

УДК 621.315

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕННОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ИЗОЛЯЦИИ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА ОДНОЖИЛЬНОГО КАБЕЛЯ С ДЕФЕКТАМИ ИЗОЛЯЦИИ В ПРИЛОЖЕНИИ FEMM

**В. В. ПРОЗОРОВ***(Представлено: канд. техн. наук, доц. А. Л. АДАМОВИЧ)*

Работа включает в себя анализ влияния дефектов изоляции на распределение электрического поля, что позволяет выявить зоны с повышенными напряжениями, способные привести к пробоям и другим нештатным ситуациям. Метод конечных элементов (МКЭ) предоставляет возможность детального изучения электрических характеристик кабеля, а также оценки влияния различных параметров конструкции и материала изоляции на его поведение в условиях эксплуатации.


**Основы и возможности программного обеспечения FEMM.** Программа Finite Element Method Magnetics (сокращенно FEMM) позволяет проводить на персональных компьютерах расчет плоскомеридианных (осесимметричных) и плоскопараллельных стационарных или квазистационарных магнитных, а также стационарных электростатических полей. Пакет позволяет определять их цепные и полевые параметры и строить картины. Преимуществами рассматриваемого программного обеспечения также является лёгкость освоения.

Основная часть программы состоит из трех модулей: графического препроцессора, решателя и графического постпроцессора. Работа с пакетом при разработке новой модели начинается с запуска препроцессора. Первый этап – геометрические построения исследуемых объектов в полярных или декартовых координатах. Второй этап – задание для частей или блоков объекта свойств материалов (в том числе кривых намагничивания) и ввод граничных условий (Дирихле, Неймана, смешанных, периодичности и антипериодичности, специальных и др.). После этого начинается автоматическая работа решателя, обчисляющего параметры модели и строящего сетку конечных элементов. После окончания расчетов запускается постпроцессор, при этом создаются зонные картины полей: для стационарного магнитного поля – линий магнитного потока, для квазистационарного – линий действительного значения векторного магнитного потенциала. Параметры полей можно просмотреть в любой точке области, а в определенных зонах оценить ряд интегральных величин: магнитных потоков, индуктивностей, магнитных напряжений и т.д.[1],[2].



**Расчет напряженности поля без дефектов в изоляции кабеля.** В настоящее время многие страны практически полностью перешли на использование силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Кабели с материалом изоляции из СПЭ не имеют многих недостатков, характерных для кабелей с бумажной изоляцией. СПЭ имеет существенные преимущества: высокие электрические и механические параметры в более широком диапазоне рабочих температур, малую гигроскопичность (водопороницаемость).

Указанные положительные качества полиэтилена достигаются благодаря процессу его «сшивки» - изменение молекулярной структуры полиэтилена. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между молекулами полиэтилена, создают новую трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала. При производстве кабелей с изоляцией из СПЭ на напряжение 10 кВ используются две технологии сшивания изоляции: пероксидной сшивки для кабелей среднего (10-35 кВ) и высокого напряжений (110 кВ и выше), а также силановой сшивки для кабелей низкого и среднего напряжения (0,66-20 кВ).

*Порядок выполнения работы:*

1. Запущено приложение FEMM с рабочего стола – меню «New» – указан тип задачи. Меню «Problem» - указаны параметры геометрии. Установлен шаг экранной сетки  1 мм.


Для следующего этапа был выбран кабель со следующими характеристиками: сечение и диаметр токопроводящей жилы, номинальное напряжение и толщина изоляции соответственно:  $S_{ж} = 150\text{мм}^2$ ,  $\varnothing = 14$  мм,  $U_n = 35$  кВ,  $t_{из} = 9$  мм.


2. Создание кабеля. Установлены точки  по координатам (клавиша «Tab»). После этого точки были замкнуты дугами  (180°).





3. Выбор свойств материалов. Меню «Properties» – «Materials» – «Add Property». Для изоляции из сшитого полиэтилена установлено: Name: XPLE, диэлектрическая проницаемость  $\epsilon_x = \epsilon_y = 2,4$ . Аналогично для свойств дефектного включения (пора) в изоляции: воздушное включение: Name: Air,  $\epsilon_x = \epsilon_y = 1$ ; водное включение: Name: Water,  $\epsilon_x = \epsilon_y = 80$ .


4. Выбор свойств границ. Меню «Properties» – «Boundary» – «Add Property». Для токопроводящей жилы: Name: Wire, Fixed Voltage: 28580 В, как амплитуда фазного напряжения для сети 35кВ: Для экрана: Name: Shield, Fixed Voltage: 0.


$$\frac{35\text{кВ}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} = 28,58 \text{ кВ} = 28580 \text{ В}$$

5. Присваивание свойств материалам и границам. Установлены маркеры  на изоляции и на жиле и указаны их свойства. Свойства вызваны нажатием «Пробел». Для жилы указано «No Mesh», так как в сечении жилы расчет не нужен, а интересует только изоляция.

6. Установка свойств границ. Включена  и выделены дуги на поверхности жилы (ПКМ), затем нажата клавиша «Пробел» - установлено свойство Conductor. Аналогично выделена дуга на экране и установлен - Shield.

7. Создание сетки и расчет. Нажата . Затем для расчета нажата . Далее нажата . Для отображения напряженности электрического нажата  и выбрано «Field Intensity (|E|)».

8. Получение распределения напряженности поля по толщине изоляции. Нажата  и построена линия, установив точки на поверхности жилы и на экране.

9. Нажата , выбрано «|E| (Magnitude of field intensity)», получив на отдельной вкладке график распределения напряженности электрического поля в изоляции вдоль линии.

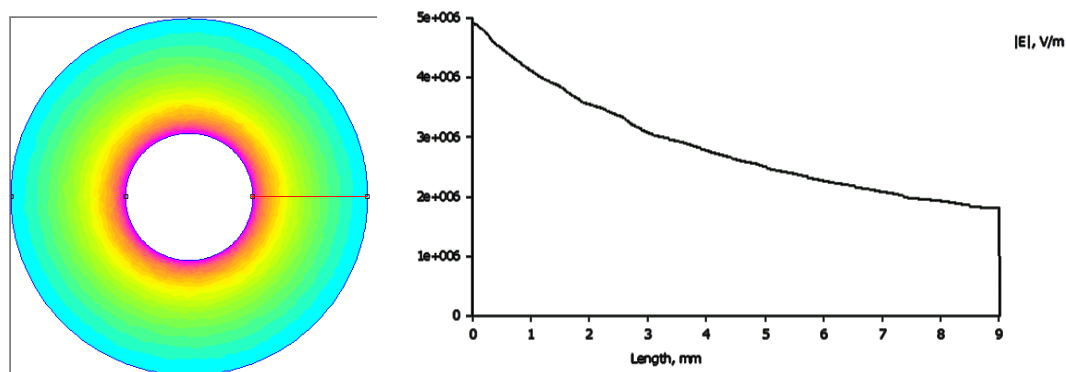



Рисунок 1. – Получение графика изоляции вдоль линии и сам график изоляции

**Расчёт напряженности поля при наличии дефектов в изоляции кабеля.** Произведен переход на вкладку модели. Созданы включения в изоляции: установлены две точки на расстоянии 1 мм в середине изоляции, замкнутые дугами. Нажата  и установлен маркер внутрь включения со свойством: «Air».

Создана сетка, выполнен расчет и получен график распределения электрического поля в изоляции вдоль линии. Аналогичным образом был произведен расчёт распределения напряженности электрического поля одножильного кабеля с водяным и металлическим включением.

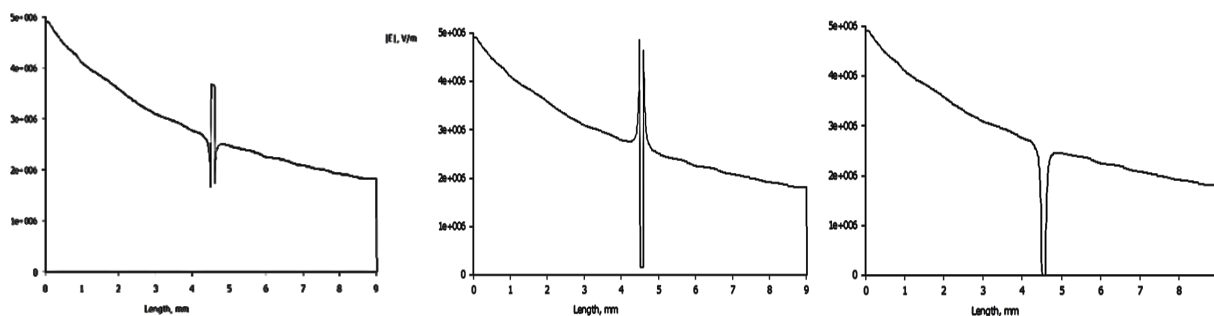


Рисунок 2. – Распределение напряженности электрического поля при наличии воздушного, водяного и металлического включения (слева направо)

**Заключение.** При дефектном включении воздух будет обладать меньшей способностью к накоплению электрического заряда, чем вода. Поэтому, напряженность электрического поля будет выше в воздушном включении или вблизи него, чем в водяном. Если говорить про водяное включение, здесь иначе: вода обладает более высокой диэлектрической проницаемостью по сравнению с воздухом. Это означает, что при дефектном включении водяное окружение будет способно лучше накапливать электрический заряд. В результате, напряженность электрического поля будет меньше в водяном включении или вблизи него, чем в воздушном. Металлические включения в изоляции провода в свою очередь могут привести к пробоя изоляции, ведь наличие металла может снизить диэлектрическую прочность изоляции, что увеличивает риск пробоя при высоких напряжениях. Это может вызвать искрение и серьезные повреждения. Кроме того, металлические включения могут вызывать локальные перегревы, что может привести к разрушению изоляции и дальнейшим повреждениям.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. FEMM// Version 4.2 User's Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.femm.info/wiki/Manual/>.– Дата доступа: 10.04.2024
2. Схем.net// Finite Element Method Magnetics [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cxem.net/software/finiteElementMethodMagnetics.php?ysclid=m0v7varka238574195/>.– Дата доступа: 20.04.2024