

УДК 621.313

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ТОКОВ СИЛОВЫХ ЧЕТЫРЕХЖИЛЬНЫХ КАБЕЛЕЙ ДО 1 кВ ПРИ ПИТАНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ В ПРОГРАММЕ ELCUT

Ю. А. РУДЧЕНКО

*Учреждение образования «Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Ключевые слова: высшие гармоники тока, дополнительный нагрев кабелей, определение длительно допустимых токов, программа Elcut, выбор сечения кабелей.

Введение

Допустимая длительно токовая нагрузка – одна из основных характеристик, по которой выбирают силовой кабель напряжением до 1 кВ. Значения длительно допустимых токов приводятся в соответствующих НТПА [1] для стандартных, наиболее часто встречаемых условий эксплуатации кабелей.

Если условия прокладки кабелей отличаются от типовых, длительно допустимый ток можно определить, воспользовавшись методикой, приведенной в ГОСТ МЭК 60287–2009. Данный стандарт приводит методы расчета допустимых токовых нагрузок кабелей по значениям максимально допустимой температуры, электрического сопротивления токопроводящей жилы, потерь и тепловых удельных сопротивлений. Формулы, приведенные в указанном ГОСТе, позволяют учитывать конструктивные особенности кабеля, условия окружающей среды, а также запас надежности работы кабеля. Номинальную токовую нагрузку четырехжильного кабеля на низкое напряжение рекомендуется принимать равной номинальной токовой нагрузке трехжильного кабеля на то же напряжение, с тем же размером жил и аналогичной конструкции, при условии, что кабель будет использоваться в трехфазной системе, в которой четвертая жила является нейтральным либо защитным проводником. В случае нейтрального проводника номинальная токовая нагрузка относится к симметричной нагрузке.

При протекании по жилам кабеля синусоидального тока и симметричной нагрузке потребителя, условия, указанные в ГОСТ МЭК 60287–2009, выполняются и стандарт можно применять для расчета допустимой токовой нагрузки. Однако при питании потребителей с нелинейной нагрузкой дополнительный нагрев четырехжильных кабелей может возникнуть даже при симметричной нагрузке [2], [4], [9]. Если не учитывать это на этапе проектирования, то сечение кабеля может быть выбрано ошибочно заниженным по условию его допустимого нагрева.

Известны работы по определению нагрева силовых кабелей при протекании по ним синусоидальных токов промышленной частоты. Расчеты проводятся, как правило, в специализированных программах, таких, как Ansys [7], Matlab [5], Elcut [6], [8]. Определить предельно допустимые токи силовых четырехжильных кабелей напряжением до 1 кВ при питании потребителей с нелинейной нагрузкой можно с помощью полевых расчетов, например, методом конечных элементов, также с применением специализированных компьютерных программ.

Цель работы заключается в разработке алгоритма определения длительно допустимой токовой нагрузки силовых четырехжильных кабелей до 1 кВ при питании потребителей с нелинейной нагрузкой в программе Elcut.

Основная часть

Выбор данной программы обусловлен наличием в свободном доступе ее бесплатной версии – «ELCUT Студенческий», имеющей ограничение на число узлов сетки конечных элементов. Несмотря на эти ограничения, «ELCUT Студенческий» вполне можно использовать не только для обучения, но и для расчета простых задач, а также для оценочных инженерных расчетов. Для отработки процедуры определения допустимых токов бесплатная версия программы Elcut вполне подходит, однако на практике, когда требуется высокая точность расчетов, рекомендуется использовать полную версию программы – «ELCUT Профессиональный».

Определение допустимого длительного тока кабеля в программе Elcut является обратной задачей совместного расчета теплового и магнитного полей кабеля. Обратная задача решается путем перебора решений нескольких прямых задач до тех пор, пока не будет выполнено условие соблюдения температурного режима работы кабеля, т. е. когда температура поверхности жилы при искомой токовой нагрузке не будет равна величине предельно допустимой температуры жил кабеля.

Решение прямой задачи в программе Elcut можно выполнить в два этапа:

1. Расчет мощности тепловыделения в металлических элементах кабеля (жилах, металлической оболочке, экране, броне) путем решения задачи магнитного поля.
2. Определение температуры элементов кабеля решением задачи стационарной теплопередачи.

Для определения температуры нагрева кабеля при протекании по жилам синусоидальных токов в программе Elcut совместно решаются задачи магнитного поля переменных токов и стационарной теплопередачи. При совместном решении задач данные о мощности тепловыделения, полученные в результате расчета магнитного поля, автоматически подставляются в задачу стационарной теплопередачи, что существенно сокращает общее время проведения расчетов.

При передаче по кабелю электроэнергии к потребителю, имеющему нелинейную нагрузку, синусоидальность токов в жилах кабеля искажается. Использовать для определения мощности тепловыделения задачу магнитного поля переменных токов в этом случае нельзя. Для определения в программе Elcut мощности тепловыделения в металлических элементах кабеля требуется решить задачу магнитного нестационарного поля. Далее данные о мощности тепловыделения требуется экспортировать из Elcut в любой математический редактор, например, Excel, где вычисляются средние значения мощности, а также объемная плотность тепловыделения. Эти данные далее используются в качестве исходных в задаче стационарной теплопередачи для расчета теплового поля кабеля.

Рассмотрим процедуру расчета в программе Elcut длительно допустимого тока четырехжильного кабеля марки АВБШв (4×120) при питании потребителя с нелинейной нагрузкой, если спектральный состав тока, протекающего по жилам кабеля, известен (табл. 1).

Таблица 1

Спектральный состав тока потребителя
(коэффициенты гармонических составляющих тока, $K_{I(n)\%}$)

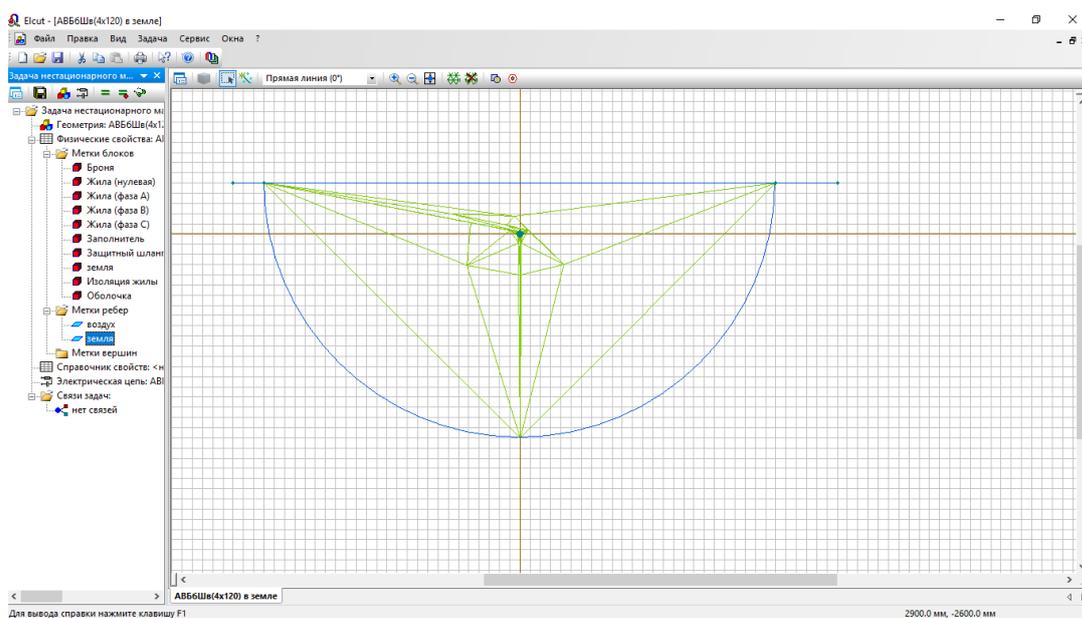
Номер гармоники	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$K_{I(n)\%}$	100	29,3	13,9	10,2	15,2	9,5	8,2	3,9	4,6	2,2	1,4

Примечание. Данные о спектральном составе тока характерны для потребления электроэнергии административным зданием [3].

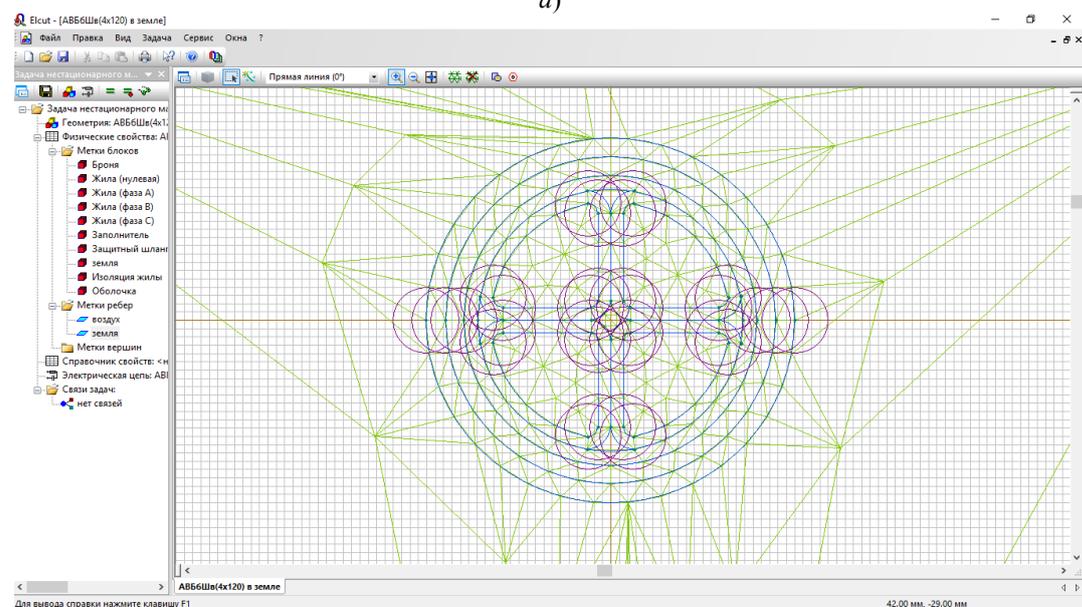
На первом этапе в программе Elcut создается новая задача, в окне свойств задачи выбирается ее тип и класс модели. В качестве типа задачи выбираем задачу нестациона-

нарного магнитного поля, которая позволяет рассчитывать поле, возбужденное токами произвольной формы. Класс модели принимаем плоскопараллельным, это значит, что геометрия модели, граничные условия, источники поля, свойства материалов и, следовательно, рассчитанное поле, зависят от координат X и Y (изменяются в пределах сечения кабеля), но не зависят от координаты Z (неизменны по длине кабеля).

Далее выполняем построение геометрической модели во встроенном графическом редакторе, либо импортируем готовый чертеж из файла в формате DXF, который можно создать с помощью любой из распространенных систем автоматизированного проектирования. С помощью меток устанавливаем соответствие между геометрическими элементами модели и приписанными им свойствами материалов. После описания геометрии модели проводим построение конечно-элементной сетки (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Геометрическая модель кабеля марки АВБШв (4 × 120) при его прокладке в земле, созданная во встроенном графическом редакторе Elcut: а – общий вид модели; б – модель кабеля марки АВБШв (фрагмент геометрической модели)

После подготовки геометрической модели задаем физические свойства материалов элементов модели (табл. 2), граничные условия и источники поля (рис. 2).

Таблица 2

Физические свойства материалов элементов модели

Элемент модели	Броня	Жилы	Изоляция	Оболочка	Защитный покров	Земля
Относительная магнитная проницаемость	100	1	1	1	1	1
Электропроводность, См/м · 10 ⁶	7,69	37	0	0	0	0

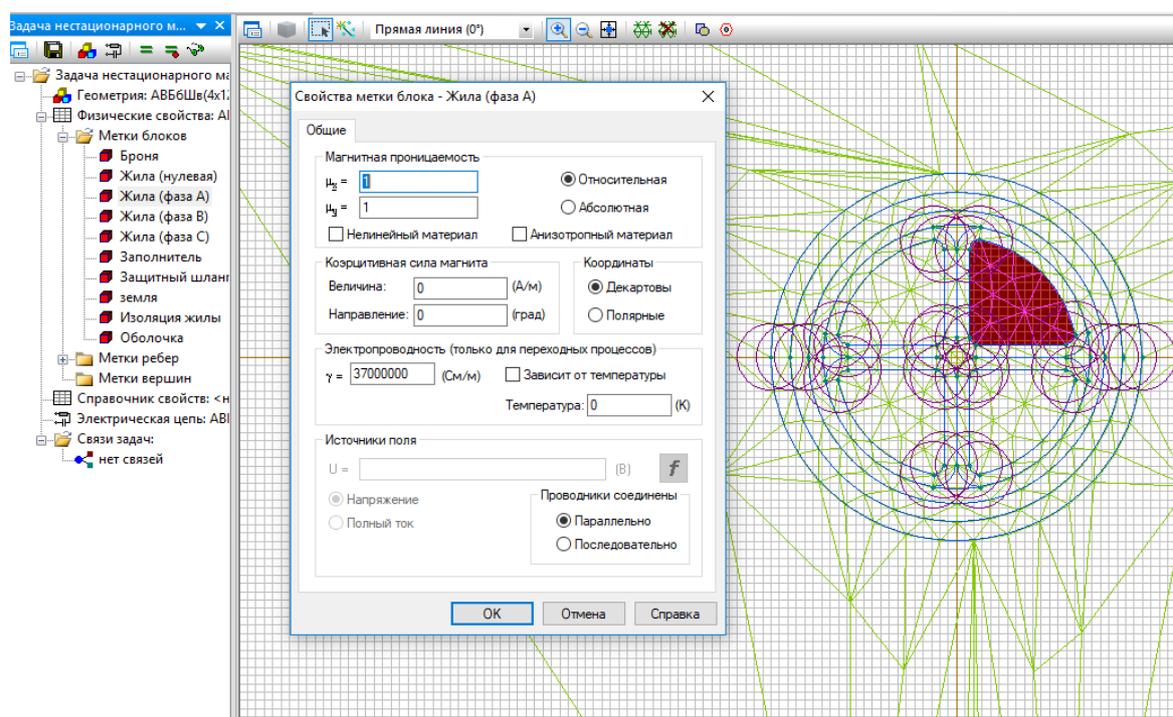


Рис. 2. Окно задания физических свойств жилы кабеля

В качестве граничных условий при решении задачи нестационарного магнитного поля задаем нулевое значение магнитного потенциала на поверхности земли, ограничивающей область расчета в объеме земли, и на границе раздела сред «земля–воздух».

Выполняем формирование электрической цепи, присоединенной к полевой задаче, во встроенном редакторе Elcut (рис. 3). Электрическая цепь состоит из трех источников тока, а также блоков геометрической модели Elcut (четыре жилы кабеля и броня).

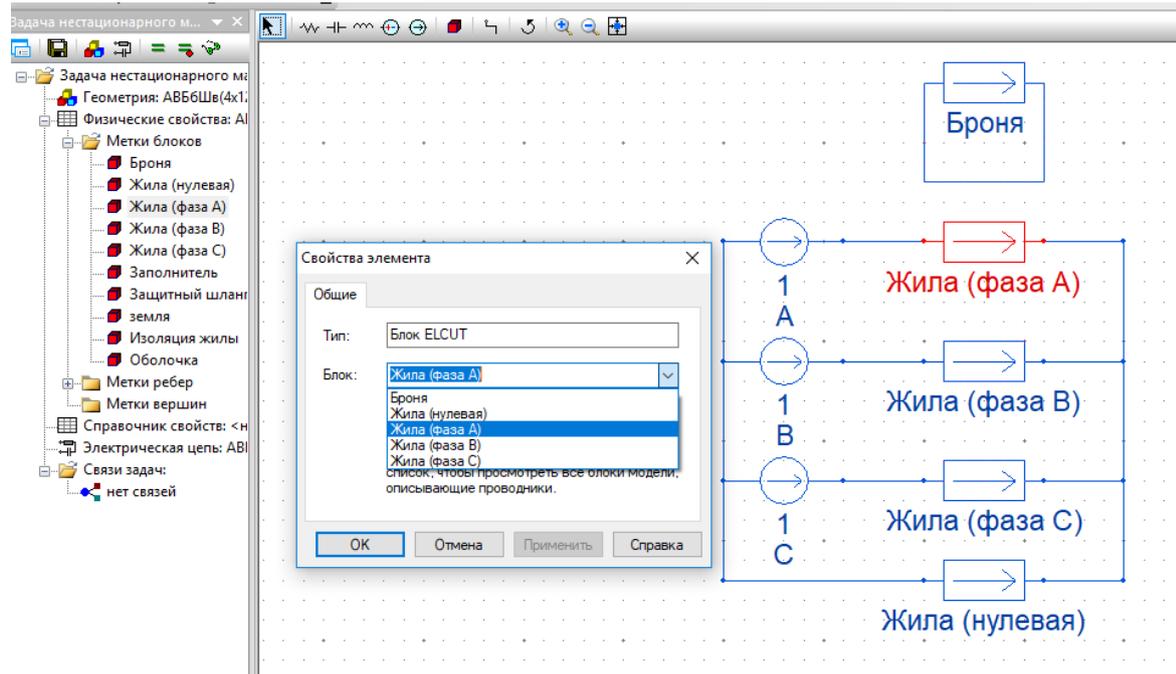


Рис. 3. Формирование электрической цепи Elcut

В окне задания параметров источников питания задаем несинусоидальные токи в фазных жилах кабеля в следующем виде:

$$i_A = \sqrt{2}I_{(1)} \sum_{n=1,3,\dots}^{15} \frac{K_{I(n)\%}}{100} \sin(n \cdot 314t);$$

$$i_B = \sqrt{2}I_{(1)} \sum_{n=1,3,\dots}^{15} \frac{K_{I(n)\%}}{100} \sin(n(314t - 120));$$

$$i_C = \sqrt{2}I_{(1)} \sum_{n=1,3,\dots}^{15} \frac{K_{I(n)\%}}{100} \sin(n(314t + 120)),$$

где $I_{(1)}$ – действующее значение тока на первой гармонике; n – номер гармоники.

Первоначально, действующее значение тока на первой гармонике $I_{(1)}$ задаем таким, чтобы действующее значение несинусоидального тока было равно длительно допустимому току кабеля в соответствии с [1]. Для длительно допустимого тока кабеля марки АВБбШв (4×120) при его прокладке в земле, равного $0,92 \cdot 295 = 271,4$ А, значение $I_{(1)}$ с учетом спектрального состава, приведенного в табл. 1, будет равно 252,1 А.

После выполнения расчета нестационарного магнитного поля данные о мощности тепловыделения во всех жилах кабеля, представленные в табличном виде (рис. 4), экспортируем в любой табличный редактор, например в Excel. Значения мощности тепловыделения в броне кабеля на несколько порядков меньше, чем в жилах кабеля, поэтому в дальнейшем броню как источник тепловыделения рассматривать не будем.

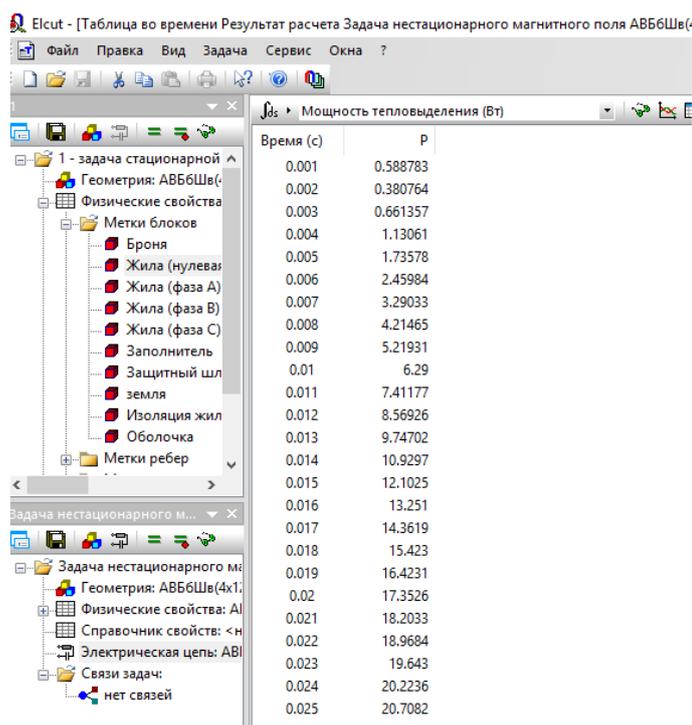


Рис. 4. Фрагмент результатов расчета магнитного поля кабеля в Elcut (мощность тепловыделения в фазе A)

В Excel определяем среднее значение мощности тепловыделения в жилах кабеля, а также объемные плотности тепловыделения (табл. 3).

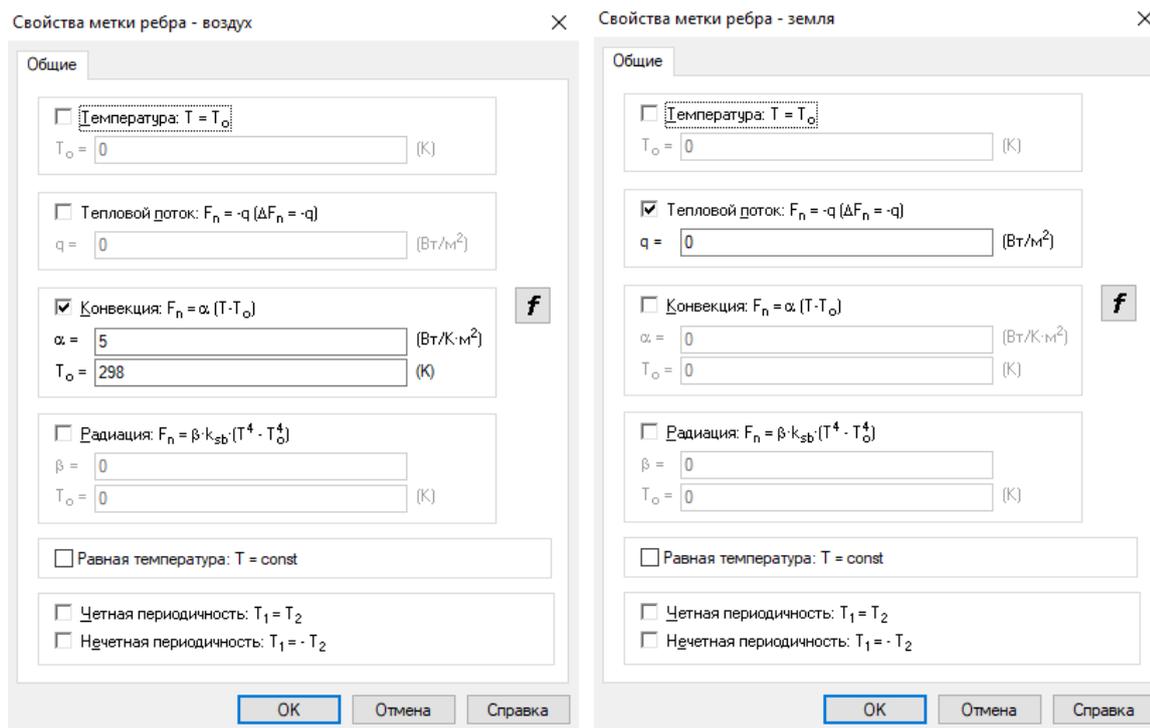
Таблица 3

Значение мощности тепловыделения и объемных плотностей тепловыделения в жилах кабеля

Жила	Фазы A	Фазы B	Фазы C	Нулевая
Среднее значение мощности тепловыделения, Вт	17,61	17,66	17,57	15,15
Объемная плотность тепловыделения, Вт/м ³	146741	147203	146389	126291

Далее в Elcut создается новая задача – расчета стационарной теплопередачи. Класс модели принимаем тоже плоскопараллельным. Геометрическая модель для данной задачи такая же как и для задачи нестационарного магнитного поля.

Указываем физические свойства материалов элементов конструкции кабеля, граничные условия и источники тепловыделения. При расчете стационарной теплопередачи в качестве граничных условий задаем условие конвективного теплообмена между поверхностью земли и воздухом (рис. 5, а) с коэффициентом теплопередачи $5 \text{ Вт}/(\text{К} \cdot \text{м}^2)$ и значением температуры воздуха $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ (298 К). На границе поверхности земли, ограничивающей область расчета в объеме земли, принимаем отсутствие теплового потока, $0 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (рис. 5, б).



а)

б)

Рис. 5. Окна Elcut для задания граничных условий: а – задано условие конвективного теплообмена между поверхностью земли и воздухом; б – задано отсутствие теплового потока на поверхности земли, ограничивающей область расчета в объеме земли

В качестве источников тепловыделения в данной задаче выступают фазные и нулевая жила кабеля, объемную плотность тепловыделения для которых задаем в соответствии в табл. 3. Значения коэффициентов теплопроводности элементов, используемые в модели, указаны в табл. 4.

Таблица 4

Значения коэффициентов теплопроводности элементов модели

Элемент модели	Броня	Жилы	Изоляция	Оболочка	Защитный покров	Земля
Теплопроводность, Вт/(К · м)	69	206	0,2	0,2	0,2	0,5

Выполняем расчет тепловой картины поля кабеля (рис. 6) и определяем значения температур жил кабеля. Максимальное значение температуры жил составило 74,6 °С (347,6 К), что превышает допустимую температуру нагрева кабеля данной марки 65 °С. Следовательно, значение длительно допустимого тока кабеля, приведенное в ПУЭ [1], для синусоидальной формы тока нельзя использовать в качестве длительно допустимого тока при искажении синусоидальности тока.

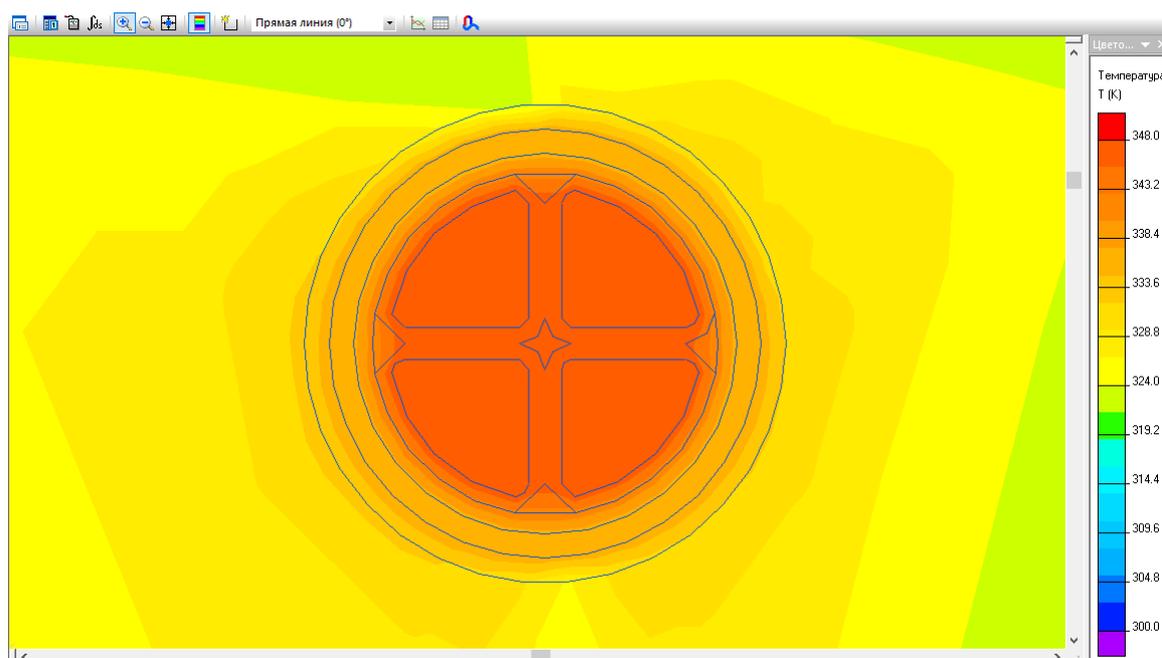


Рис. 6. Картина теплового поля кабеля АВБШв (4×120)

Далее уменьшаем значение $I_{(1)}$, указанное в параметрах электрической цепи задачи нестационарного магнитного поля, и повторяем процедуру расчета. Методом перебора повторяем решение задач до тех пор, пока не будет выполнено условие соблюдения температурного режима работы кабеля, т. е. когда температура поверхности жилы при искомой токовой нагрузке не будет равна величине предельно допустимой температуры.

В нашем случае температура жил кабеля была равна предельно допустимой при значении $I_{(1)} = 220,6$ А, что соответствует действующему значению несинусоидального тока в 237,5 А для заданного в табл. 3 спектра гармоник. Таким образом, значение 237,5 А можно считать значением длительного допустимого тока для кабеля АВБШв (4×120) при питании потребителя с нелинейной нагрузкой.

Заключение

Определение предельно допустимой токовой нагрузки силовых четырехжильных кабелей до 1 кВ, питающих потребителей с нелинейной нагрузкой в программе Elcut, возможно путем решения задач нестационарного магнитного поля и стационарной теплопередачи методом перебора решений. Для проведения оценочных расчетов можно использовать бесплатную версию программы – «ELCUT Студенческий».

Представленная процедура расчета может быть использована при проектировании систем электроснабжения.

Литература

1. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 648 с.
2. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.
3. Симуткин, М. Г. Разработка методов оценки влияния нелинейных электроприемников на режимы работы оборудования распределительных сетей : автореф. дис.

- ... канд. техн. наук : 05.14.02 / М. Г. Симуткин ; Нац. исслед. ун-т «Моск. энергет. ин-т». – М., 2014. – 20 с.
4. Куделина, Д. В. Определение нагрева изоляции кабельных линий с учетом влияния токов высших гармоник / Д. В. Куделина, В. И. Бирюлин // Auditorium. Электронный научный журнал Курского государственного университета. – 2019. – № 1. – Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-nagreva-izolyatsii-kabelnyh-linij-s-uchetom-vliyaniya-tokov-vysshih-garmonik>. – Дата доступа: 21.02.2020.
 5. Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / Е. С. Зайцев [и др.] // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : материалы V Междунар. науч. конф., Харьков, 2011 г. / Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т». – Харьков, 2011. – С. 615–622.
 6. Грешняков, Г. О расчете предельно допустимых токов силовых кабелей 110 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена и проволочной броней из алюминиевого сплава / Г. Грешняков, С. Дубицкий, А. Рудаков // Силовая электроника. – 2011. – № 3. – С. 72–75.
 7. Расчет температурных полей и токовых нагрузок кабелей в ANSYS / Л. А. Ковригин [и др.] // КАБЕЛЬ-news. – 2009. – № 4. – С. 91–95.
 8. Электромагнитный и тепловой расчет токовой нагрузки кабельной системы методом конечных элементов / Г. В. Грешняков [и др.] // Наука и техника. – 2013. – № 4. – С. 15–21.
 9. Рудченко, Ю. А. Влияние высших гармоник тока на дополнительный нагрев силовых кабелей напряжением до 1 кВ / Ю. А. Рудченко // Инновационное развитие современной науки : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Андижан, 2019. – С. 20–25.

Получено 10.01.2020 г.