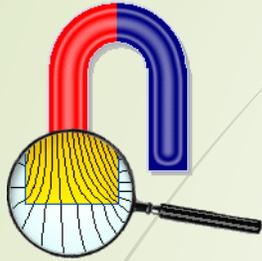


Полевые методы для задач кабельной техники



ELCUT

Новый подход к
моделированию полей

Как численное моделирование электромагнитного и температурного поля помогает лучше понимать и точнее оценивать состояние силовых кабелей.



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

С.Д. Дубицкий, ДИРЕКТОР ООО «ТОР»

Г.В. ГРЕШНЯКОВ, К.Т.Н, ДОЦ., ГЛ. КОНСТРУКТОР НИИ «СЕВКАБЕЛЬ»

Г.Г. КОВАЛЕВ, К.Ф-М.Н, ДИРЕКТОР НИИ «СЕВКАБЕЛЬ»



СЕВКАБЕЛЬ

ГРУППА КОМПАНИЙ

Н.В. Коровкин, Д.Т.Н, ПРОФ.,

ЗАВ. КАФ. ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Решённые задачи

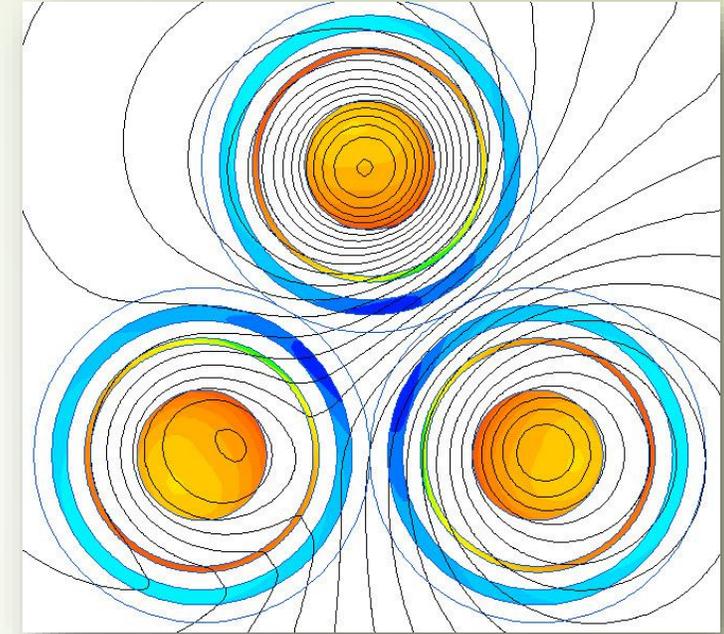
2

- 1. Расчет несущей способности кабельной линии по току:**
 - Простые конструкции: одна линия с расположением фаз в линию и треугольником
 - Кабельный блок из нескольких линий
- 2. Управление внешним магнитным полем группы кабельных линий**
 - Выбор расстояния между линиями и последовательности фаз
 - П-образный экран из пермаллоя
 - Надвижные щелевые экраны из аморфных магнитомягких сплавов
- 3. Расчет добавочных потерь в монолитных жилах по Милликену**
 - Дополнительные потери от поверхностного эффекта
 - Дополнительные потери от эффекта близости
- 4. Расчет выравнивания электрического поля в кабельных муфтах**
 - Оптимальная конструкция стресс-конуса (геометрия, материал)
 - Выравнивающие трубки
- 5. Анализ термостойкости грозотроса со встроенным волоконно-оптическим модулем к прямому удару молнии**
 - Импульсное электромагнитное поле заданной сложной формы
 - Переходный тепловой процесс нагрева-остывания троса

Цель работы

3

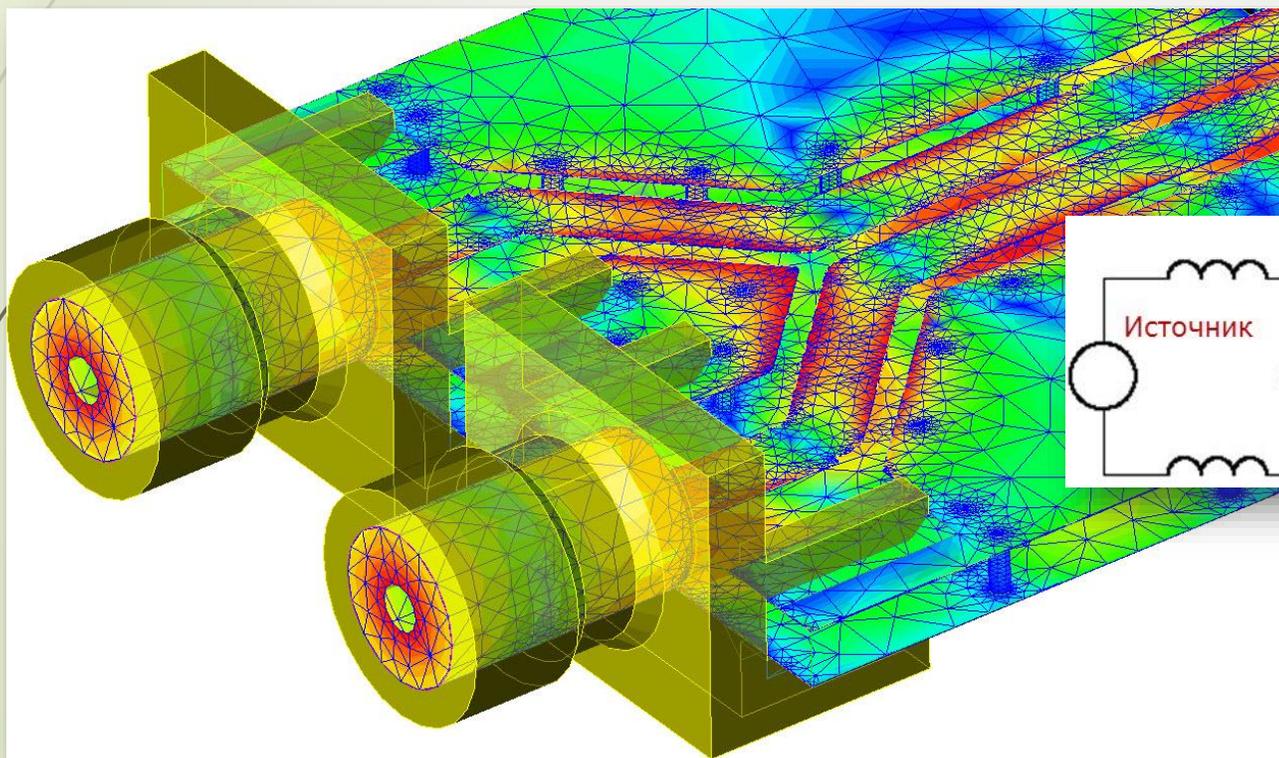
1. Выработать пути и найти решения задачи расчета теплового состояния многоцепных подземных кабельных линий с учетом электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей;
2. Сопоставить результаты мультифизического моделирования с методикой стандарта МЭК
3. Выявить и проанализировать ситуации существенного расхождения двух методик;
4. Показать осуществимость инженерного анализа теплового состояния кабельных линий на базе отечественного программного продукта ELCUT.



Поля и цепи –

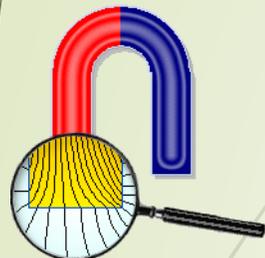
как мы думаем об электромагнитных явлениях

Привычка, сформированная десятилетиями инженерного опыта:
Мы говорим «поле» – подразумеваем эквивалентную цепь.



ELCUT инженерный инструмент моделирования электромагнитных и температурных полей

Отечественный программный продукт мирового уровня.



Anno 1988

Истоки

Электросила, Политехнический институт

- Компания основана в 1988 г.
- Первая версия продукта вышла в 1990 г. (MS DOS)
- Первые европейские и американские продажи: 1993

Становление

Анализ в частотной и временной области

- **Электрическое поле:** статическое (2D, 3D), гармоническое, импульсное
- **Магнитное поле:** статическое, гармоническое, импульсное
- **Температурное поле:** установившееся (2D, 3D), нестационарное
- **Упругие напряжения и деформации:** статический 2D анализ

Зрелость

Программный интерфейс (API), 3D анализ

- Опубликованный **обширный API** открывает возможность создания утилит и специализированных приложений.
- **Собственные утилиты:** параметрический анализ, анализ допусков и погрешностей, оптимизация

Пользователи ELCUT

6

Индустрия

Электроэнергетика :

- Электросила
- ЗЭТО (Великие Луки)
- СВЭЛ (Екатеринбург)
- РосЭнергоТранс (Е-бург)
- УралЭлектроТяжмаш
- Севкабель (Петербург)
- ССТ (Мытищи)
- з-д Элеконд (Сарапул)

Обогащение и сепарация:

- Продэкология (Ровно)
- Рудгормаш (Воронеж)
- Механобр (СПб)

Напыление в магн. поле:

- Изовак (Минск)
- Сидрабе (Рига)

Строительное проектир.

Магнитные технологии

Исследования

Физика:

- ОИЯИ Дубна
- ВНИИЭФ Саров
- ФИАН Москва
- Ин-т Сильноточной электроники РАН (Томск)

Электротехника:

- ВНИИКП (Москва)
- ЦНИИ Электроприбор
- НИИЭФА им. Ефремова
- Ин-т Электроэнергетики РАН
- НТЦ Высоковольтной аппаратуры (Саров)
- ВИТ (Запорожье)

Материаловедение:

- ЦНИИ Прометей
- Магнетон (Владимир)
- ЦНИИТМАШ (Москва)

Образование

Москва:

- МЭИ
- МАИ
- МИЭМ (ВШЭ)
- Архитектурно-строительный ун-т

Санкт-Петербург:

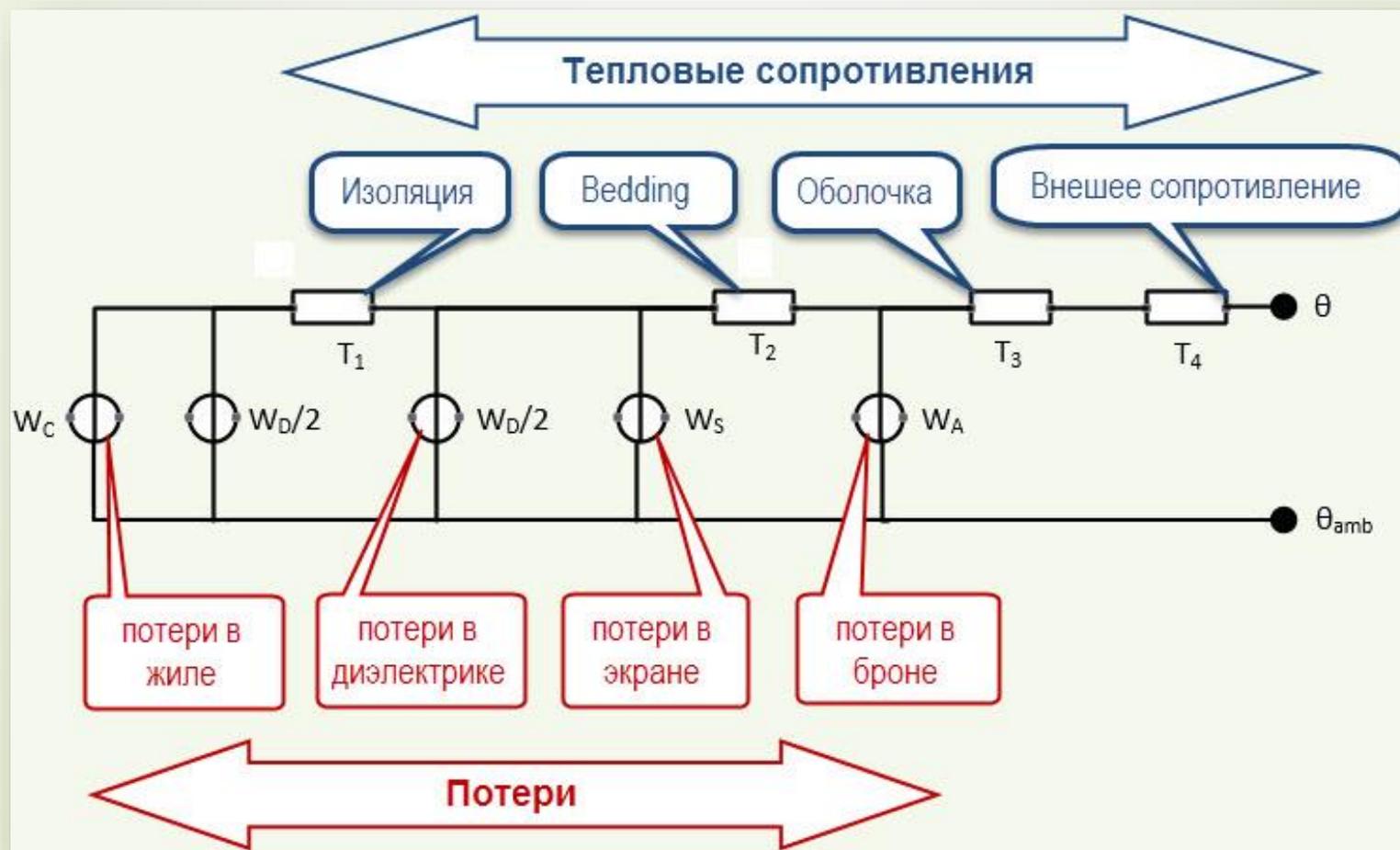
- Политехнический ун-т
- СПб ГУАП
- Ун-т путей сообщения
- ИТМО
- ЛЭТИ

Урал и Сибирь:

- Томский Политехн. ун-т
- Томский гос. Ун-т
- Новосиб. ГТУ
- Новосиб. Сибстрин
- Уральский федер. ун-т
- Сибирский федер. ун-т

Модель Нейера-МакГрафа (1957):

- Метод расчета потерь, включая потери от поверхностного эффекта и эффекта близости
- Метод расчета тепловых сопротивлений, включая теплопроводность, конвекцию, радиацию, взаимный подогрев кабелей и т.п.



Формулы МЭК 60287 и моделирование поля

МЭК 60287

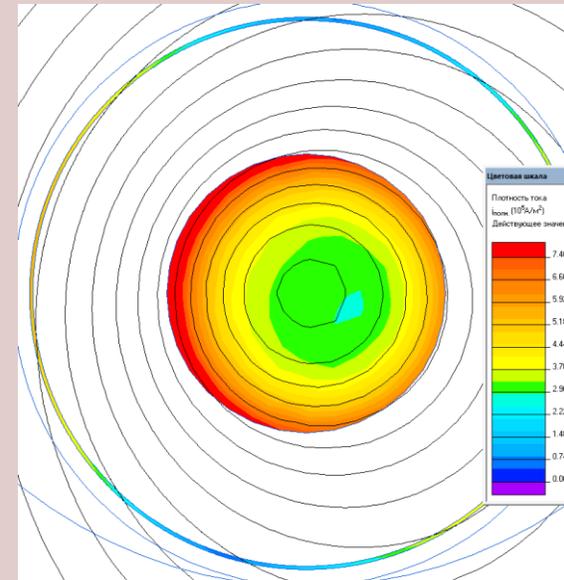
Моделирование поля

Электро-магнитная модель

Добавочное сопротивление на переменном токе:

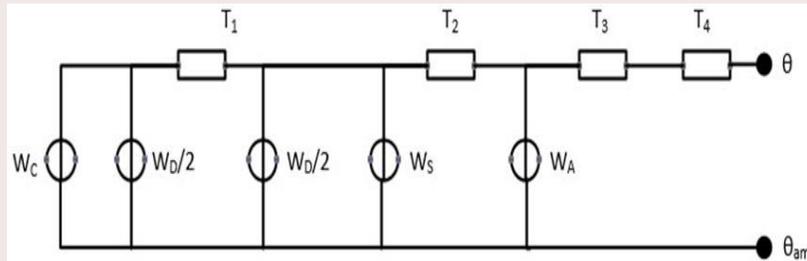
$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = 1 + y_S + y_P$$

Аппроксимирующие формулы для y_S и y_P имеют пределы применимости и содержат эмпирические коэффициенты



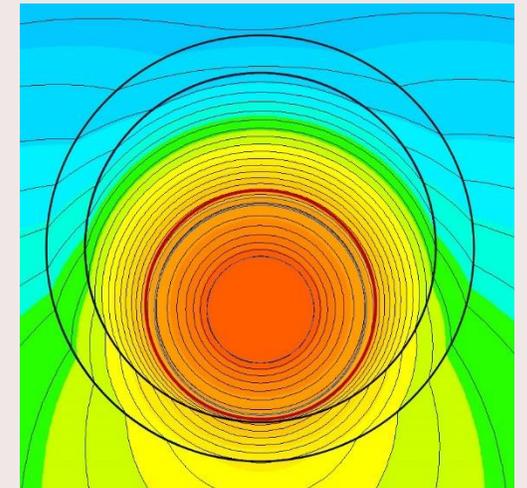
- Нет ограничений по количеству цепей
- Учитывается схема заземления
- Могут быть приняты во внимание другие металлические элементы

Тепловая модель



Метод тепловых сопротивлений: Достаточно точен внутри кабеля (T_1 - T_3) и весьма условен для внешнего сопротивления T_4

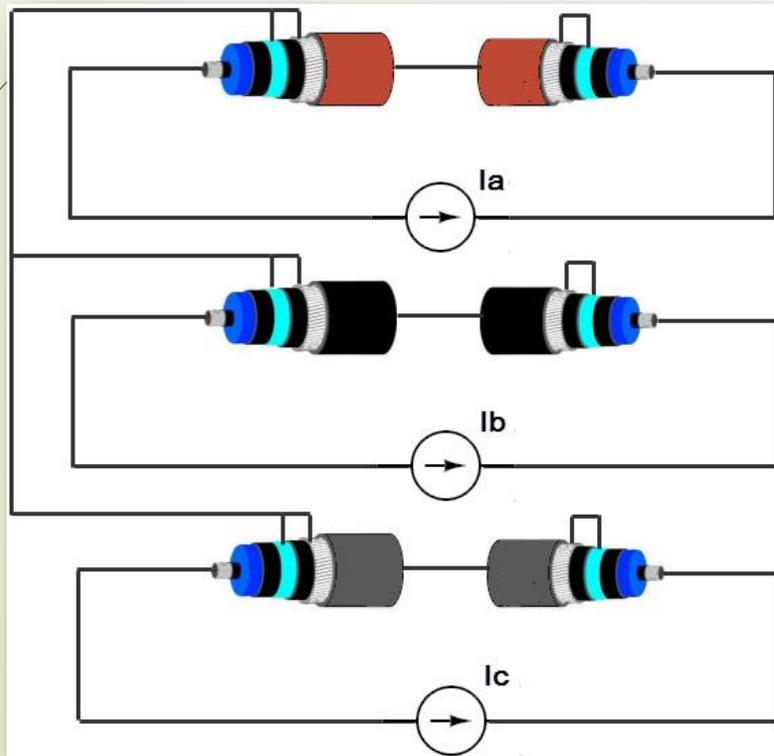
- Численное решение задачи теплопроводности
- Естественный учет подогрева одних кабелей другими



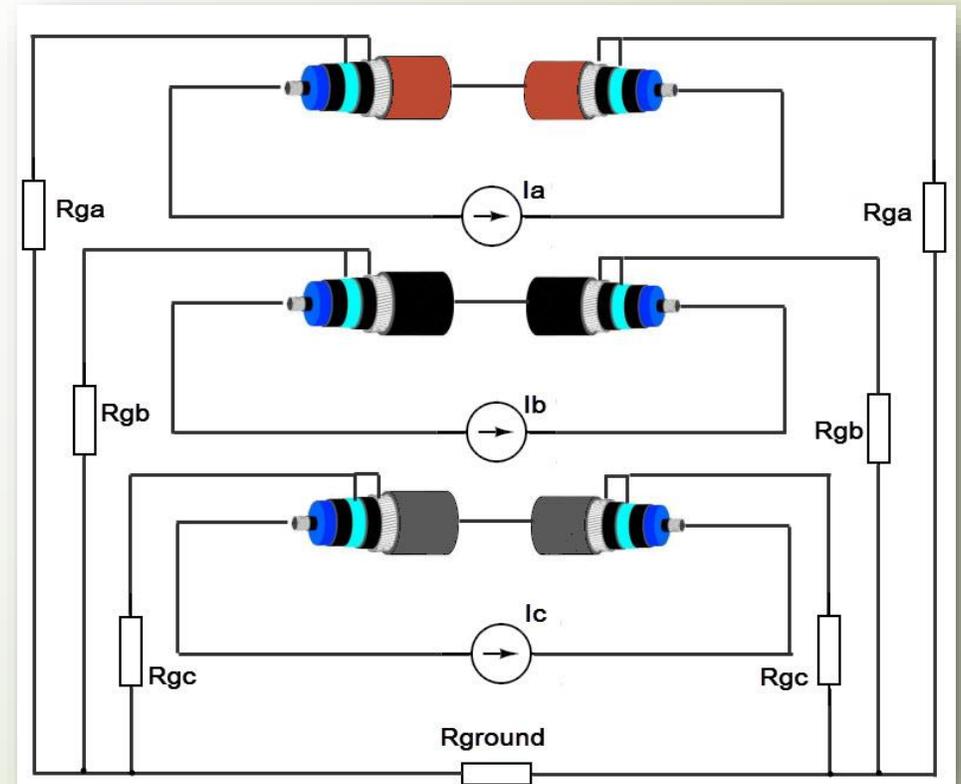
Вычисление потерь с учетом:

- Потери от поверхностного эффекта и эффекта близости;
- Обязательный учет схемы заземления (с одной или с двух сторон участка);
- Учет близко расположенных тепловыделяющих элементов:
активных (тепломагистралаи, другие линии) и
пассивных (металлоконструкции, арматура, шпунт).

Заземление с одной стороны



Заземление с двух сторон

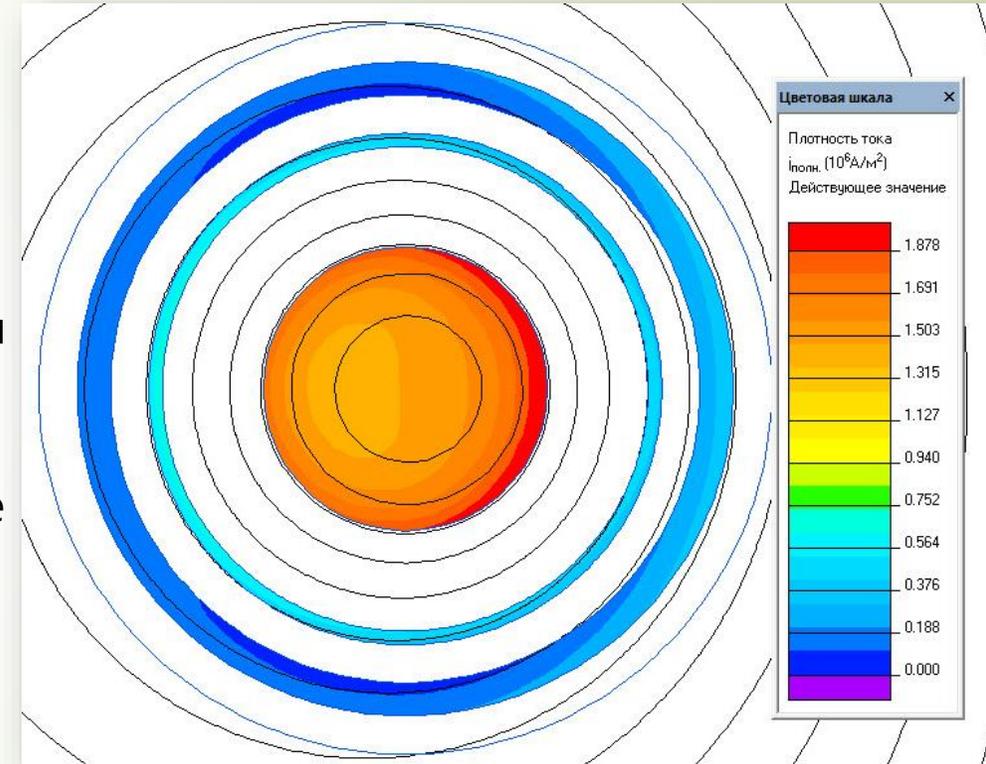


Упрощения и допущения электромагнитного расчета



Для расчета потерь можно учитывать упрощенно:

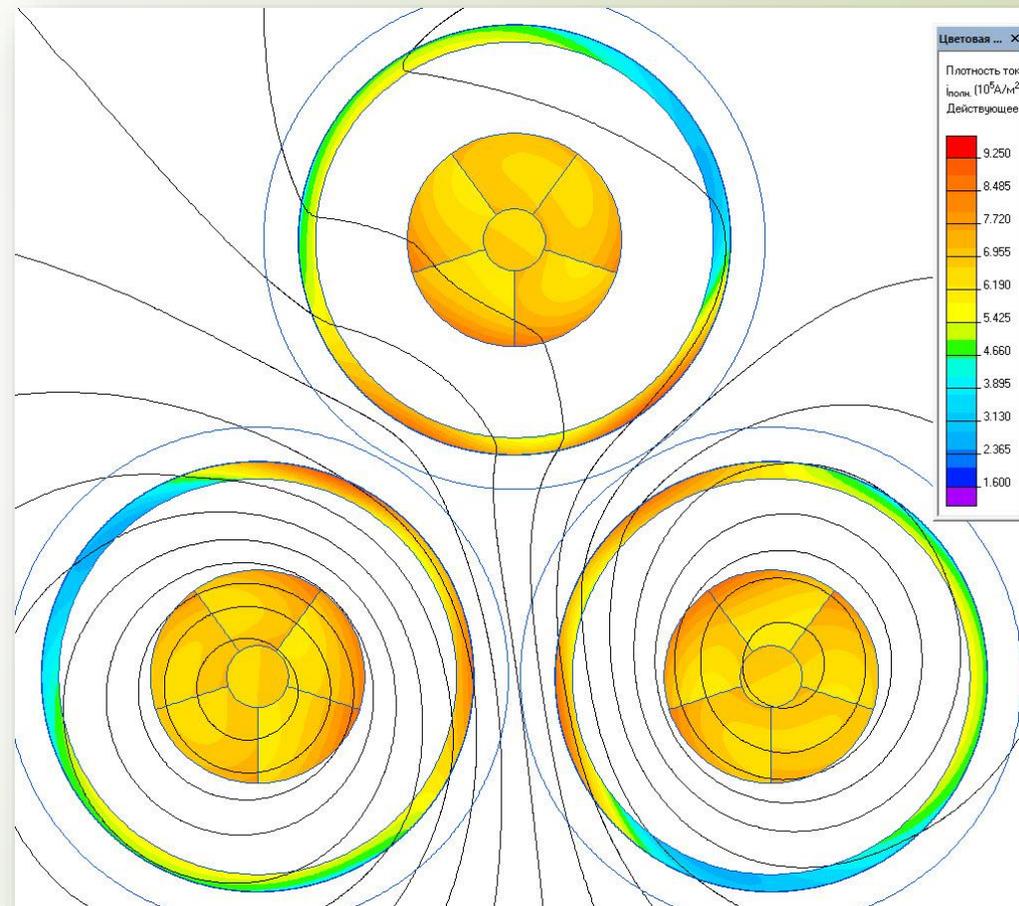
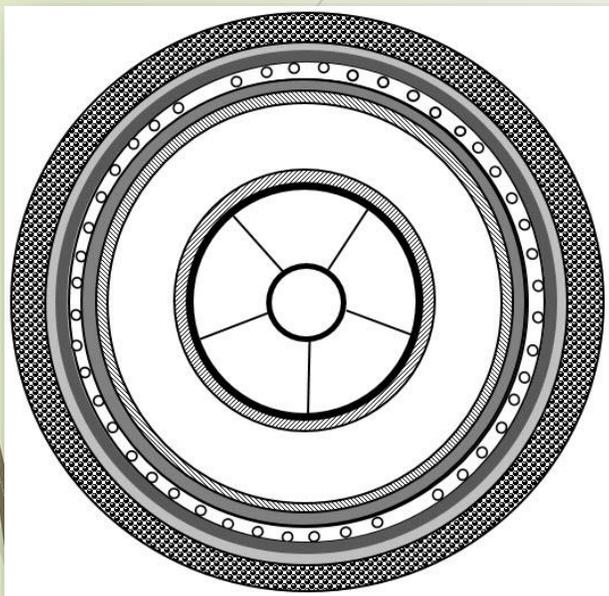
- Проволочную структуру ТПЖ
- Структуру экрана из проволок и медной ленты заменяем сплошным цилиндром с уменьшенной электро- и теплопроводностью
- Полупроводящие слои при расчете магнитного поля считаются диэлектрическими
- Сегментация по Милликену учитывается приближенно усреднением по длине
- Пока не разработан метод учета изоляции части проволок в сегментированных жилах



Учет сегментации по Милликену

Для учета сегментации ТПЖ предлагается усреднение по длине.

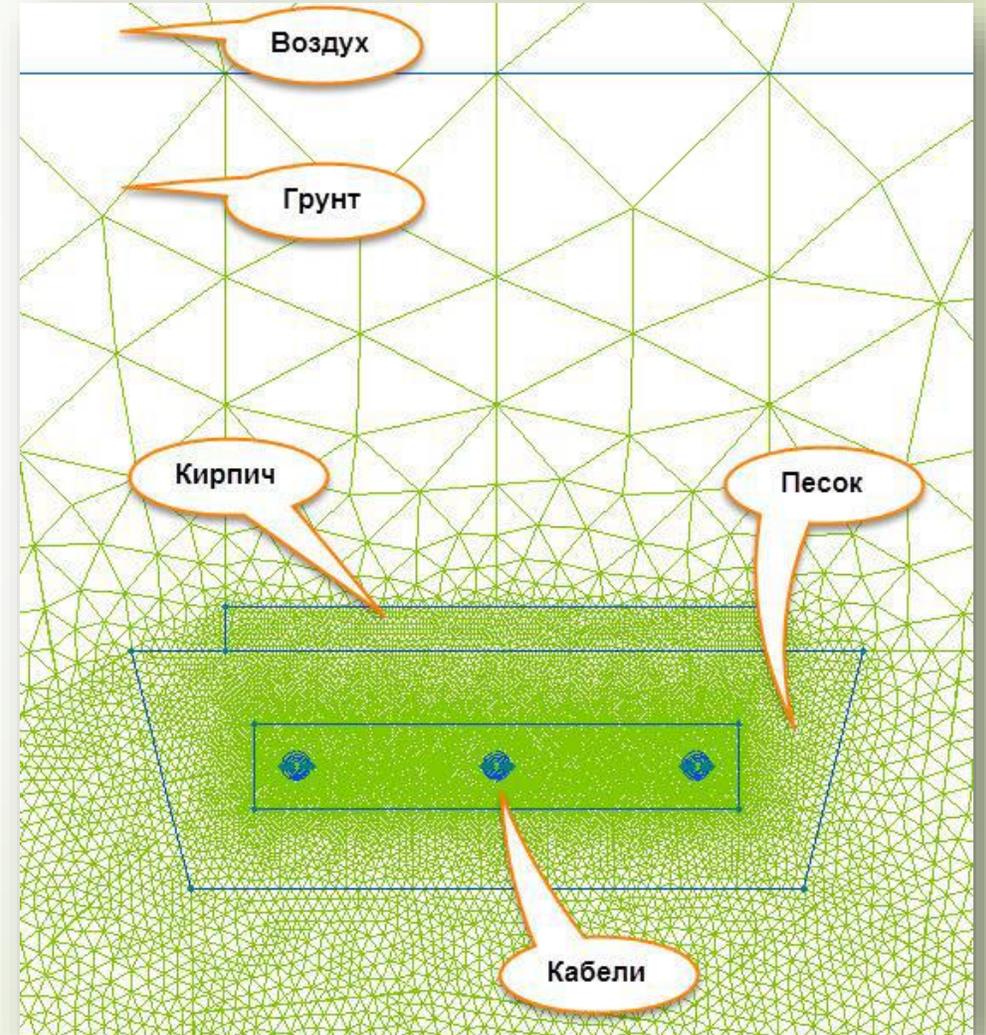
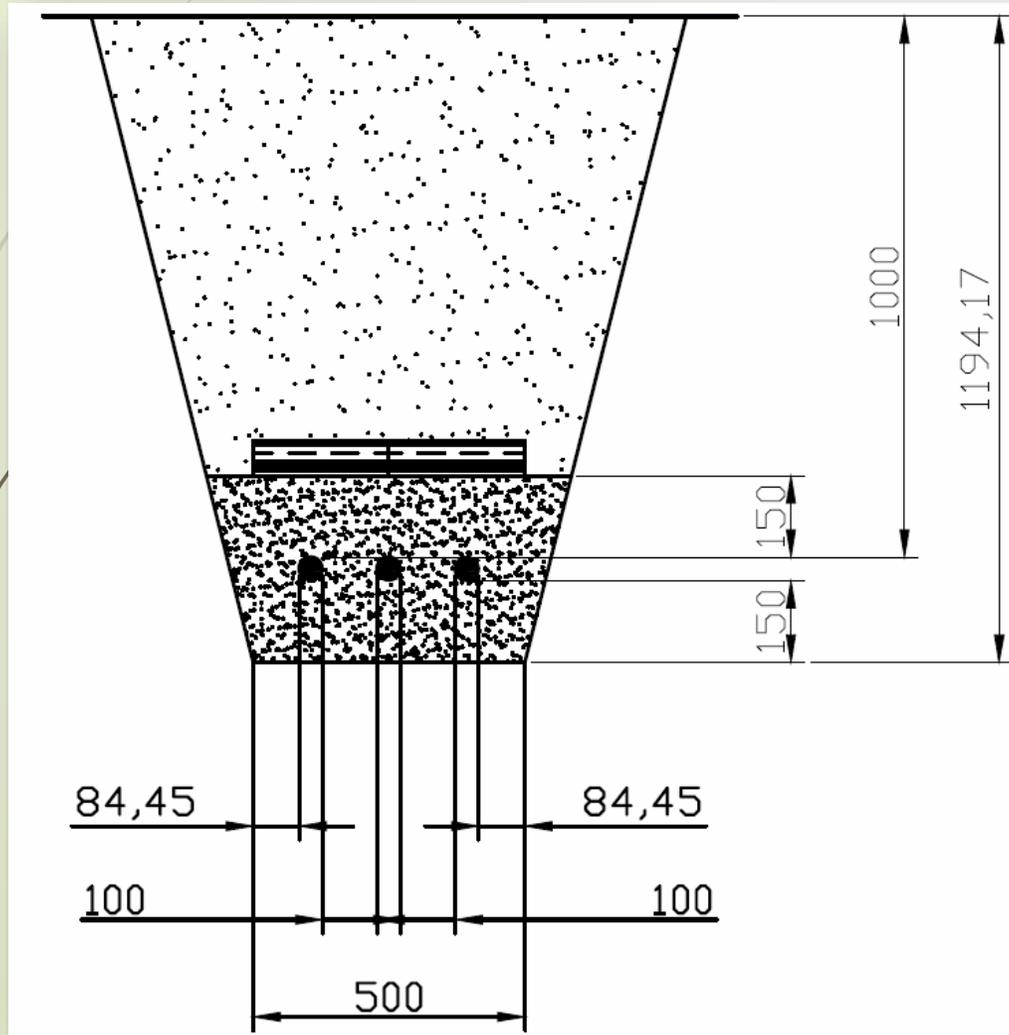
- С учетом скрутки, каждый сегмент последовательно занимает все возможные положения, поэтому допустимо считать токи в жилах одинаковыми.
- При помощи присоединенной электрической цепи соединяем сегменты последовательно, насильно задавая условие одинаковых токов



Упрощения и допущения температурного расчета

12

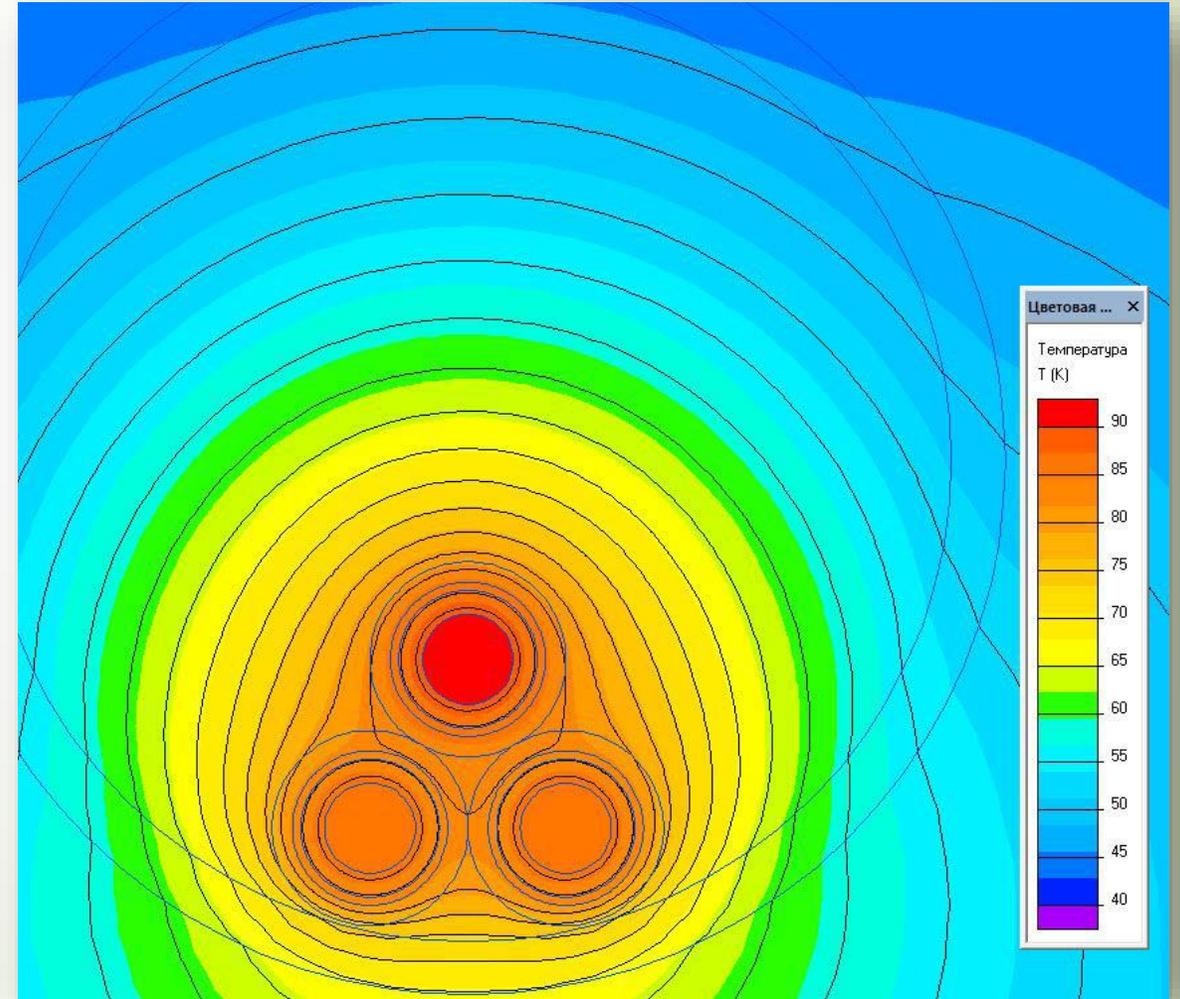
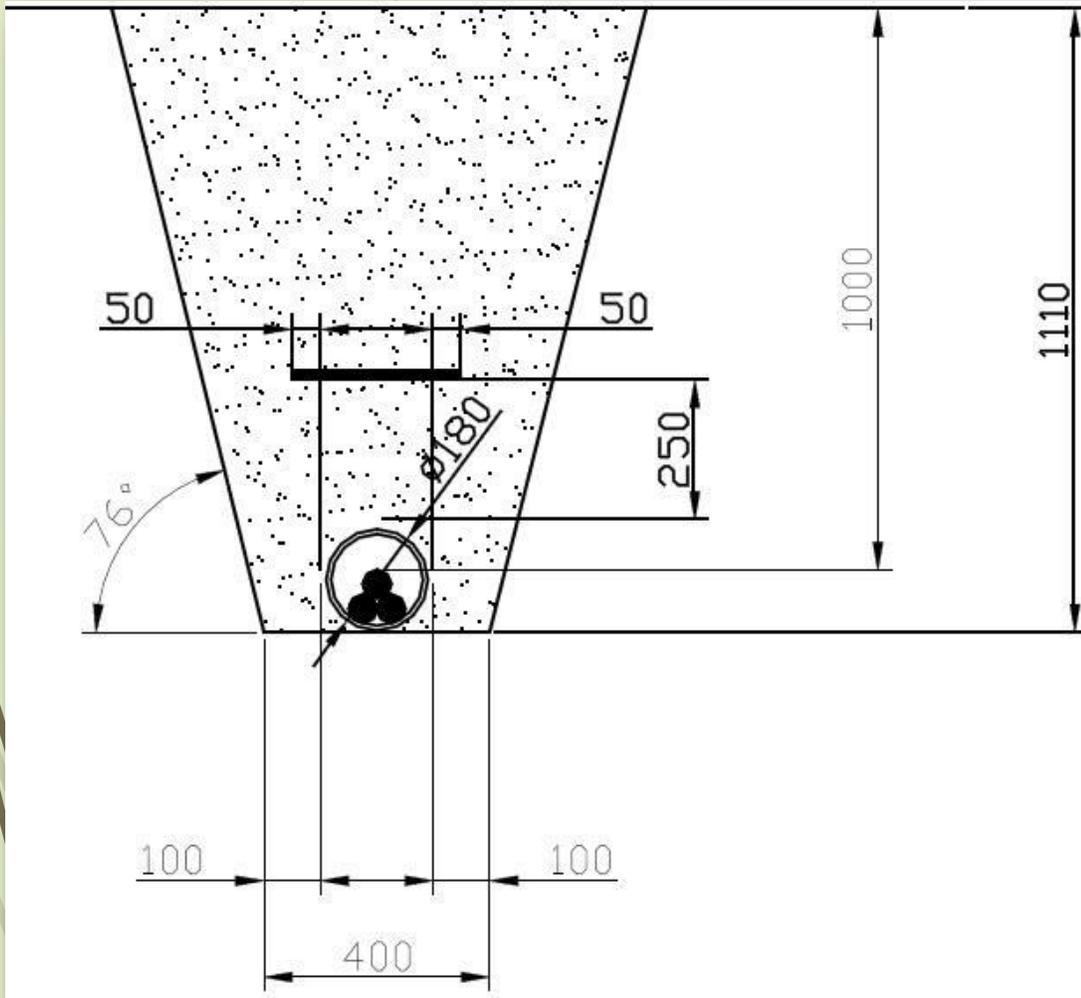
Модель весьма точна для кабелей, закопанных в землю



Упрощения и допущения температурного расчета

13

Степень неопределенности возрастает при укладке в трубах из-за необходимости учета конвективного и радиационного теплообмена

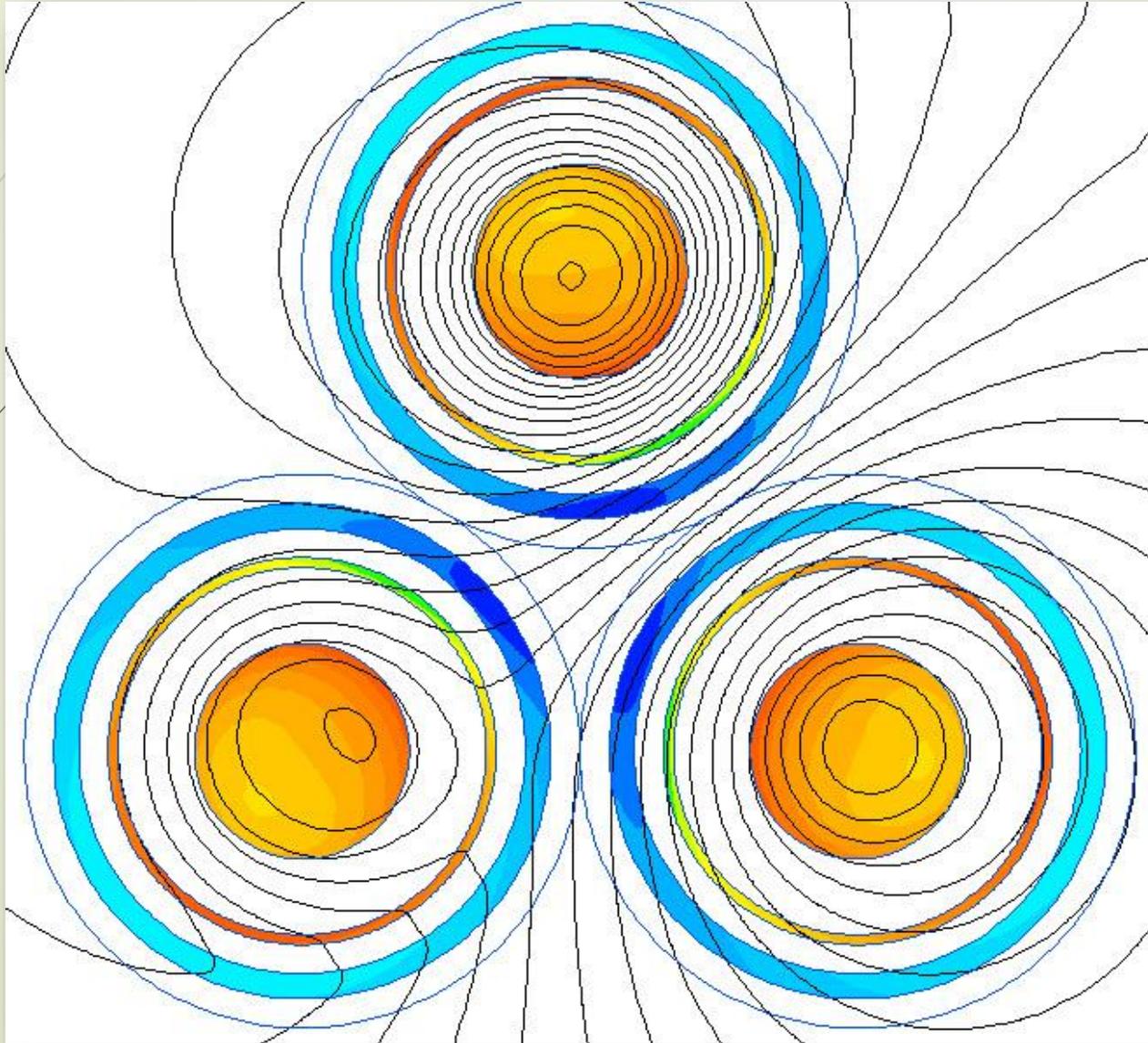


Магнитное поле в поперечном сечении кабельной линии

14

Картина поля

Интегральные величины



The screenshot shows a software interface titled "Калькулятор" (Calculator) with a list of physical quantities under the heading "Физические величины" (Physical quantities). A callout bubble labeled "Потери" (Losses) points to the "Среднее значение" (Average value) item. The list includes the following items:

- Полный ток
- Сторонний ток
- Вихревой ток
- Мощность теп. выделения
- Среднее значение
 - $P = 22742 \text{ Вт}$
- Максимальная величина
 - $P = 42744 \text{ Вт}$
- Размах колебаний
 - $P = 20002 \text{ Вт}$
- Мгновенное значение
 - $P = 42735 \text{ Вт}$
- Поток мощности
- Полная поперечная сила
- Полный вращающий момент
- Сила Лоренца
- Вращающий момент силы Лоренца
- Электрическая проводимость
- Энергия магнитного поля
- Потокосцепление на один виток
- Магнитодвижущая сила
- Магнитный поток
- Поверхностная энергия

Хорошее совпадение с МЭК 60287 для одиночных линий

15

Температура токопроводящих элементов кабелей, град. С

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	ELCUT	МЭК 60287	ELCUT	МЭК 60287	ELCUT	МЭК 60287
Фаза А (сверху)	88.19	90.0	78.94	Нет	76.37	Нет
Фаза В (слева)	88.61	90.0	79.35	Нет	76.77	Нет
Фаза С (справа)	88.60	89.5	79.34	Нет	76.77	Нет

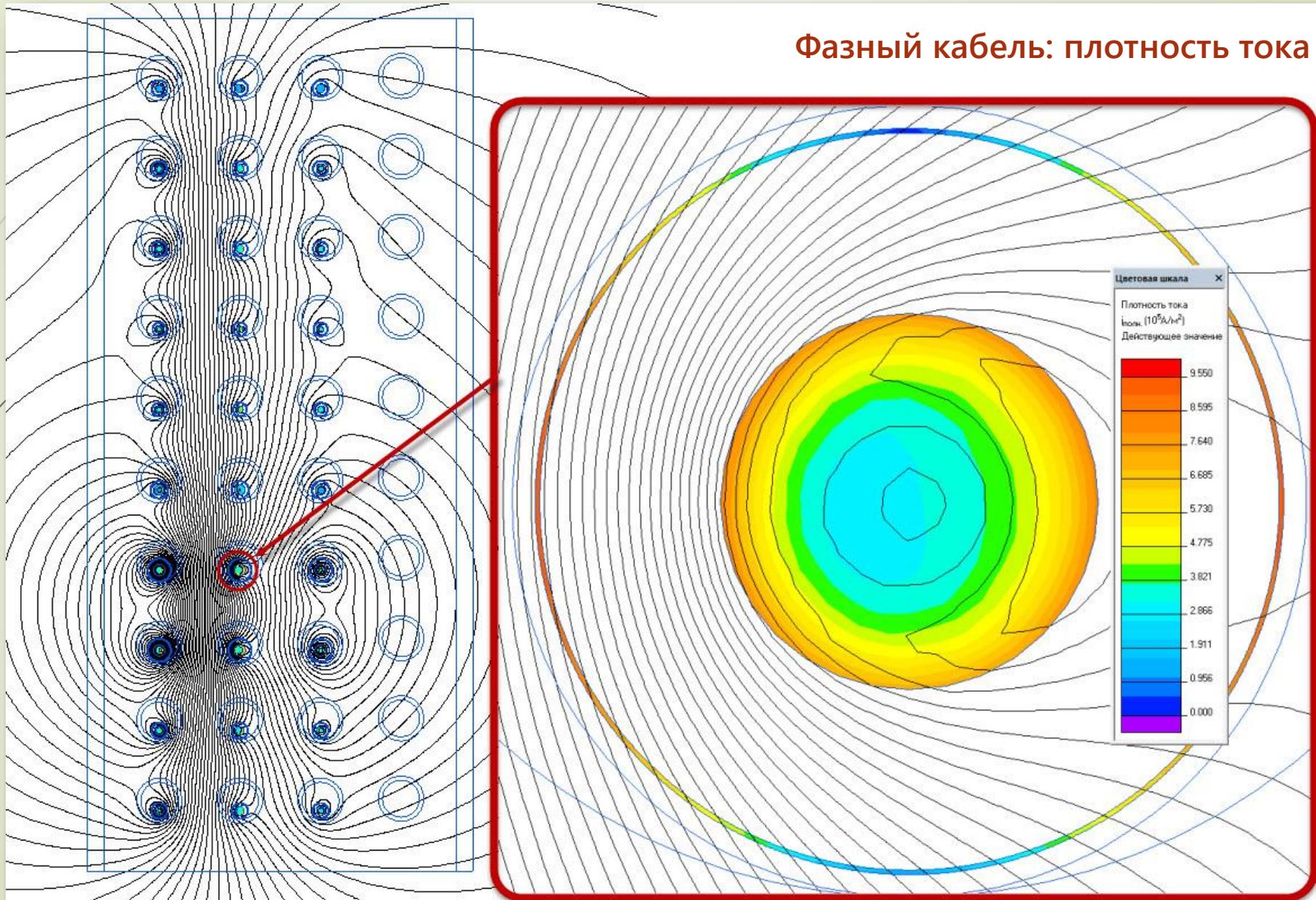
Потери в токопроводящих элементах кабелей на 1 м длины, Вт/м

	Токопроводящая жила		Экран		Броня	
	ELCUT	МЭК 60287	ELCUT	МЭК 60287	ELCUT	МЭК 60287
Фаза А (сверху)	31.46	31.89	2.22	6.43	4.21	0
Фаза В (слева)	31.50	31.89	2.23	6.43	4.23	0
Фаза С (справа)	31.50	31.89	2.23	6.43	4.23	0

Магнитное поле кабельного блока (расчет ELCUT)

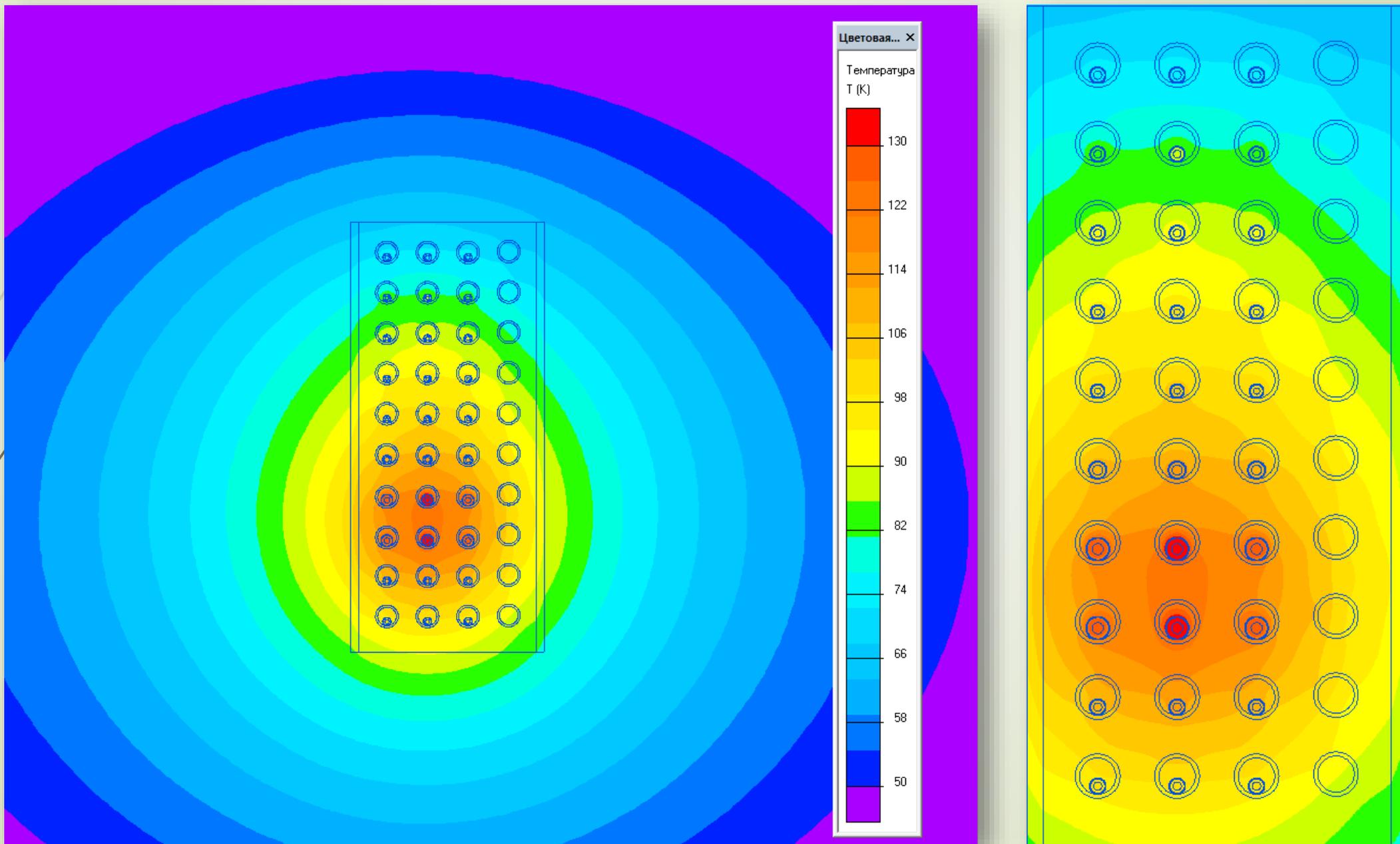
16

Фазный кабель: плотность тока



Температурное поле в сечении кабельного блока (расчет ELCUT)

17



Сравнение результатов моделирования ELCUT и МЭК 60287

Сопоставление по температуре жилы

Линия	Разница температуры жилы, °C		
	A	B	C
1	2.4	2.8	2.3
2	6.0	7.0	6.0
3	8.3	9.5	8.4
4	10.3	11.6	10.5
5	12.7	14.4	12.9
6	15.4	17.9	15.7
7	22.5	27.3	22.8
8	21.8	26.7	22.0
9	13.5	16.0	13.6
10	7.9	9.1	7.8

Сопоставление по мощности потерь

Отношение потерь в жиле (МКЭ / МЭК)		
A	B	C
21.6%	26.0%	21.6%
15.5%	18.3%	15.5%
15.5%	19.2%	15.6%
11.1%	13.8%	11.1%
11.3%	14.6%	11.4%
38.7%	57.0%	38.8%
40.1%	47.3%	40.1%
39.9%	47.3%	39.9%
20.7%	27.9%	20.7%
18.8%	22.2%	18.8%

Расчет пропускной способности : Выводы

19

1. Проведено детальное сравнение расчета температурного режима подземной кабельной линии по методике МЭК 60287 и мультифизического моделирования программой ELCUT. Объектом исследования служили как одиночные трехфазные линии так и коллективные кабельные сооружения. Сравнивались окончательные температуры и промежуточные результаты: потери и тепловые сопротивления.
2. Обнаружено практически точное совпадение температур, уровней потерь и тепловых сопротивлений для одиночных линий с расположением в плоскости и треугольником.
3. Анализ температурного поля мощного кабельного блока показал качественное совпадение обеих методик, но заметные количественные расхождения. Оценка путем расчета поля дает более высокие значения по температурам на 25...27°C, по потерям в ТПЖ до 47%, и еще большую разницу по потерям в экранах.
4. Численные эксперименты показывают, что стандарт систематически недооценивает степень электромагнитного и теплового взаимодействия кабелей при коллективной прокладке. Мы полагаем, что мультифизическое моделирование дает более полную и точную картину взаимодействия кабелей, что необходимо принимать во внимание при проектировании.
5. Программный продукт ELCUT предоставляет широкие возможности для проектировщиков кабельных линий, которые тем более необходимы, чем сложнее проектная ситуация.

Управление внешним магнитным полем кабельной линии

Подводные кабели

Защита ихтиофауны

- Рыбы используют естественное геомагнитное поле особенно его вертикальную компоненты, для навигации
- Необходимо избежать вредного влияния переменного магнитного поля промышленной частоты на ихтиофауну

Селитебная зона

Защита населения: ГН 2.1.8/2.2.4. 2262-07

- Кабельная линия, обычно в составе коллективного кабельного сооружения – блока, коллектора и т.п. – пересекает жилые или обитаемые зоны.
- Предельные уровни (мкТл): 5 (жилые помещения), 10 (нежилые помещения), 20 (населенная местность), 100 (труднодоступная местность)

Обслуживаемые сооружения

Защита персонала: СанПиН 2.2.4.723-98

- Кабельные туннели или коллекторы, которые нуждаются в обслуживании персоналом
- Предельный уровень: 100 мкТл

Конфигурация магнитного поля без экранов.

1. Одноцепная линия

Параметры модельной трехфазной линии

Класс напряжения $U_{\text{лин}}$ 110 кВ

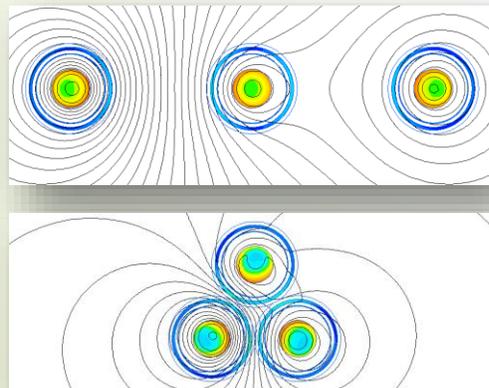
Номинальный фазный ток I_{ϕ} 1375 А

Глубина расположения линии 1 м

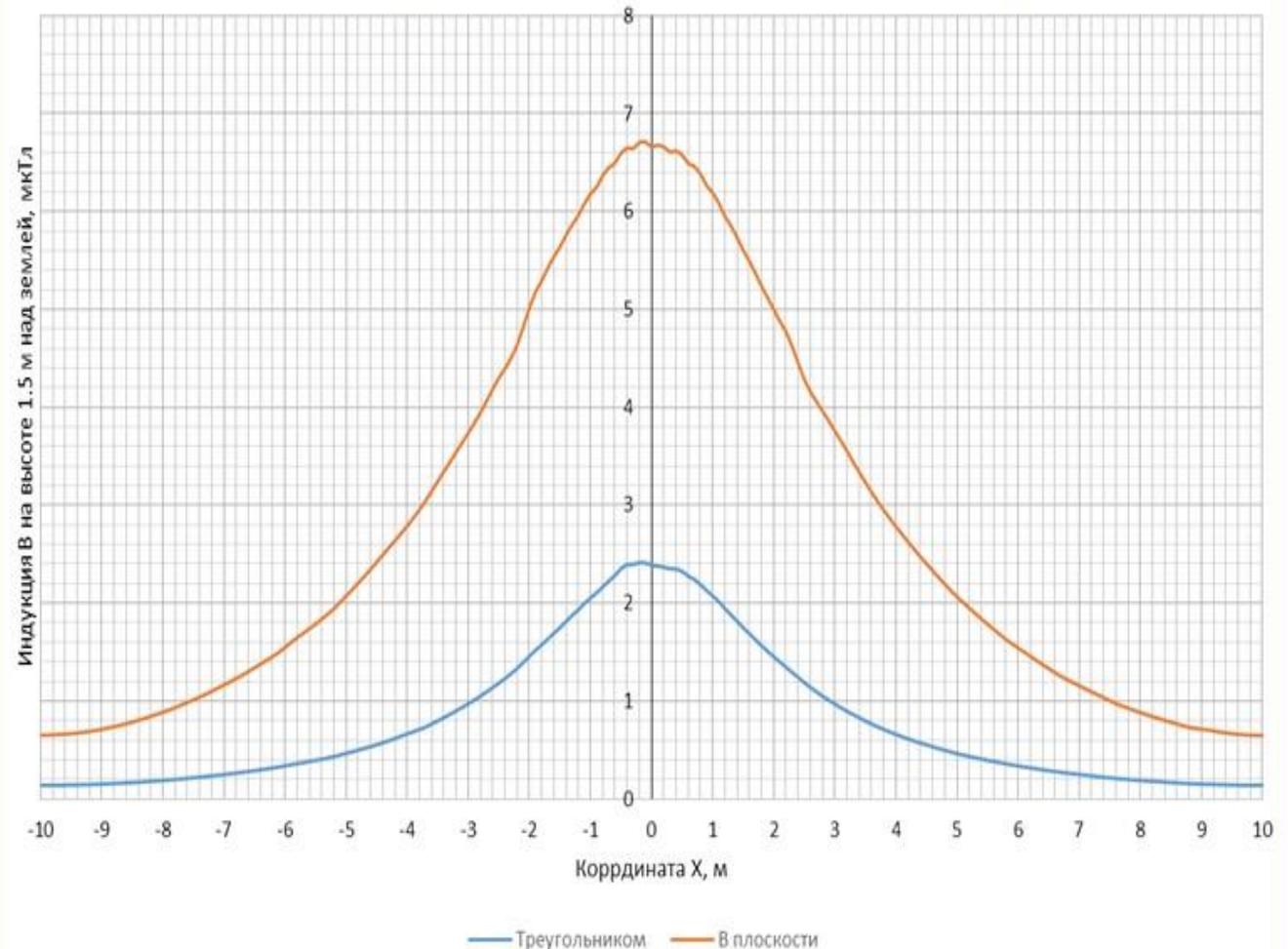
Параметры кабеля

Сечение медной жилы 1400 мм²

Сечение экрана из медных проволок и ленты 210 мм²

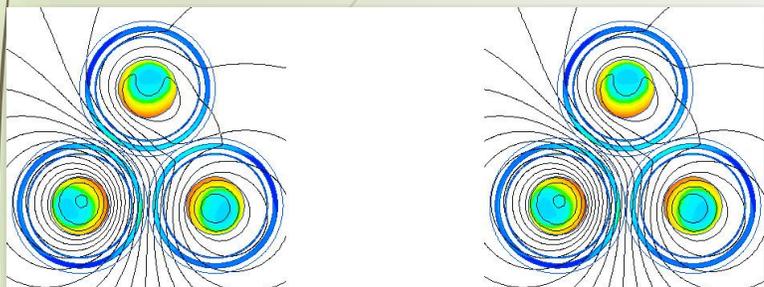


Магнитное поле одиночной кабельной линии без магнитного экрана

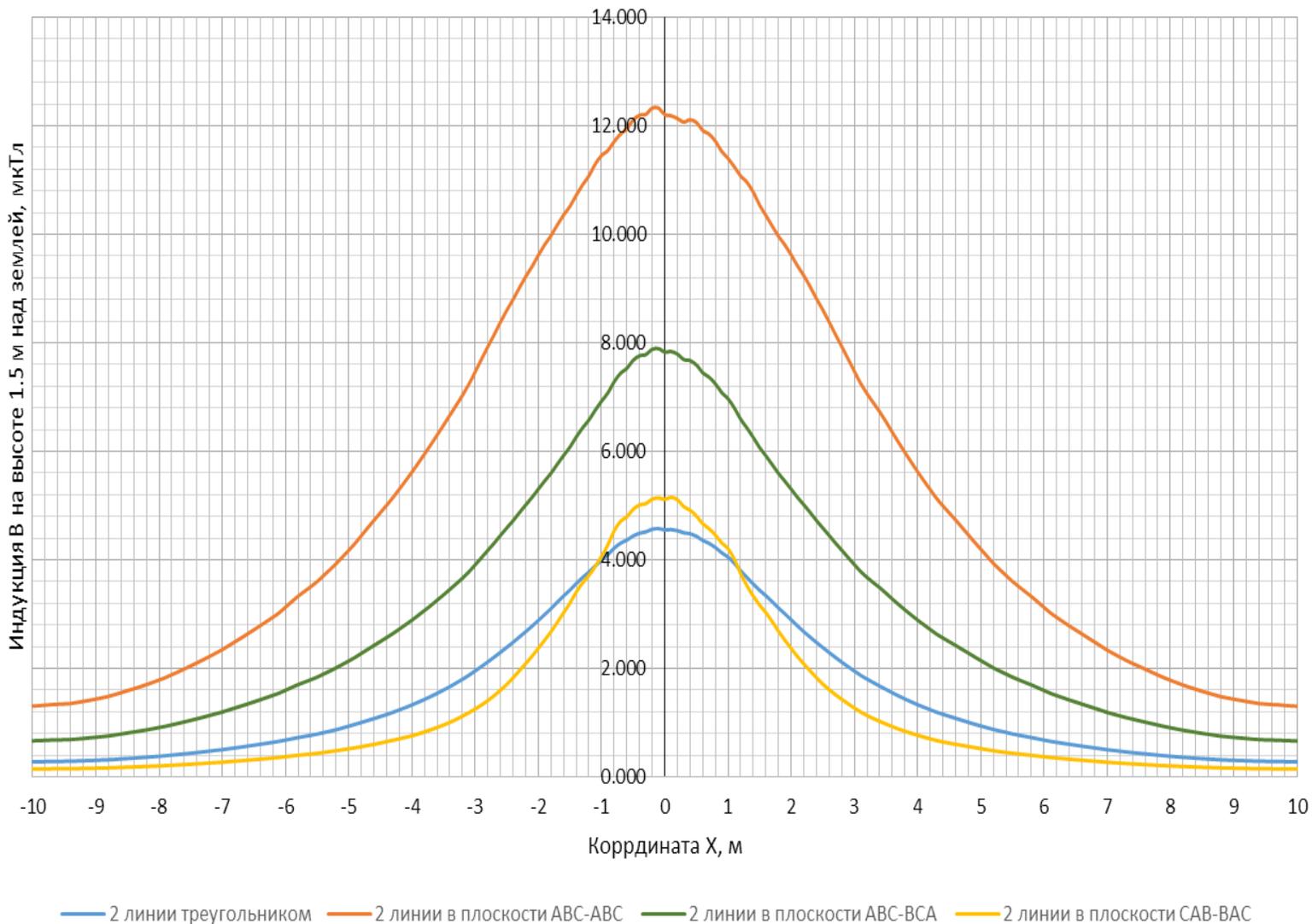


2. Двухцепная линия, расстояние 500 мм

22



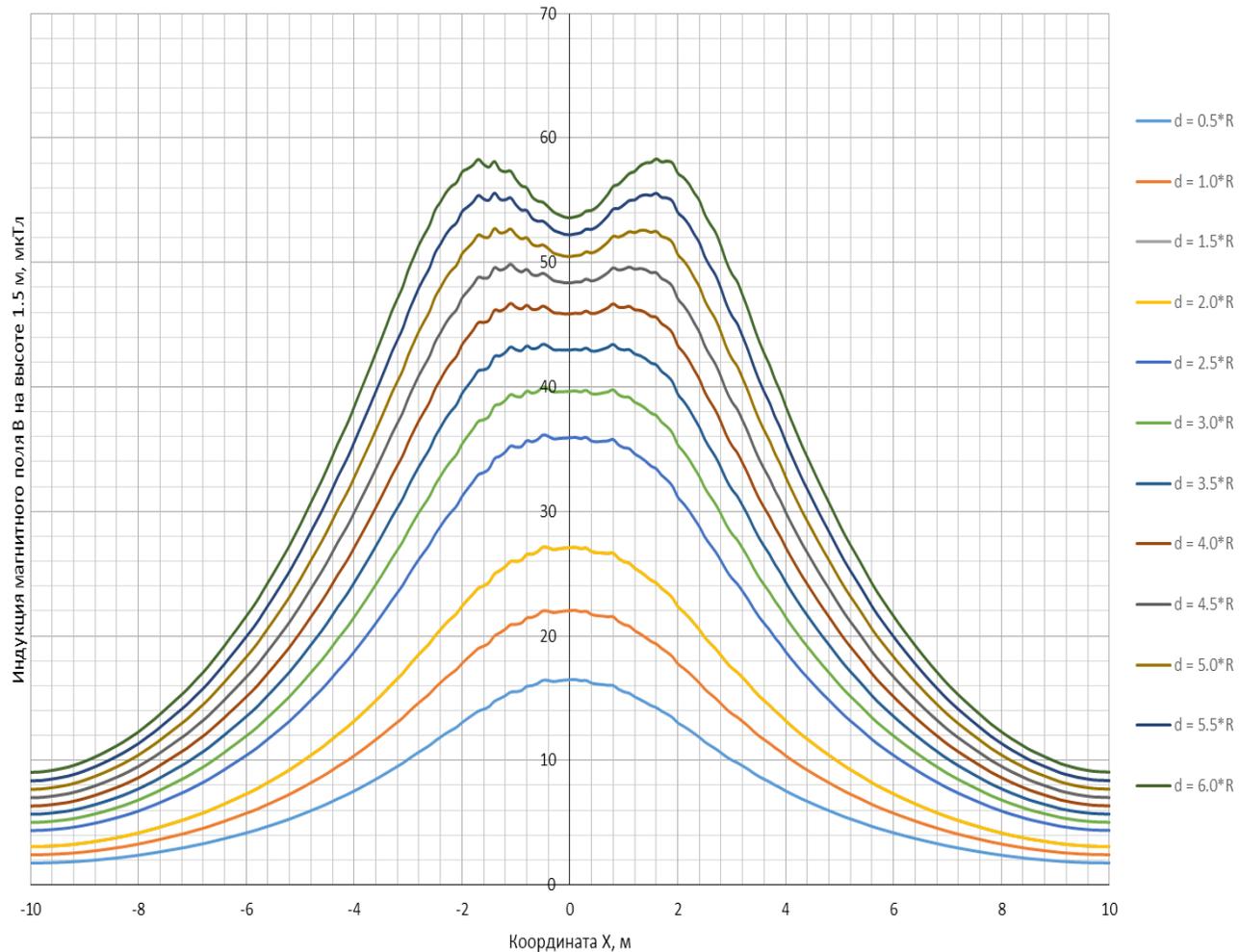
Магнитное поле пары кабельных линий без магнитного экрана



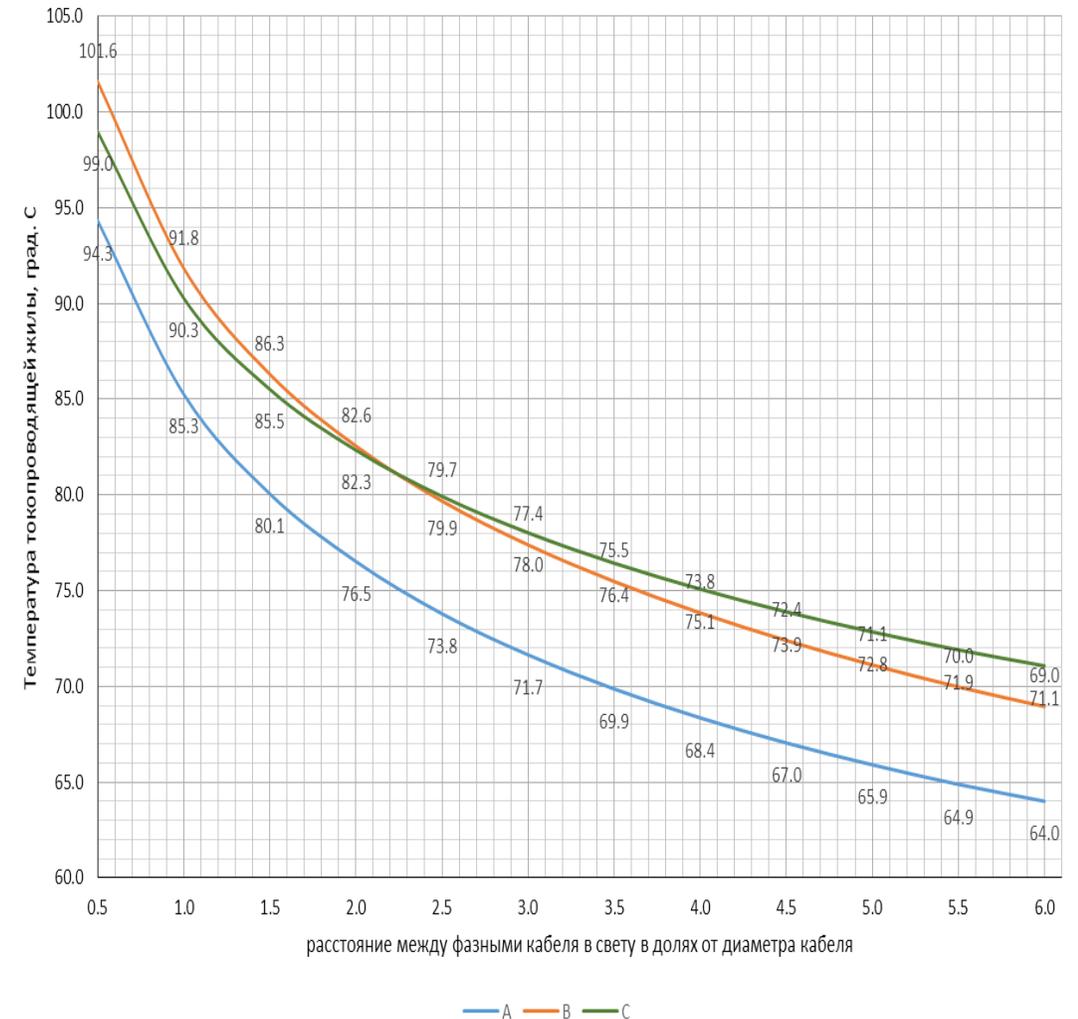
3. Зависимость магнитного поля от междофазного расстояния

Сближение фаз уменьшает внешнее поле ценой снижения нагрузочной способности

Магнитное поле В двух подземных кабельных линий
на высоте 1.5 м над поверхностью земли



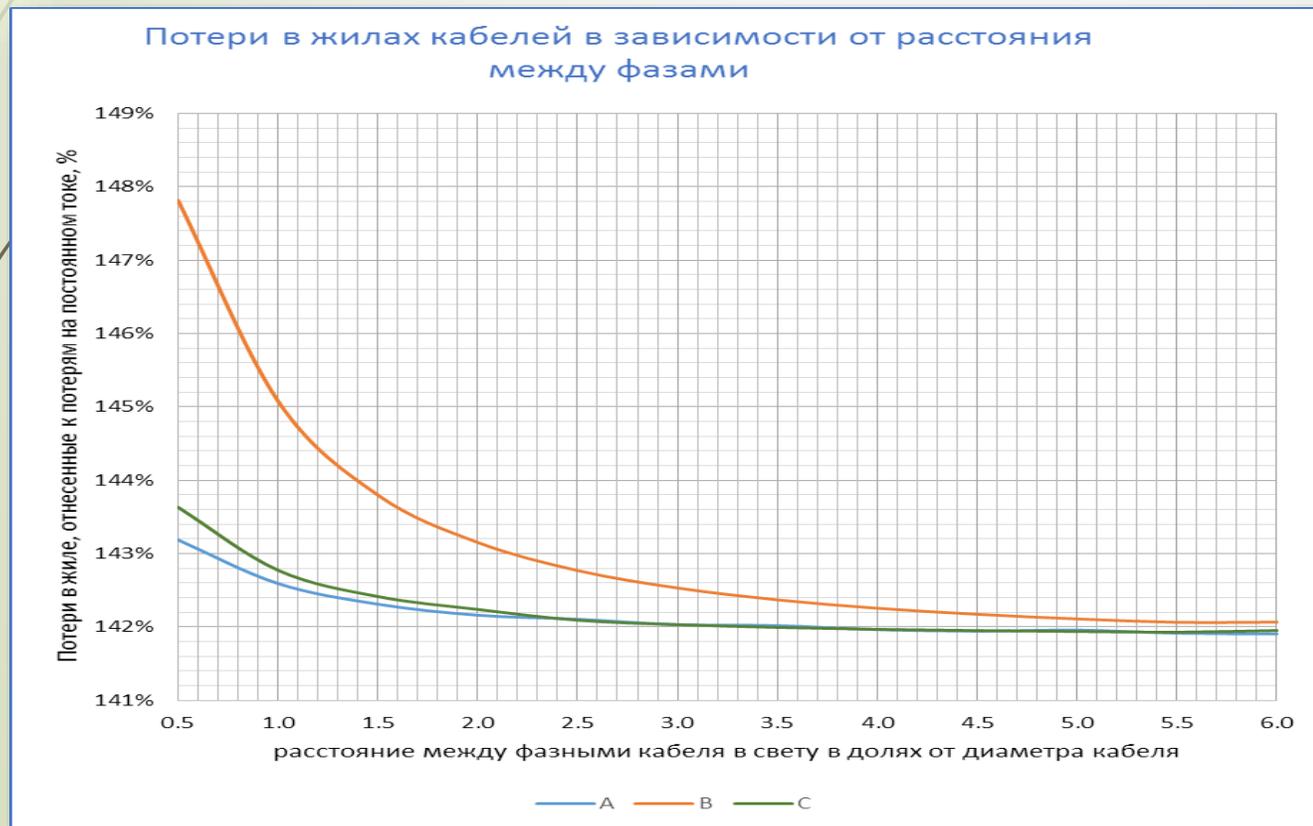
Температуры фазных жил в зависимости от расстояния между фазами



4. Причины возрастания температуры кабеля при уменьшении расстояния между фазами

Снижение внешнего магнитного поля при сближении фазных кабелей достигается ценой снижения пропускной способности по току.

1. Увеличение потерь при сближении из-за эффекта близости
2. Подогрев кабелями друг друга

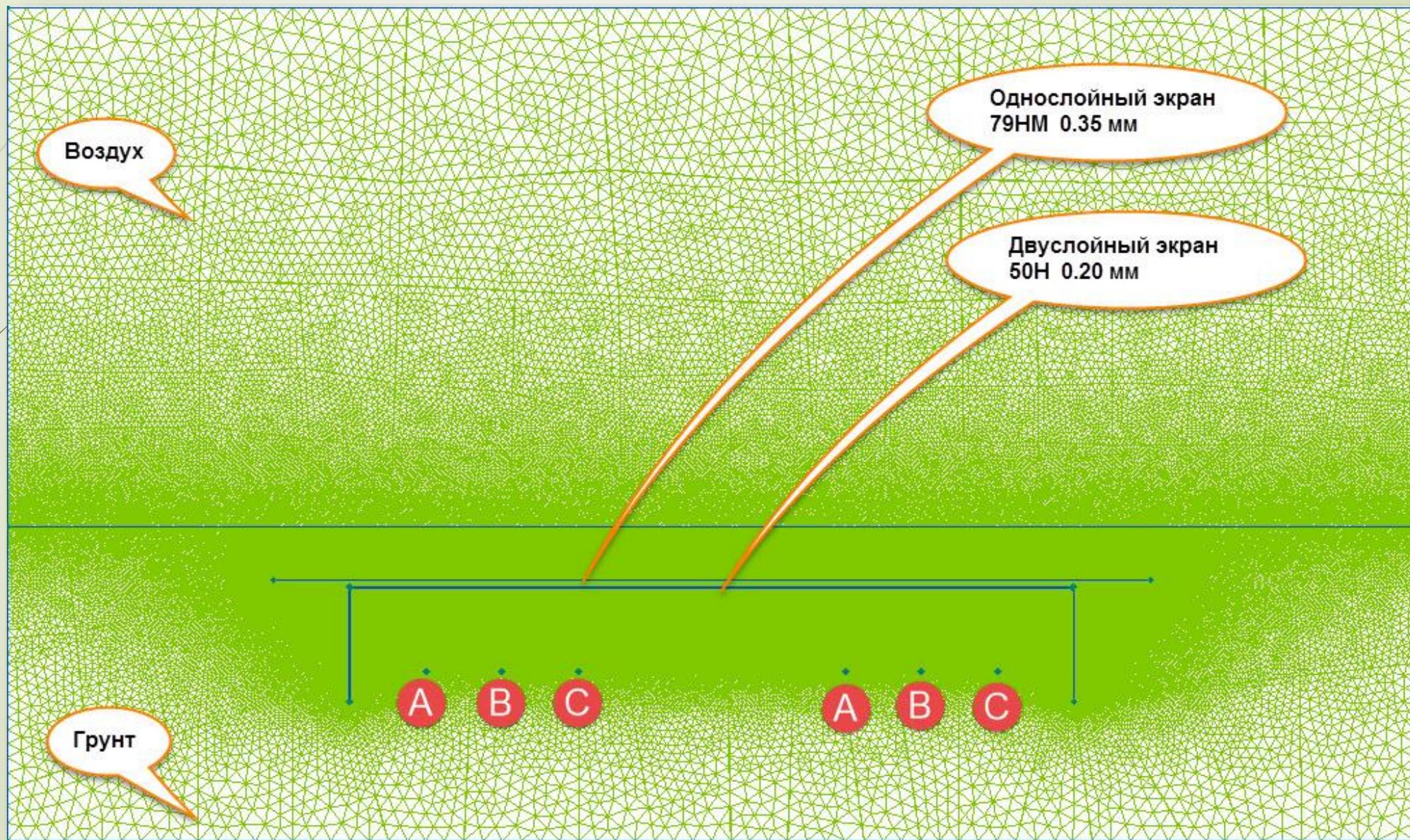


С уменьшением междуфазного расстояния

Потери существенно снижаются при уменьшении расстояния от 0.5 до 2.0 диаметров кабеля.

При больших расстояниях снижение температуры вызвано ослаблением не электромагнитного, а теплового взаимодействия.

4. П-образные магнитомягкие пленочные экраны (совместно с ТехноСервис–Электро, Москва)



П-образный экран: проблема масштаба

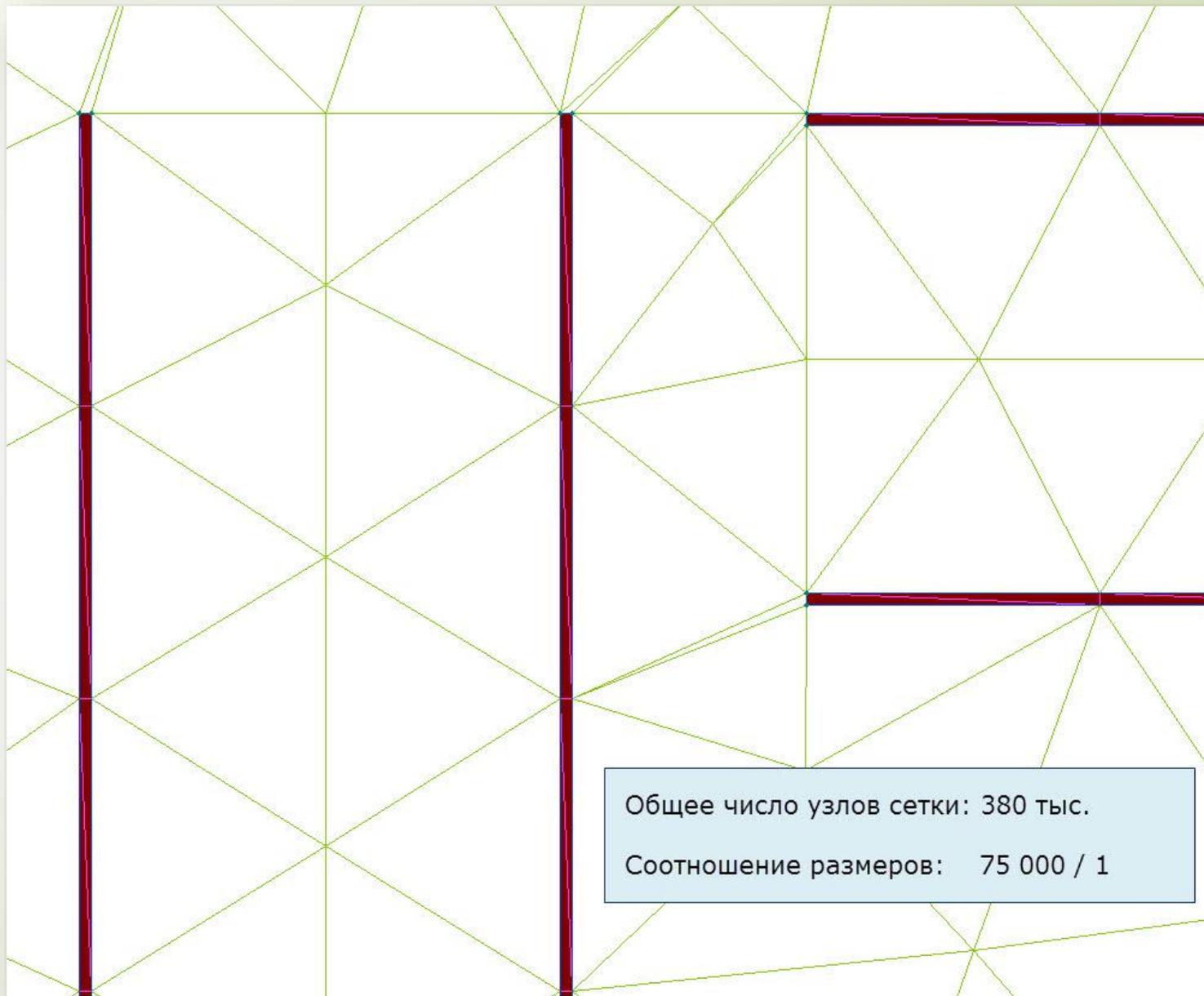
26

Основная сложность:

Сопряжение в одной модели
разномасштабных элементов

Габарит модели 15 метров
Толщина пленки 0.2 мм

На рисунке показан угол
двуслойного экрана с
конструктивной щелью

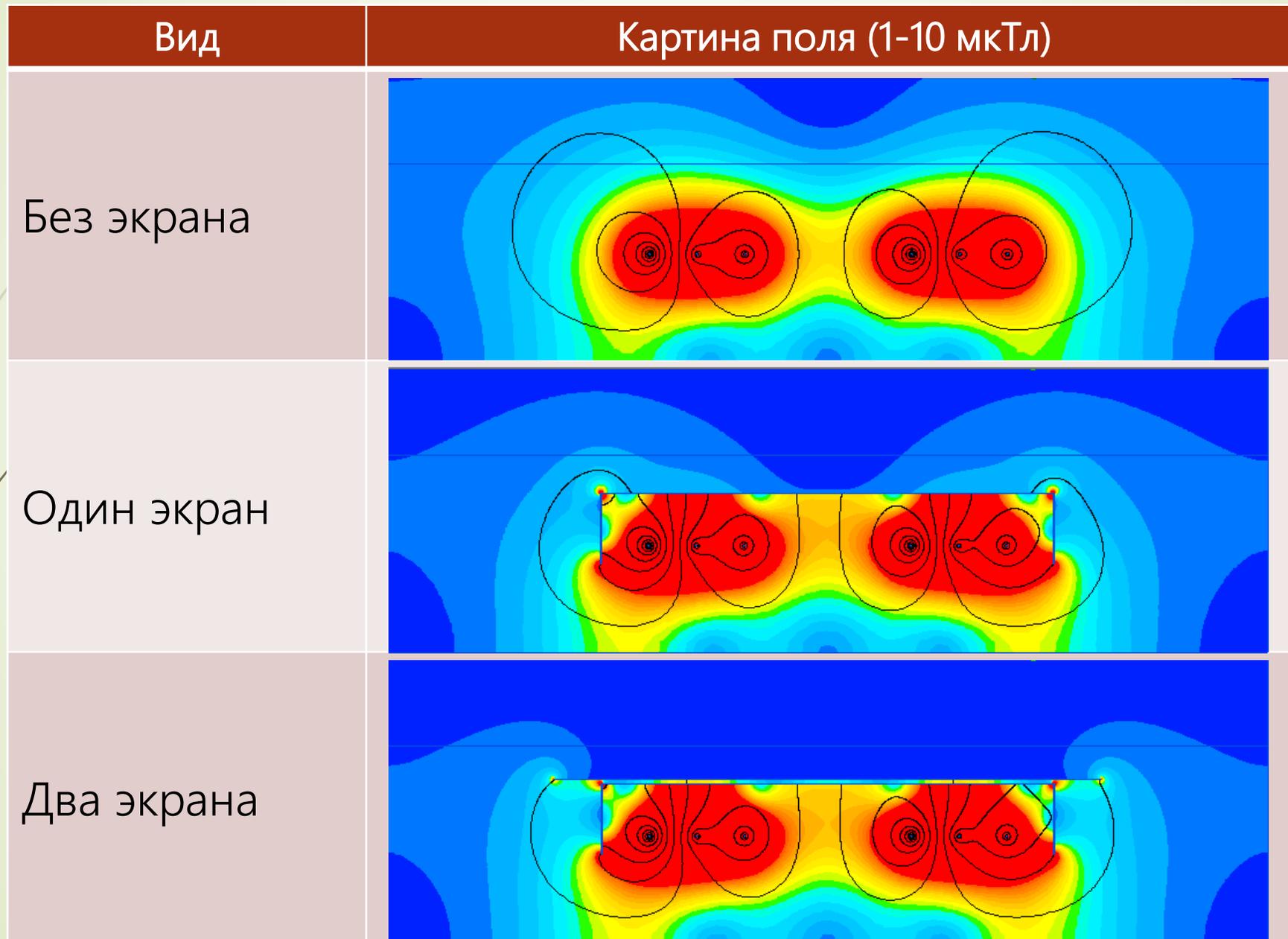


Общее число узлов сетки: 380 тыс.

Соотношение размеров: 75 000 / 1

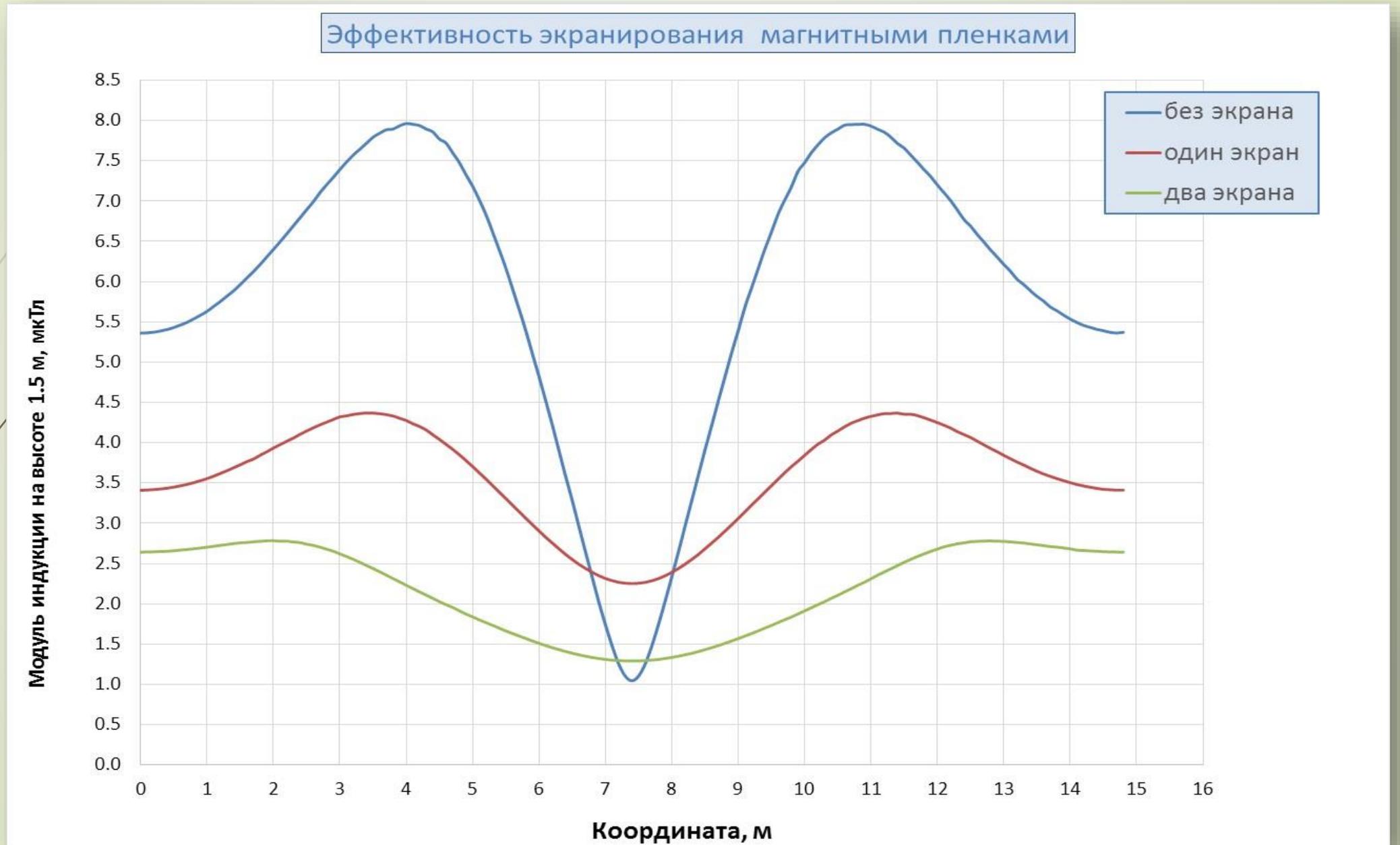
Картина магнитного поля с экранами

27



Результаты сравнительного моделирования поля (1.5 м над землей)

28



5. Щелевые экраны для локального экранирования кабелей

29

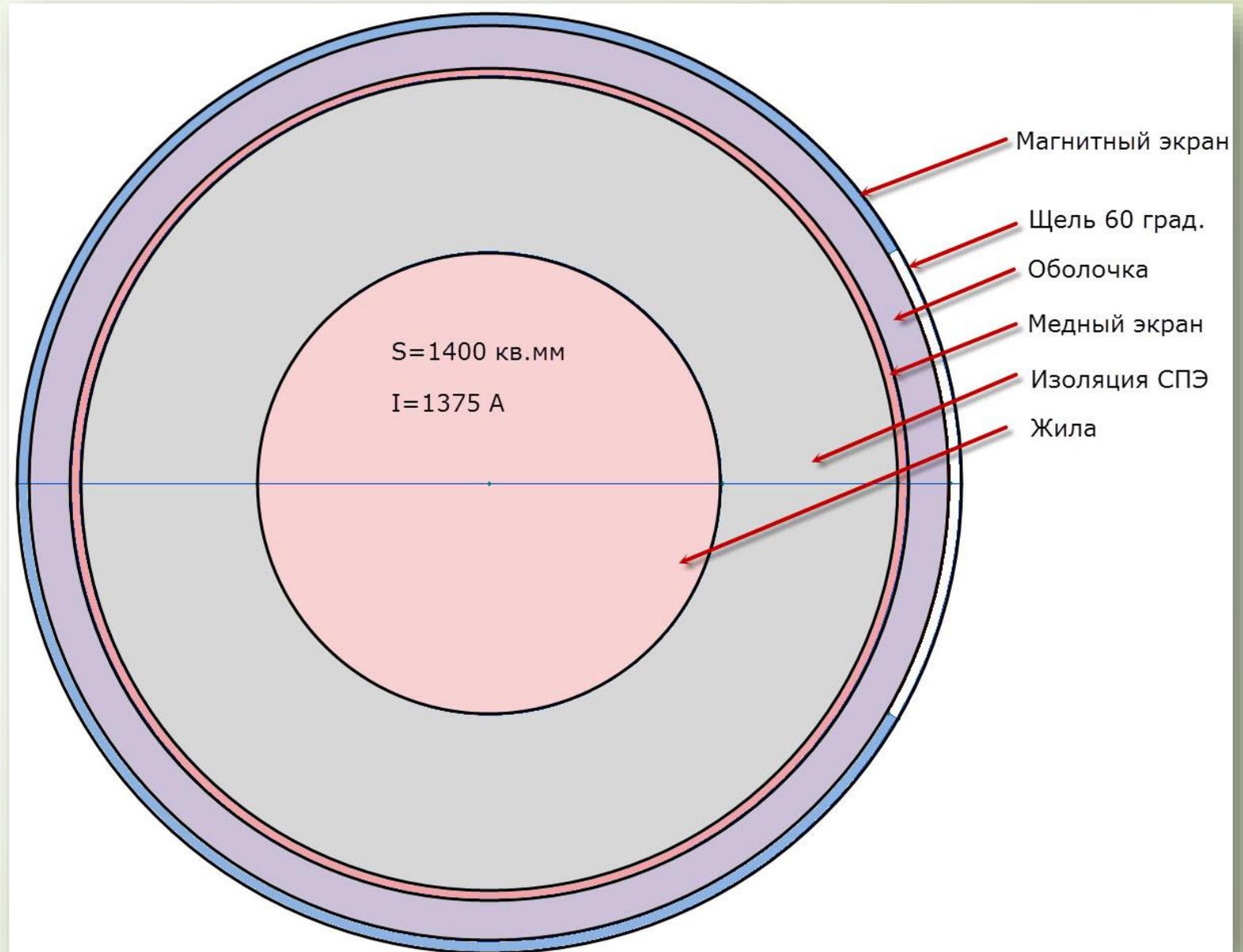
Надвижной щелевой экран

Конструкция экрана:

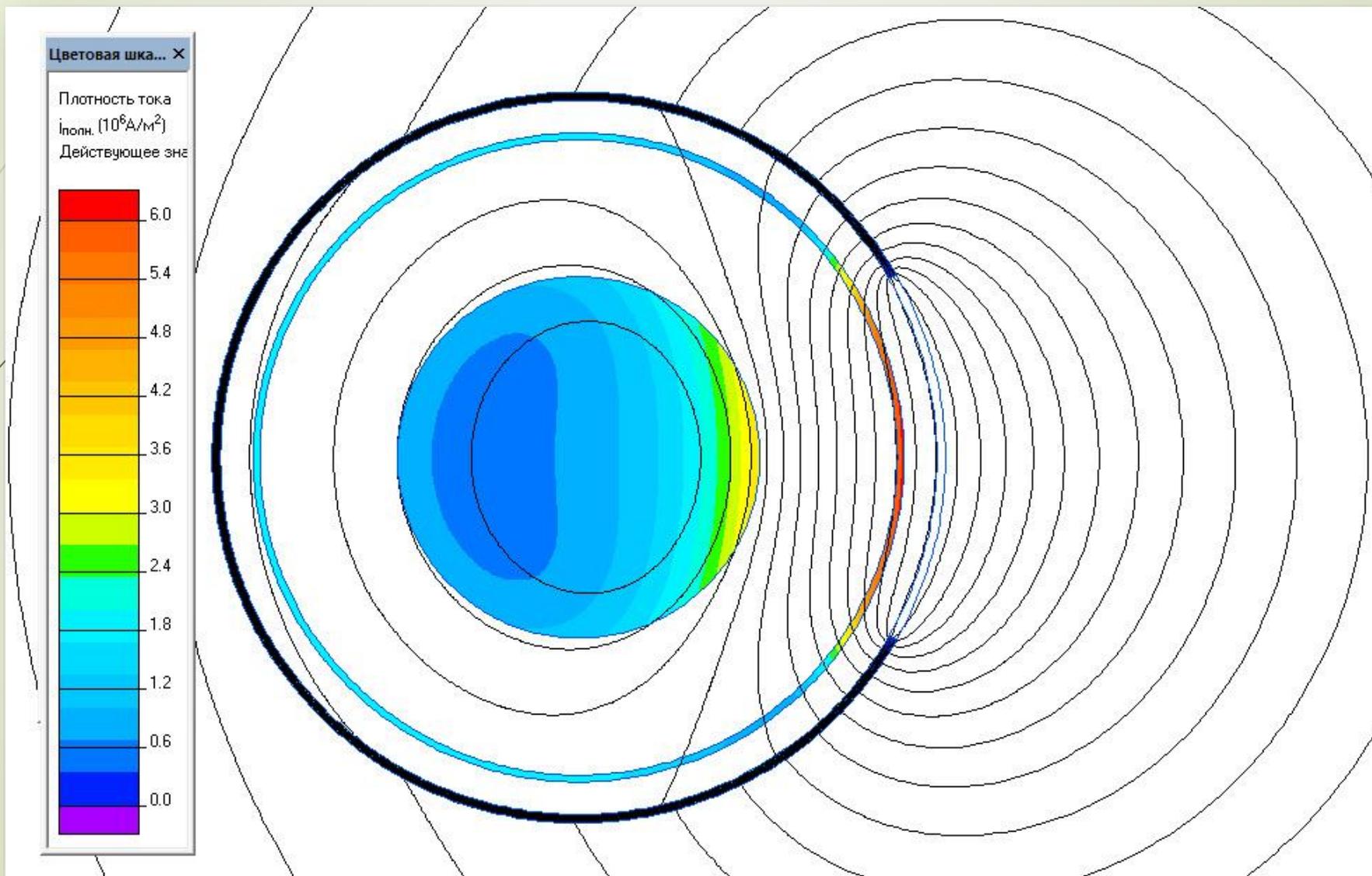
несколько слоев пленки из магнитомягкого аморфного сплава, разделенные гибкой пластиковой матрицей

Принцип действия:

Перераспределение магнитного поля с выплеском против щели и уменьшением в противоположном направлении

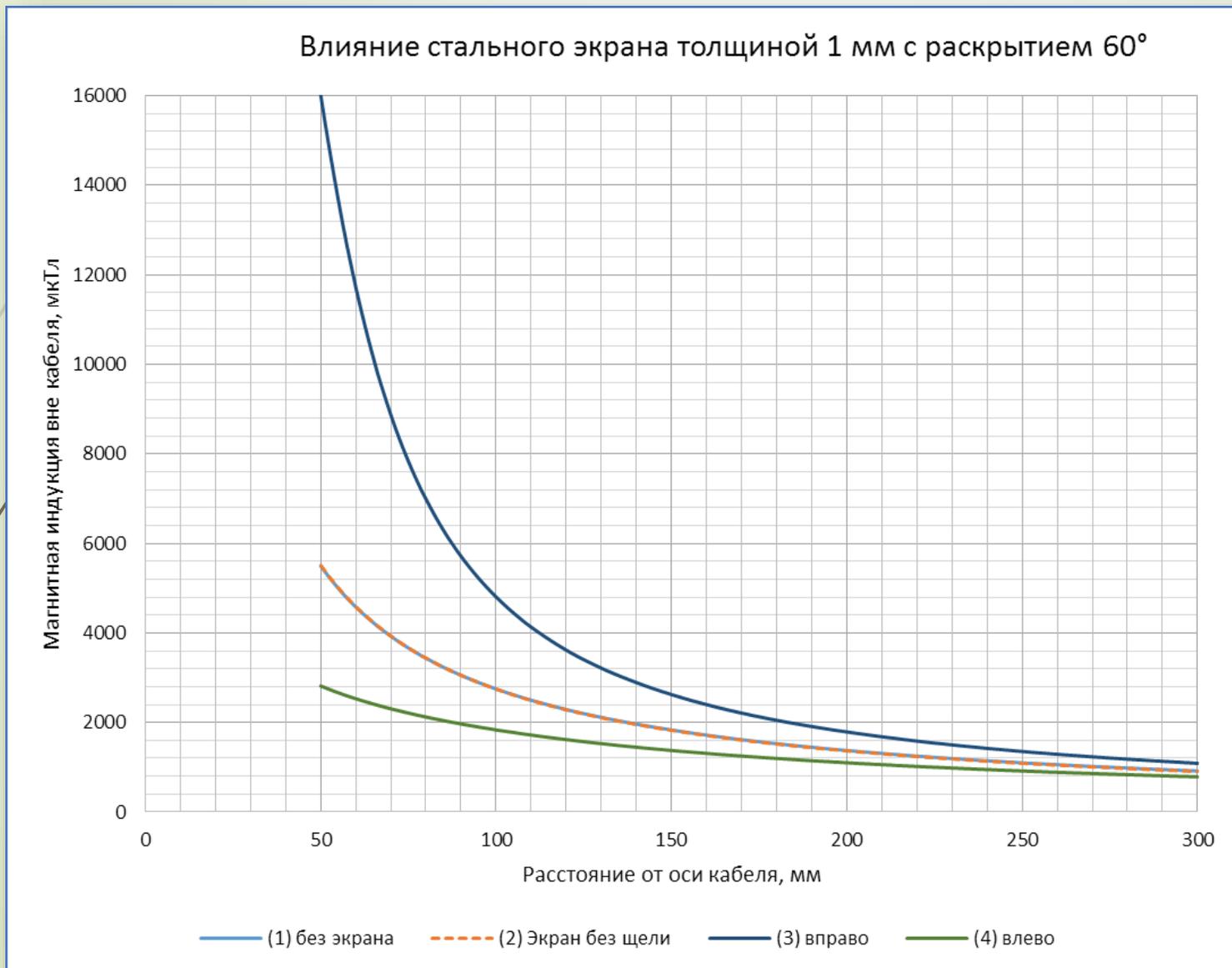


Поле кабеля со щелевым экраном



Влияние экрана с раскрытием 60°

31



Экран без щели не оказывает никакого влияния на внешнее магнитное поле кабеля

Щель снижает поле на расстояниях до 2...3 диаметров кабеля

Влияние экрана на потери в кабеле

Перераспределение поля происходит не только во внешней области, но и внутри кабеля



Значительно возрастают потери в ТПЖ и в экране

№	Вариант	Погонные омические потери, Вт/км			
		Жила	Экран кабеля	Магнитный экран	Всего
1	Без магнитного экрана	31 519	3.1	0	31 522
2	Стальной экран без щели	33 595	3.2	24 902	58 500
3	Стальной экран со щелью 60°	40 091	24 729	14 664	79 484
4	60°, непроводящий	40 179	24 937	147	65 263
5	60°, немагнитный	31 519	3.2	0.5	31 523

Причины возникновения дополнительных потерь при наличии магнитного экрана

Стальной экран оказывает воздействие на поле благодаря двум разным механизмам:

1. Концентрации магнитного потока из-за высокой магнитной проницаемости;
2. Вихревым токам, индуцированным в проводящем слое.

В численном эксперименте мы можем проверить каждый из факторов по отдельности, отключая по очереди магнитные свойства экрана и его проводимость (строки 4 и 5 таблицы на предыдущем слайде).

Вычисления показывают, что главная причина повышенных потерь – перераспределение магнитного поля.

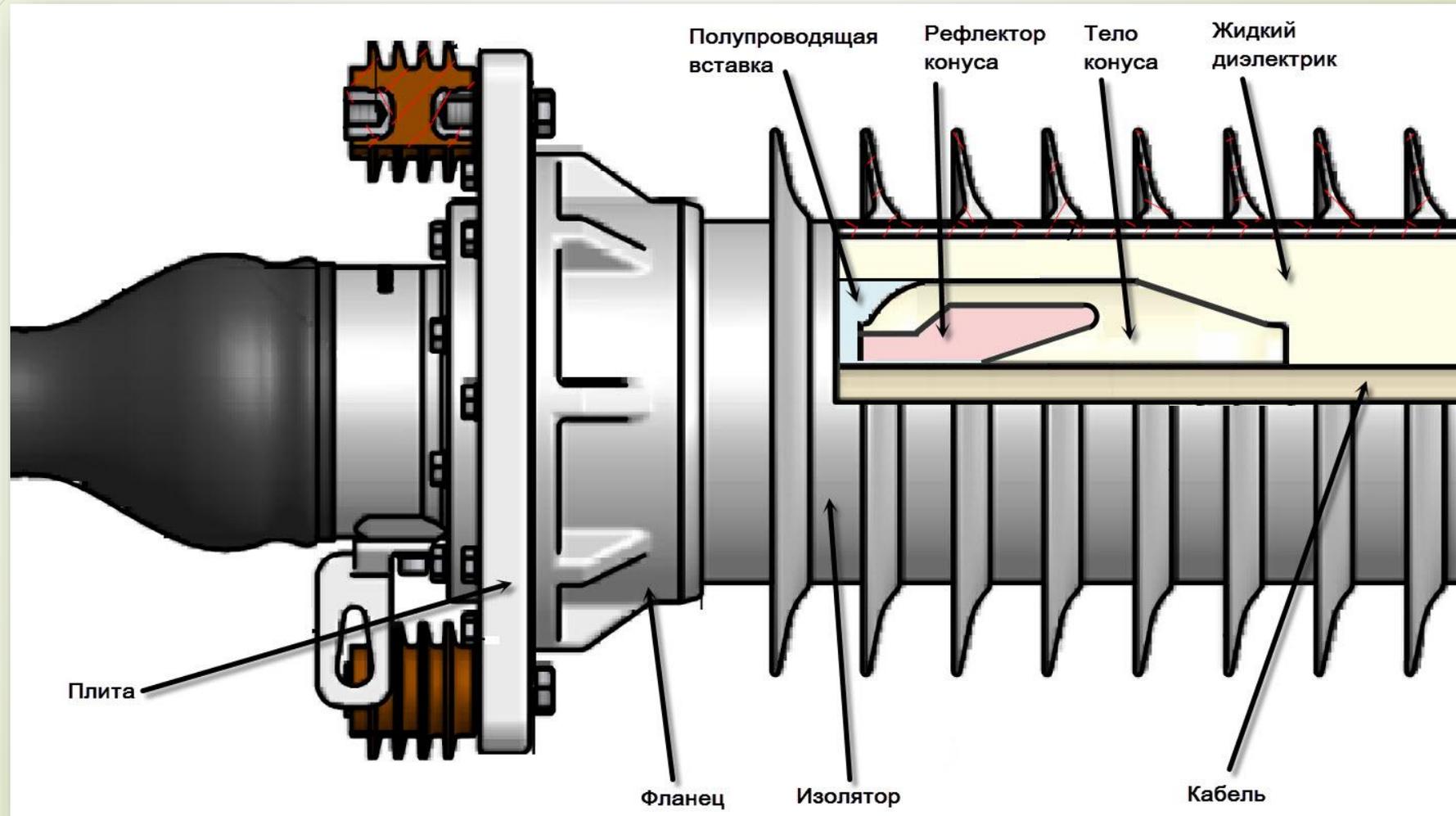
Управление магнитным полем кабельной линии: Выводы

1. Проведено мультифизическое моделирование внешнего магнитного поля и температурного состояния одноцепной и двухцепной подземной кабельной линии. Исследованы меры по снижению внешнего магнитного поля и их влияние на температуру линии.
2. Предложенная методика дает детальную оценку не только распределения внешнего магнитного поля на требуемой высоте над поверхностью земли, но и влияния принятых мер на тепловой режим кабелей. Методика используется ЗАО НПО «Техносервис-Электро», Москва.
3. Показано, что при необходимости снижения внешнего магнитного поля начинать целесообразно с выбора фазировки линий и междуфазного расстояния. Если этих мер недостаточно, то можно использовать экранирование тонкими высокомагнитными пленками, как правило в несколько слоев.
4. Эффективность проводящих (алюминиевых) экранов на промышленной частоте существенно ниже, чем магнитных.
5. Практически любое мероприятие по снижению внешнего магнитного поля приводит к локальному повышению потерь в проводниках. Поэтому, анализ должен включать в себя не только расчет магнитного поля, но и изменившегося теплового состояния.

Сглаживание электрического поля в кабельной муфте

35

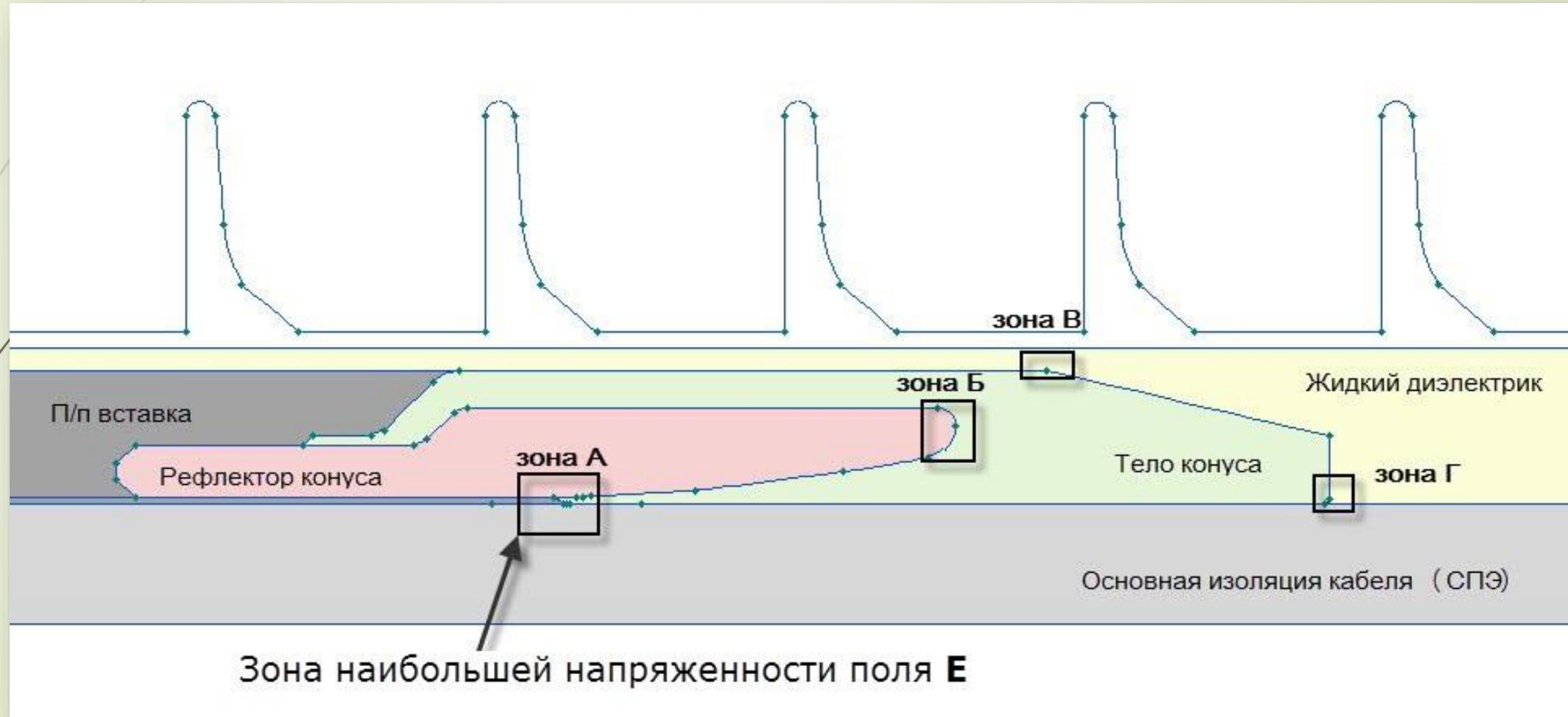
Цель работы: Выбор оптимальных параметров стресс-конуса:
геометрических (углы, радиусы закруглений, длина) и
физических (электропроводность, диэл. проницаемость)



Проблемные зоны концевой муфты

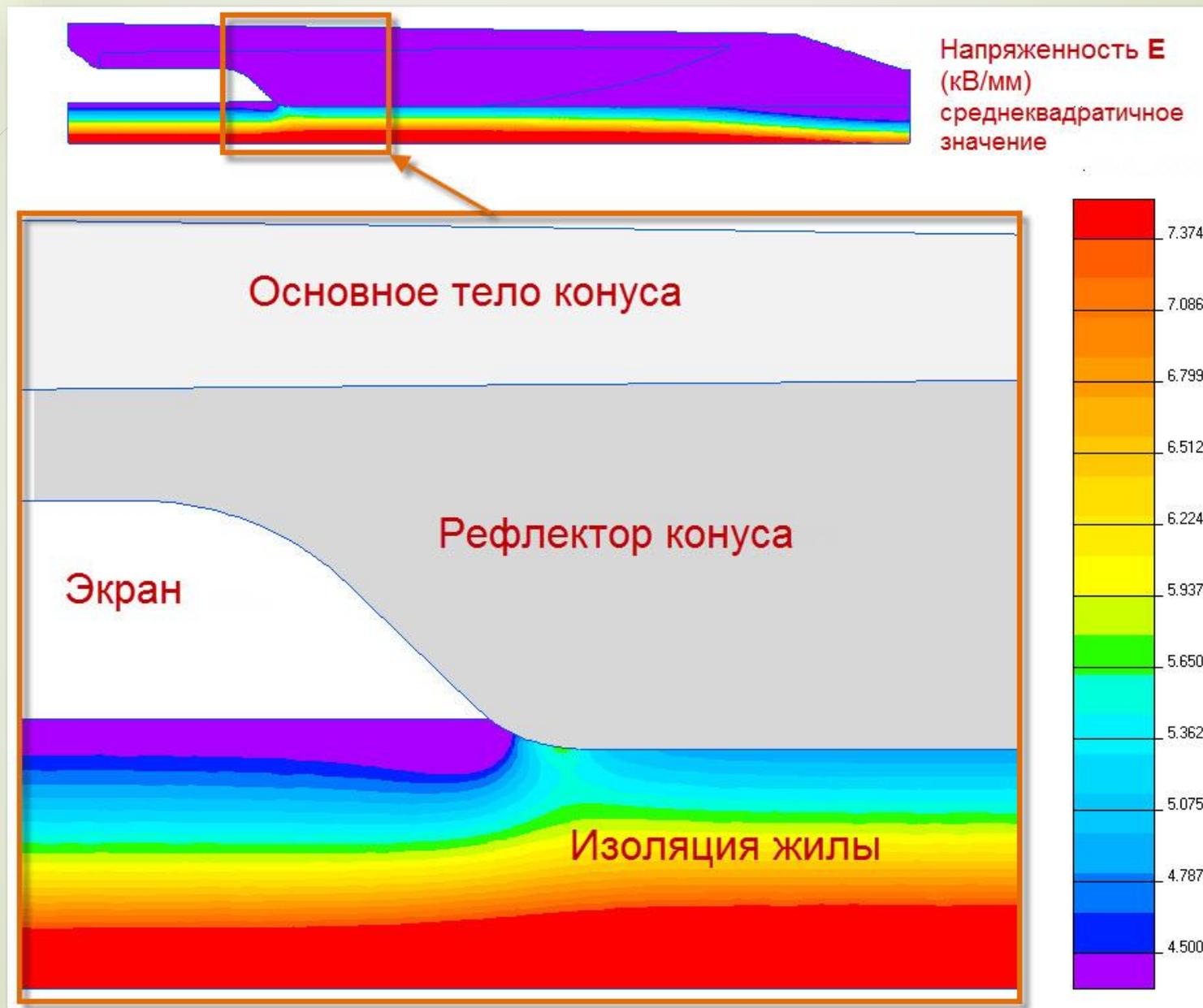
36

Проблемные зоны с точки зрения напряженности электрического поля: А, Б, В, Г



Задача 3: Электрическое поле в зоне А

37



Задача 3: Выводы

Найдены оптимальные параметры стресс-конуса концевой и соединительной кабельных муфт 110 кВ для кабелей с полиэтиленовой изоляцией.

Муфты изготовлены и в настоящий момент проходят ресурсные испытания.

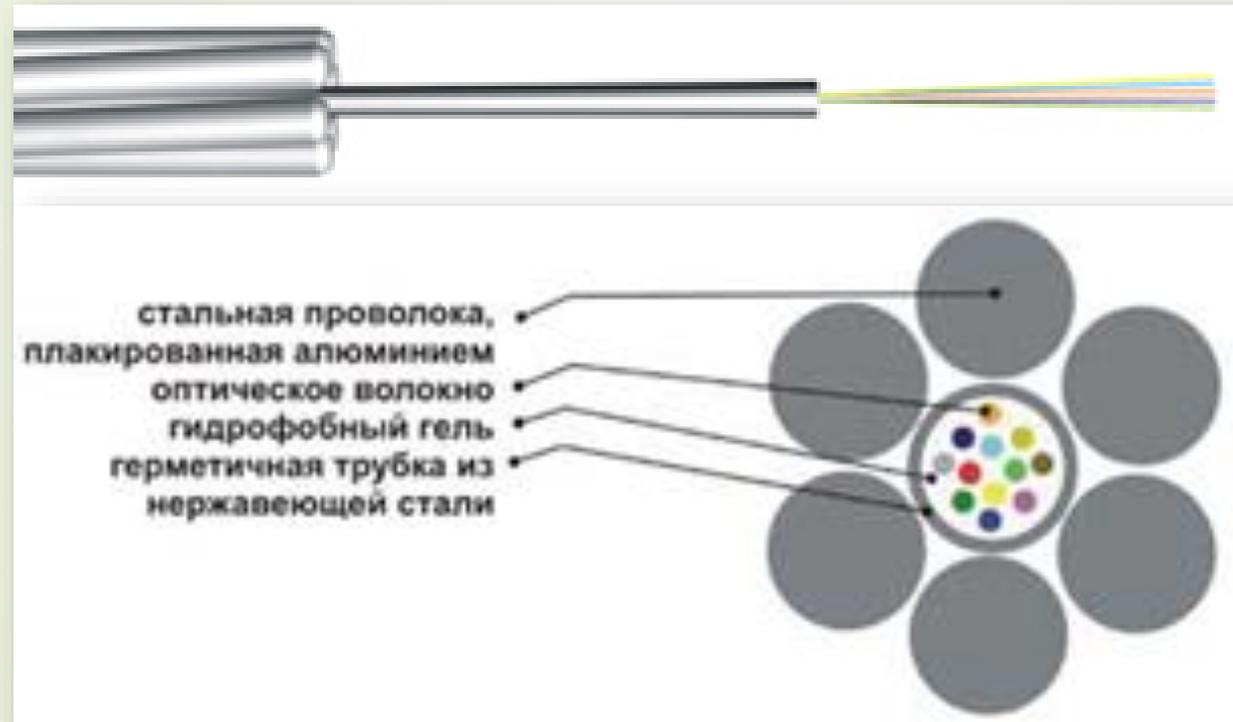
1. Оптимальное, отношение продольной (σ_x) к поперечной (σ_y) составляющей активной проводимости рефлектора находится в пределах $\sigma_x / \sigma_y = 10...12$.
Результаты расчёта в оптимальном случае дают значение $E_{\min} = 2,85$ кВ/мм.
2. Оптимальное значение относительной диэлектрической проницаемости материала основного изоляционного тела принимает значения из промежутка $\epsilon = 22...24$.
3. Оптимальное значение длины проекции рефлектора на ось кабеля находится в пределах $L = 85...120$ мм.
4. Оптимальное значение угла наклона касательной к начальному участку рефлектора стресс конуса $\varphi = 8...14^\circ$.

Заключение

1. Полевое моделирование предоставляет значительные преимущества при сложных и необычных условиях прокладки кабельных линий, в особенности при прокладке нескольких линий вблизи друг от друга.
2. Относительно несложное моделирование при помощи подходящей программы вооружает проектировщика исчерпывающей информацией для оценки и сопоставления проектных решений, при большей точности и меньших усилиях чем расчет по МЭК 60287.
3. Чем сложнее конструкция кабельной линии, тем больше эффект.
4. Попутно расчет дает полную картину внешнего магнитного поля исследуемой линии, что может быть полезно для оценки электромагнитной экологии

Стойкость грозотроса с оптоволоконным модулем к прямому удару молнии

Конструкция грозозащитного троса с одним оптическим модулем:



Основная задача грозотроса:

1. Проводить ток короткого замыкания;
2. Проводить токи, вызванные атмосферными перенапряжениями, прямыми и наведенными.

Особенности задачи. Этапы анализа

41

Этапы решения задачи:

1. Выбор формы и параметров токового импульса, моделирующего прямой удар молнии в грозотрос;
2. Расчет нестационарного магнитного поля, вызванного импульсом тока. Цель расчета - получение зависимости распределения плотности тока в каждом из проводников троса от времени.
3. Расчет нестационарного температурного поля, использующего в качестве источника джоулевы потери от нестационарного распределения плотности тока, найденного на предыдущем шаге.

Особенности:

- ✓ Мультифизический анализ – необходим обмен данными между электромагнитной и тепловой задачами;
- ✓ Выраженный эффект вытеснения и близости.
- ✓ Магнитное насыщение стальных проволок.
- ✓ Необходимость совмещения уравнений электромагнитного поля с уравнениями электрической цепи.
- ✓ Источником поля является импульс тока, который вычисляется как интеграл от плотности тока по сечению всех проволок

Расчетные гипотезы

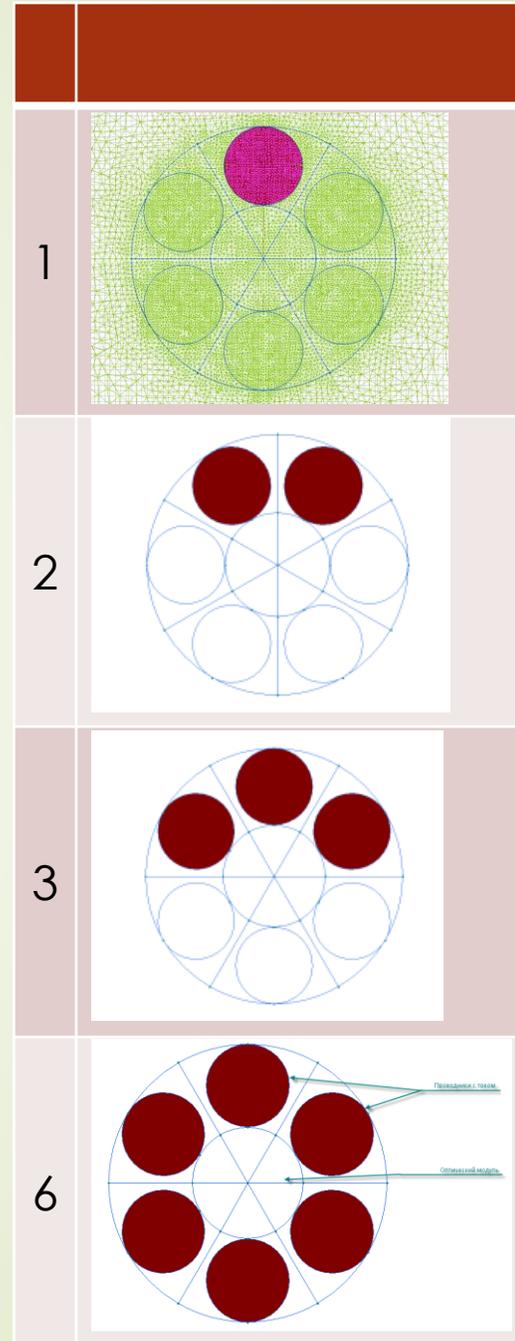
Разрушение двух проволок оптического грозотроса в результате прямого удара молнии*



Гипотеза:

Ток молнии течет по нескольким (одной, двум, трем) проволокам, а остальные несут обратный ток, играя роль демпфера

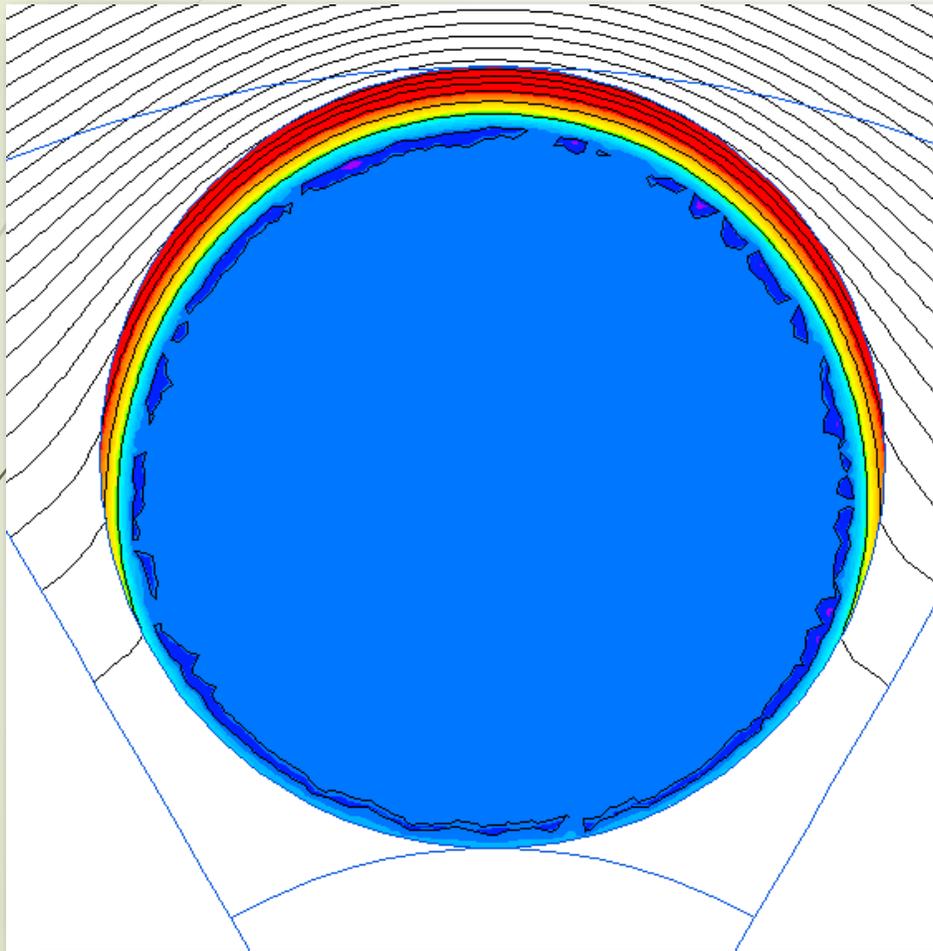
*Chisholm, W.A., J.P. Levine, Pon C.J., Jusevicius M. A.R. Progress in protecting power systems against impulse charge and continuing current effects of lightning flashes. IX International Symposium on Lightning Protection 26th-30th November 2007



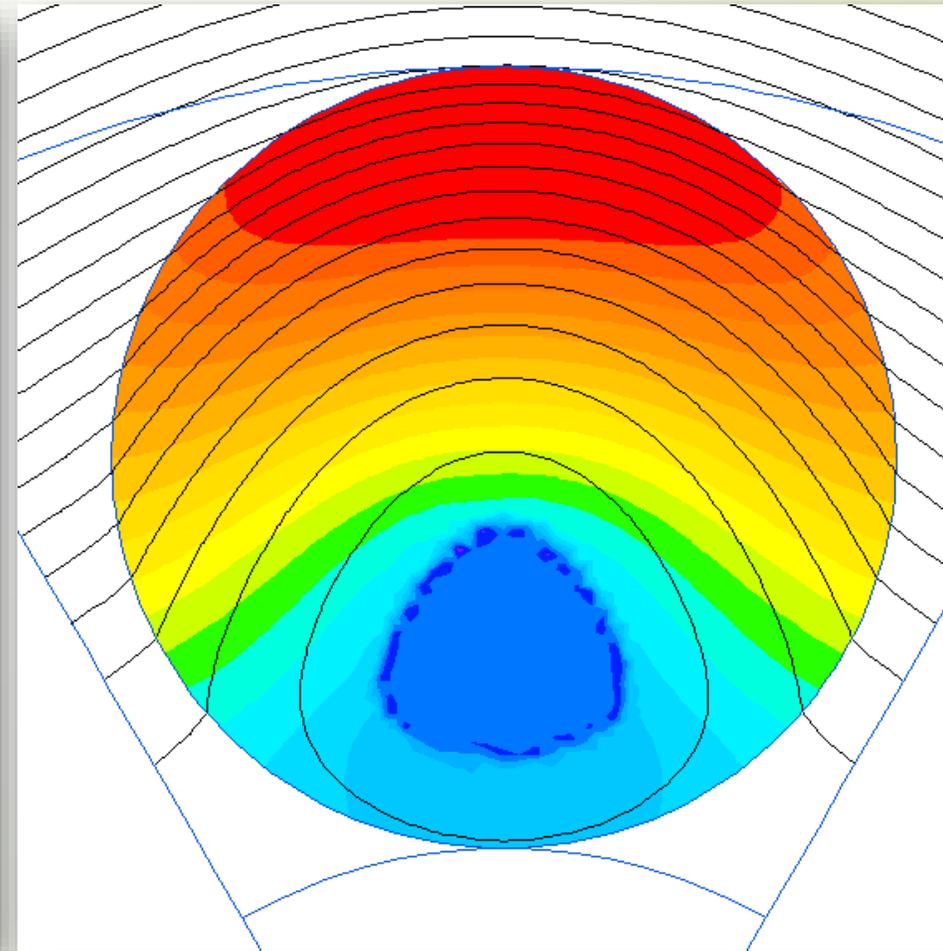
Расчет электромагнитного поля (6 проволок с током)

43

Картина плотности тока



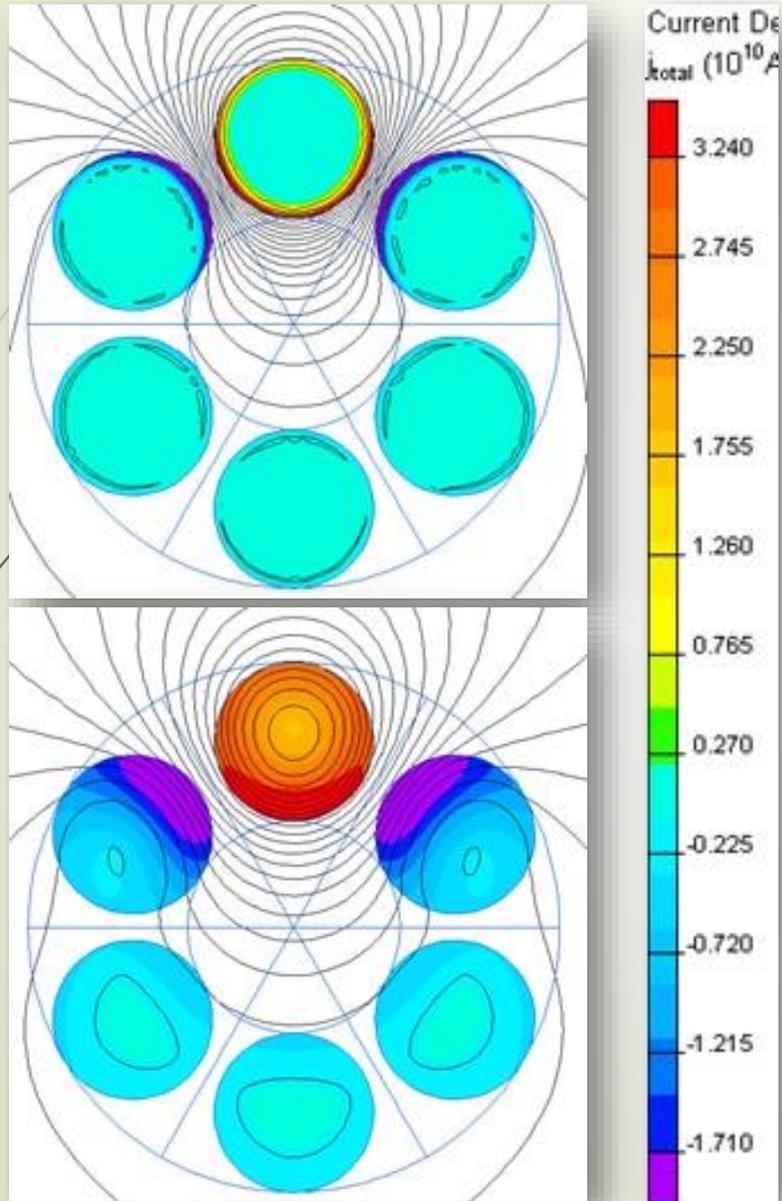
В начальной фазе импульса



В момент максимума тока

5. Расчет электромагнитного поля (1 проволока с током)

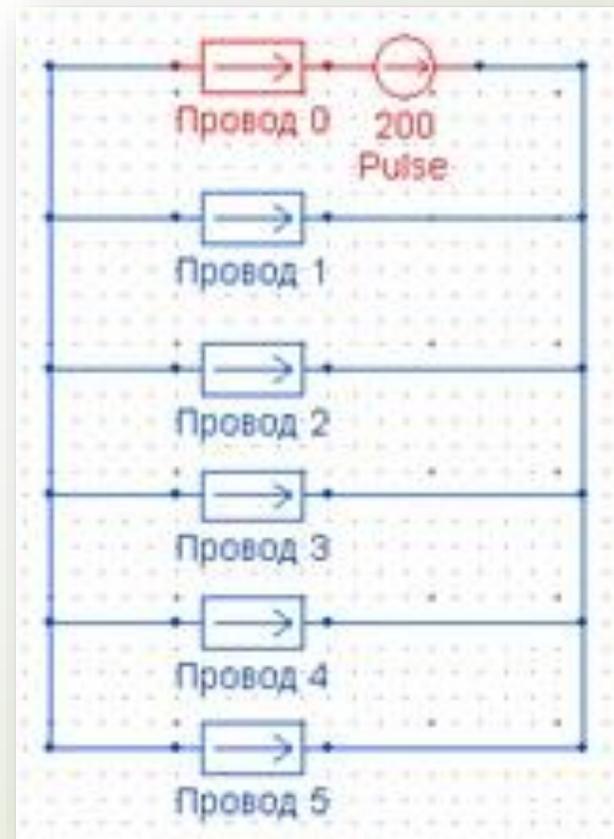
44



Гипотеза 1:

В первый момент после удара молнии весь ток сосредоточен в одной проволоке.

Остальные включены параллельно с первой и играют роль обратного провода



Выводы по расчету оптического грозотроса

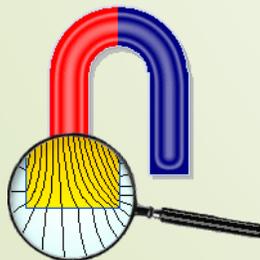
1. Предложена методика мультифизического анализа электромагнитного и температурного состояния троса при прямом ударе молнии, которая учитывает особенности физического процесса: форма импульса тока, эффекты вытеснения и близости, насыщение стальных проволок, реальную геометрию проводников.
2. Проведено сравнение результатов моделирования со стандартным грозовым импульсом 1.2/50 мкс и импульсом SAE 3.5/70 мкс. Показано, что на тепловое состояние влияет как крутизна переднего фронта, так и длина импульса, причем влияние различно для разных гипотез о распределении тока по проволокам. В целом, обе формы импульса пригодны для анализа.
3. Численное моделирование показывает, что исследованный кабель простой конструкции, с одним оптическим элементом и шестью проволоками в одном повиве, не выдерживает прямого удара молнии максимальной силы.

Спасибо за внимание!

46

- Эту презентацию и примеры решенных задач можно найти здесь:
elektro2017.elcut.ru
- Бесплатную Студенческую версию ELCUT для просмотра примеров и первого знакомства можно загрузить здесь:
http://elcut.ru/free_soft_r.htm
- Связаться с докладчиком: simon@tor.ru

Искренне ваши:



ELCUT

Новый подход к
моделированию полей



ПОЛИТЕХ

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



®

СЕВКАБЕЛЬ
ГРУППА КОМПАНИЙ