

Четырехпроводный силовой электрический кабель

Когда Вы откроете этот документ, Microsoft Word может спросить, разрешить ли выполнение макросов в документе Cable.doc (Enable Macros / Disable Macros). Всегда отвечайте "Разрешить макросы" (Enable Macros), чтобы иметь возможность запускать встроенную программу. Если Вы не увидели этого вопроса, вероятно, уровень безопасности, выбранный в настройках Microsoft Word, отличается от среднего (Medium).

За дальнейшей информацией о настройках безопасности Microsoft Word обращайтесь к справочной системе Microsoft Office, раздел "Защита от документов, которые могут содержать вирусы" ("Protection from documents that might contain viruses").

Введение

При помощи технологии ActiveField ELCUT может с успехом использоваться для анализа инженерных систем с разных точек зрения – магнитной, электрической, тепловой, прочностной. Эти взаимосвязанные виды анализа могут быть автоматизированы для конкретной технической системы. Пример, предлагаемый Вашему вниманию, посвящен всестороннему анализу четырехпроводного силового электрического кабеля. Это документ Microsoft Word, который содержит текстовое описание задачи, таблицы исходных данных, перечень результатов в табличной и графической формах, а также набор макросов на встроенном языке Visual Basic for Applications (VBA). Макросы обеспечивают полностью автоматическое построение геометрической модели, сетки конечных элементов, решение нескольких серий задач разных типов, а также взаимодействие с Microsoft Word.

Если Вы знакомы с языком Visual Basic – мы приглашаем Вас изучить текст встроенных макросов.

Документ содержит результаты анализа, основывающегося на заданных исходных параметрах. Содержащиеся в нем таблицы, картинки и графики сформированы в результате автоматического расчета профессиональной версией ELCUT под управлением макросов, содержащихся в этом документе. Если Вы - обладатель профессиональной версии ELCUT, то Вы сами можете изменять входные параметры и проводить вычисления. Если в вашем распоряжении только студенческая версия ELCUT, то Вы можете просматривать результаты решенных задач ELCUT, которые доступны на нашем сайте http://elcut.ru/advanced/cable_r.htm.

Кроме введения, документ имеет пять разделов.

- Раздел 1 содержит общее описание задачи.
- Раздел 2 состоит из нескольких таблиц исходных данных, в которые Вы можете вводить свои значения параметров.
- Раздел 3 состоит всего лишь из двух кнопок – одна для запуска процесса решения, а другая – для очистки старых результатов.
- Раздел 4 содержит автоматически формируемые результаты расчета в табличной форме
- Раздел 5 – относящиеся к задачам картинки поля и графики.

После того, как Вы заполните таблицы исходных данных в разделе 2 (или воспользуетесь значениями по умолчанию), нажмите кнопку **Решить**. В ответ запустится VBA макрос, который сделает следующее:

1. Проверит корректность введенных данных.
2. Запустит ELCUT (для этого в Вашей системе должна быть установлена профессиональная версия ELCUT).
3. Создаст папку, в которую будут помещены автоматически сгенерированные задачи ELCUT.
4. Построит геометрическую модель четырехжильного кабеля.
5. Задаст физические свойства каждой из задач.
6. Запустит процесс решения задач.
7. По завершении решения извлечет из него необходимые результаты.
8. Вставит числовые и графические результаты в текстовый документ.

Раздел 1. Описание модели.

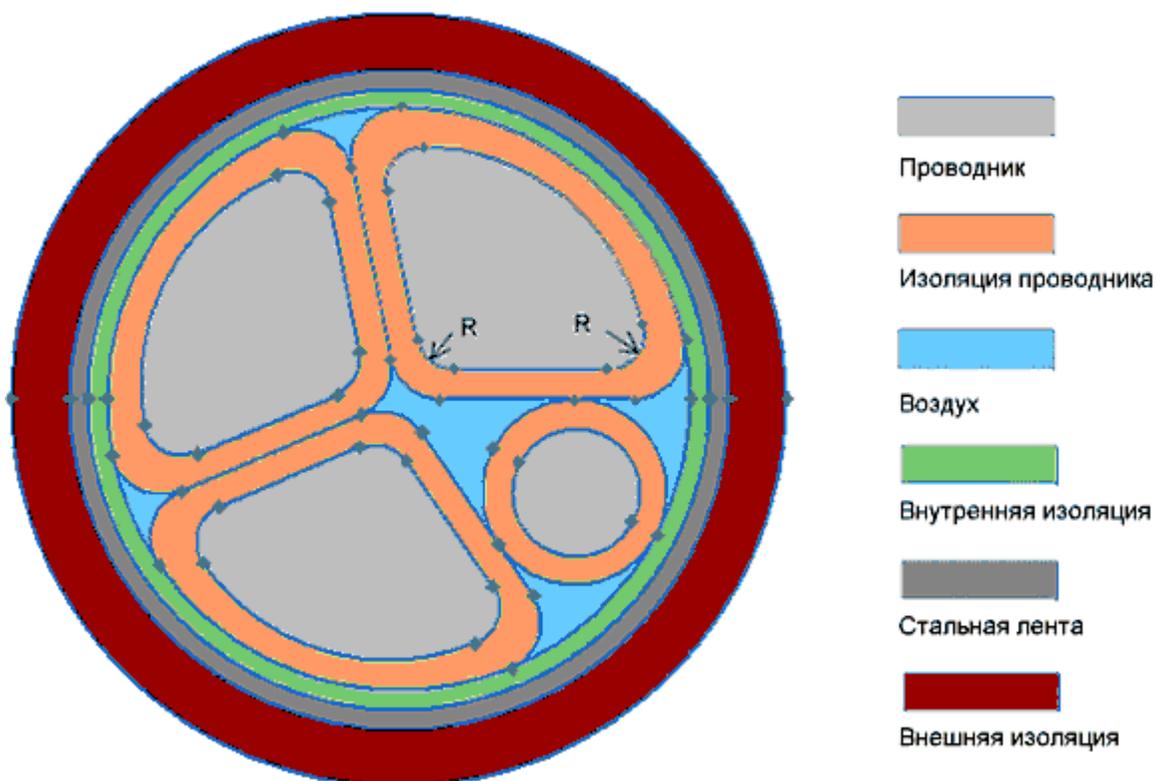


Рис 1. Эскиз поперечного сечения кабеля .

Высоковольтный четырехпроводный кабель состоит из трех фазных проводников и одного нулевого. Фазный проводник в сечении имеет форму треугольника со скругленными углами, а нулевой проводник – круглое сечение. Все проводники алюминиевые, изолированные. Кабель в целом имеет трехслойную изоляцию – внутренняя электрическая изоляция, затем защитный слой стальной ленты и внешняя защитная изоляция. Свободное пространство между изолированными проводниками заполнено диэлектриком, в роли которого может быть и воздух.

На практике часто требуется спроектировать кабель по заданному сечению фазных проводников. Параметры сечения проводников задаются в таблице 1. Таблицы 2 - 7 описывают другие входные данные. Заметьте, что все результаты расчета, числовые и графические, устаревают, как только Вы измените значение какого-либо исходного параметра.

Замечание:

При вводе исходных данных следует вводить или изменять только числовое значение, не трогая название и размерность.

Раздел 2. Исходные данные.

При вводе данных в качестве десятичного разделителя следует использовать точку (не запятую), иначе данные будут считаны и поняты неверно.

Таблица 1. Геометрические размеры проводников.

Сечение фазного провода	120 мм ² .
Сечение нулевого провода	35 мм ² .
Радиус скругления проводника (R)	2 мм.

Таблица 2. Геометрические параметры изоляции.

Толщина фазовой изоляции	2 мм.
Толщина внутреннего слоя изоляции кабеля	1 мм.
Толщина стальной ленты	1 мм.
Толщина внешнего слоя изоляции кабеля	3 мм.

Таблица 3. Точность расчета.

Точность вычисления площади	0.001 мм ² .
-----------------------------	-------------------------

Таблица 4. Электрическая нагрузка.

Амплитуда фазного тока	200 А.
Амплитуда фазного напряжения	6500 В.
Частота тока	50 Гц.
Фазовый угол тока	0 град.

Таблица 5. Физические свойства проводника.

Относительная магнитная проницаемость	1
Электрическая проводимость	36000000 См/м.
Теплопроводность	140 Вт/К·м.
Модуль Юнга	6.9e+10 Н/м ² .
Коэффициент Пуассона	0.33
Коэффициент теплового расширения	2.33e-5 1/К
Плотность материала	2700 кг/м ³

Таблица 6. Физические свойства стального экрана.

Относительная магнитная проницаемость	1000
Электрическая проводимость	6000000 См/м.
Теплопроводность	85 Вт/К·м.
Модуль Юнга	2e+11 Н/м ² .
Коэффициент Пуассона	0.3
Коэффициент теплового расширения	0.000012 1/К
Плотность материала	7870 кг/м ³

Таблица 7. Физические свойства изоляции.

	Проводниковая	Внутренняя	Внешняя	
Относительная магнитная проницаемость	1	1	1	
Электрическая проводимость	0	0	0	См/м.
Диэлектрическая проницаемость	2.5	2.5	2.5	
Теплопроводность	0.04	0.04	0.04	Вт/К·м.
Модуль Юнга	10000000	10000000	10000000	Н/м ² .
Коэффициент Пуассона	0.3	0.3	0.3	
Коэффициент теплового расширения	0.0001	0.0001	0.0001	1/К
Плотность материала	900	900	1050	кг/м ³

Раздел 3. Кнопка “Решить”.

Нажмите кнопку ‘Решить’, чтобы построить модель и решить задачу.

Используйте кнопку ‘Стереть результаты’, чтобы удалить из документа устаревшие результаты решения.

Решить

Стереть результаты

Раздел 4. Результаты анализа кабеля.

Таблица 8 представляет результаты геометрических характеристик кабеля по введенным исходным данным.

Геометрические характеристики

Внешний диаметр кабеля рассчитывается с учетом геометрических размеров проводников и изоляции, введенных в таблицах 1 и 2. Для расчета плотности и погонной массы используются вычисленные площади сечений и плотности материалов.

Таблица 8. Физические параметры кабеля

Внешний диаметр кабеля	4.28e+01	мм
Вес (на метр длины)	2.74e+00	кг
Средняя плотность кабеля	1.90e+03	кг/м ³

Электростатические параметры

Расчет электростатического поля выполняется для определения собственных и взаимных частичных емкостей проводников. Результаты вычислений сведены в таблицу “Емкость проводников” (см. ниже). Значения емкости вычисляются в ходе анализа решения электростатических задач с использованием следующего подхода:

Каждой строке таблицы соответствует решение одной задачи ELCUT. В каждой такой задаче одному из проводников сообщается единичный заряд. После решения на всех проводниках измеряется наведенный потенциал, и частичные емкости проводников вычисляются по формуле:

$$C_{ij} = U_j / Q_i,$$

где Q_i – заданный заряд на проводнике (i – номер строки в таблице),

U_j – наведенный потенциал на этом и других проводниках.

Собственная емкость проводника вычисляется как отношение его заряда к наведенному на нем самом потенциалу.

Таблица 9. Емкость проводников, Ф

	Проводник 1	Проводник 2	Проводник 3	Нулевой провод
Проводник 1	2.53e-10	1.02e-09	1.95e-09	8.42e-10
Проводник 2	1.02e-09	2.67e-10	1.02e-09	1.88e-09
Проводник 3	1.95e-09	1.02e-09	2.53e-10	8.42e-10
Нулевой провод	8.42e-10	1.88e-09	8.42e-10	1.28e-10

Магнитные параметры

После решения четырех задач электростатики начинается решение задач магнитного поля постоянных токов и магнитного поля переменных токов. Его целью является определение собственных и взаимных индуктивностей проводников на постоянном и переменном токе, а также омического сопротивления на переменном токе с учетом поверхностного эффекта.

Результаты расчета индуктивностей приведены в таблице 10. Мгновенные значения токов в фазных проводниках задаются в соответствии с фазовым углом, заданным в таблице 4. Значения в левой половине таблицы (колонки 2-5) вычислены на постоянном токе, а в правой половине (колонки 6-9) – на переменном токе заданной частоты (по умолчанию 50 Гц). Для вычисления взаимных и собственных индуктивностей использовался подход, основанный на потокосцеплениях:

$$L_{i,j} = \Phi_j / I_i,$$

где Φ_i – потокосцепление с i -ым проводником,

I_i – ток, создающий магнитное поле.

Каждой строке таблицы соответствует отдельная задача расчета магнитного поля, в которой в качестве источника задан ток только в одном из проводников, а все остальные – обесточены.

Диагональные элементы таблицы содержат собственные индуктивности проводников, а внедиагональные – взаимные индуктивности.

Таблица 10. Индуктивности проводников на постоянном и переменном токе

	На постоянном токе				На переменном токе			
	Пров.1	Пров.1	Пров.1	Нуль. пров.	Пров.1	Пров.1	Пров.1	Нуль. пров.
Провод 1	1.15e-05	1.12e-05	1.11e-05	1.13e-05	6.17e-06	5.99e-06	5.94e-06	6.02e-06
Провод 2	1.12e-05	1.15e-05	1.12e-05	1.11e-05	5.99e-06	6.17e-06	5.99e-06	5.93e-06
Провод 3	1.11e-05	1.12e-05	1.15e-05	1.13e-05	5.94e-06	5.99e-06	6.17e-06	6.02e-06
Нулевой провод	3.89e-10	3.84e-10	3.89e-10	4.04e-10	6.02e-06	5.93e-06	6.02e-06	6.27e-06

Решение задач магнитного поля переменных токов позволяет также вычислить импеданс каждого проводника, который может быть использован для альтернативной оценки индуктивности и для вычисления активного сопротивления на переменном токе.

Импедансы отдельных проводников и соответствующие им активные сопротивления на постоянном токе сведены в таблицу 11.

На постоянном токе активное сопротивление проводника легко вычисляется через геометрические размеры сечения и электропроводность материала как:

$$R = l / \rho \cdot S,$$

где ρ – удельное сопротивление проводника,

S – площадь поперечного сечения,

l – длина ($= 1$ м)

Мощность джоулевых потерь на постоянном токе вычисляется как:

$$P = I^2 \cdot R.$$

Импеданс проводника на переменном токе вычисляется на основе закона Ома как отношение комплексного значения напряжения, приложенного к концам проводника, к комплексному значению полного тока в нем. Действительная часть этого отношения представляет собой активное сопротивление проводника на переменном токе (с учетом эффекта вытеснения и эффекта близости), а мнимая часть – индуктивное сопротивление. Мощность джоулевых потерь в проводнике на переменном токе вычисляется внутри ELCUT по формуле:

$$P = \int (j^2 \cdot \rho) ds,$$

где j – плотность тока, а интегрирование выполняется по сечению проводника.

Таблица 11. Импеданс проводников.

	На постоянном токе		На переменном токе		
	Фазный провод	Нулевой провод	Пров. 1	Пров. 2	Пров. 3
Импеданс, Ом	2.31e-04	7.94e-04	2.40e-04	2.55e-04	2.80e-04
Сопротивление, Ом	2.31e-04	7.94e-04	2.15e-04	2.37e-04	2.59e-04
Активное сопротивление, Ом	0.00e+00	0.00e+00	1.08e-04	9.41e-05	1.06e-04
Мощность потерь, Вт	4.63e+00	0.00e+00	4.71e+00	4.74e+00	4.71e+00

Тепловые параметры

Распределение плотности тока по сечению проводников, вычисленное в задаче магнитного поля переменных токов, передается в качестве источника тепла в задачу расчета температурного поля.

Результаты теплового расчета приводятся в таблице 12. Это средняя температура на наружной поверхности кабеля и поток тепла с этой поверхности в окружающую среду, а также средние значения температуры по сечению каждого из проводников. Приведенные в таблице значения температур вычислены в предположении, что температура окружающей среды = 20 °С.

Таблица 12. Тепловые параметры кабеля

Средняя температура внешней поверхности кабеля		2.35e+01	°С
Поток тепла в окружающее пространство		1.42e+01	Вт
Средняя температура проводника, °С			
Провод 1	Провод 2	Провод 3	Нулевой провод
4.59e+01	4.68e+01	4.59e+01	3.93e+01

Механические параметры

Анализ упруго-деформированного напряженного состояния элементов кабеля выполняется с учетом его теплового состояния, рассчитанного ранее. Также принимаются во внимание силы магнитного взаимодействия проводников друг с другом, которые, в свою очередь, рассчитаны при расчете магнитного поля переменных токов. Механические напряжения в элементах кабеля развиваются вследствие термических деформаций и магнитных сил. Результаты расчета приведены в таблице 13.

Таблица 13. Механические характеристики

Наибольшее перемещение	3.58e-02	мм
Максимальное значение критерия прочности по Мору	4.12e+06	Н/м ²

Прочие величины

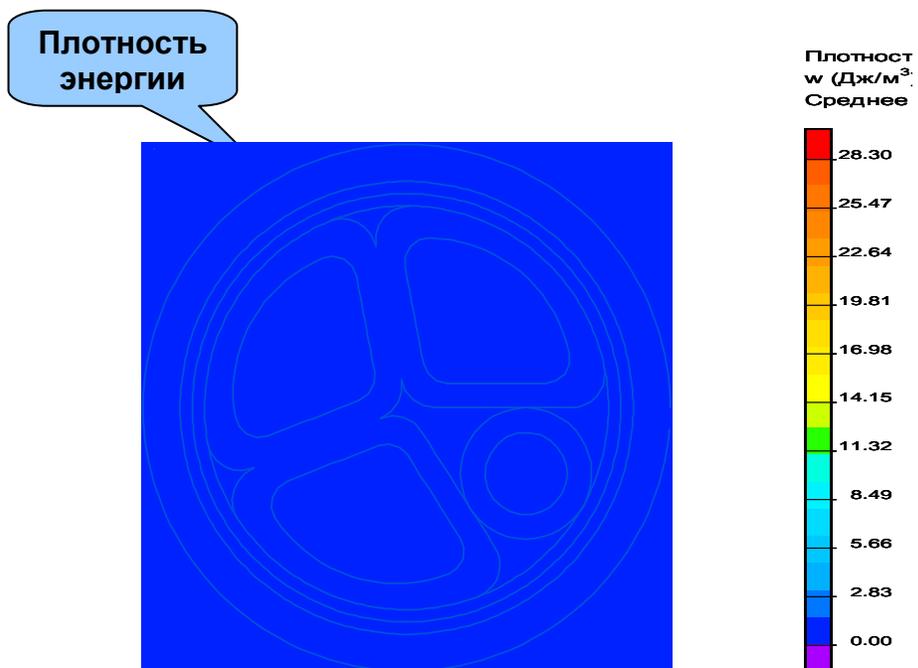
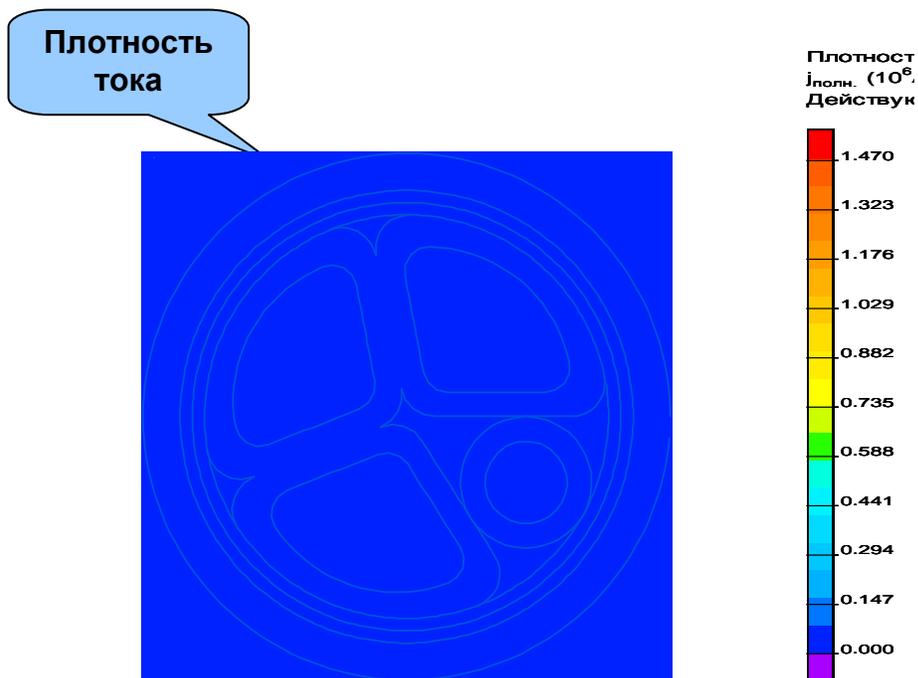
При анализе электрической прочности изоляционных систем кабеля, необходимо знать максимальное значение напряженности электрического поля

Таблица 14. Напряженность электрического поля.

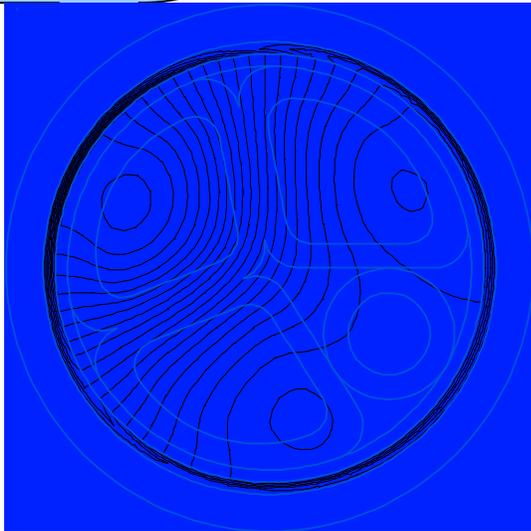
Максимальная напряженность в сечении	8.79e+03	А/м
--------------------------------------	----------	-----

Раздел 5. Картина поля.

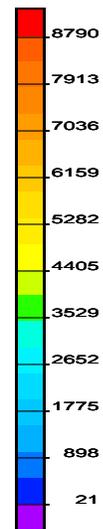
В этом разделе приводятся картины распределения напряженности электрического поля, плотности тока (с учетом вихревых токов), плотности энергии магнитного поля, мгновенного значения магнитной индукции на переменном токе, распределения температуры по сечению проводника и механического перемещения под действием термических деформаций и магнитных усилий.



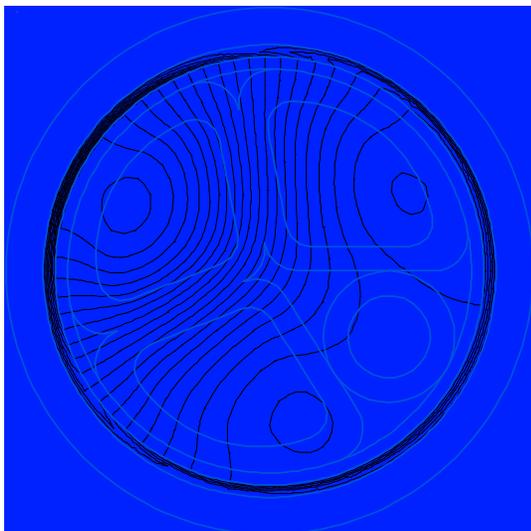
Напряженность



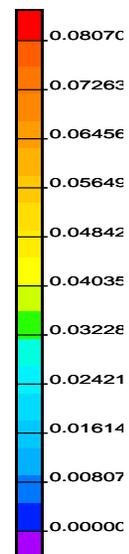
Напряже
H (A/м)
Максима



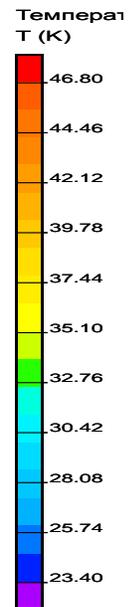
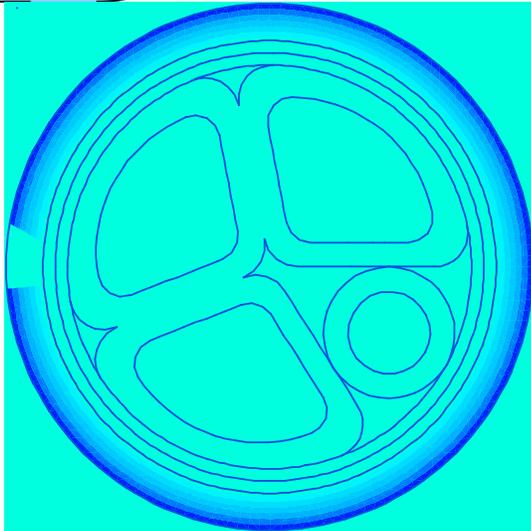
Магнитная
индукция



Индукция
B (Тл)
Для фазь



Температура



Смещение

