

УДК 620.1.51

А.Г. Щербинин, Р.П. Лукоянов
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОРМАЛЬНЫХ И ТАНГЕНЦИАЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ В ПРОПИТАННОЙ БУМАЖНО-ПЛАСТИКОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЕЙ С СЕКТОРНЫМИ ЖИЛАМИ НА НАПРЯЖЕНИЕ 20 КВ

Бумажная и бумажно-пластиковая пропитанная изоляция силовых кабелей представляет собой слоистую структуру. При этом у таких кабелей с секторными токопроводящими жилами (ТПЖ) на напряжение 20 кВ необходимо учитывать тангенциальную составляющую напряженности электрического поля, направленную вдоль бумажных лент, допустимая величина электрической прочности которой в 10 раз меньше электрической прочности изоляции по нормали. В работе предлагается математическая модель по определению электрического поля с учетом слоистой структуры изоляции. Реализация математической модели и численные исследования нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля в пропитанной бумажно-пластиковой изоляции проводятся с использованием программного комплекса ANSYS MAXWELL.

Ключевые слова: силовой кабель; бумажно-пластиковая пропитанная изоляция; секторные токопроводящие жилы; нормальные и тангенциальные составляющие напряженности электрического поля; математическое моделирование

A.G. Sherbinin, R.P. Lukojanov
Perm national research polytechnic university, Perm

NUMERICAL STUDIES OF NORMAL AND TANGENTIAL COMPONENTS OF THE ELECTRIC FIELD IN IMPREGNATED PAPER-PLASTIC INSULATION OF CABLES WITH SECTOR CORES AT A VOLTAGE OF 20 KV

Paper and paper-plastic impregnated insulation of power cables is a layered structure. At the same time these cables with shaped conductors (EC) at 20 kV it is necessary to consider the tangential component of the electric field is directed along the paper strips, the permissible value of electrical strength which is 10 times less than electric strength of insulation normal. The paper proposes a mathematical model for determining the electric field taking into account the layered structure of insulation. The implementation of the mathematical model and numerical studies of the normal and tangential components of the electric field in impregnated paper-plastic insulation are carried out using the ANSYS MAXWELL software package.

Keywords: power cable; sector conductors; normal and tangential components of electric field strength; mathematical modeling.

При разработке силовых кабелей с секторными ТПЖ необходимо учитывать тангенциальные составляющие напряженности электрического поля в бумажной пропитанной и бумажно-пластиковой пропитанной изоляции при напряжениях 20 и 35 кВ. Тангенциальные составляющие напряженности электрического поля способствуют возникновению скользящих разрядов,

направленных вдоль бумажных лент [1,2]. Допустимая величина этих составляющих в 10 раз меньше допустимой величины нормальной составляющей напряженности электрического поля [1].

Проведено исследование электрических полей для силового кабеля с тремя секторными ТПЖ сечением 240 мм² с бумажно-пластиковой пропитанной изоляцией напряжением 20 кВ [1,3]. Каждая изолированная жила имеет медный экран, поэтому рассматривается электрическое поле одной изолированной ТПЖ [4] (рис. 1).

Допущения, принятые при построении математической модели следующие: задача двумерная, поскольку электрический потенциал не изменяется по длине кабеля ($\partial\varphi/\partial z = 0$).

Поскольку изоляция не сплошная, а изготавливается путем намотки на токопроводящие жилы лент кабельной бумаги или ламинированной бумаги (с полимерным покрытием) и последующей пропиткой маслоканифольным составом, то проводится исследование электрического поля изоляции с учетом ее слоистой структуры. Для этого изоляция разбивается на 30 слоев (рис.1), в которых последовательно задаются значения относительной диэлектрической проницаемости, приведенные в таблице 1

Таблица 1 – Значения относительной диэлектрической проницаемости

Материал изоляции	Маслоканифольный состав	Пропитанная кабельная бумага	Полимерная лента
ϵ	3,6	4,0	2,5

Распределение электрического потенциал определяется из решения уравнения Лапласа [1,3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0, \quad (1)$$

где x и y – декартовы координаты; φ – электрический потенциал.

При решении задачи задаются граничные условия первого рода:

на поверхности экрана по жиле – 16330 В, на экране по изоляции – 0 В (рис.1).

Уравнение Лапласа (1) решается методом конечных элементов [4,5] в программном комплексе ANSYS MAXWELL, результатом решения которого является поле электрического потенциала в поперечном сечении изоляции.

Вектор напряженности электрического поля равняется градиенту электрического потенциала с противоположным знаком и определяется как [5]:

$$\vec{E} = -\text{grad} \varphi. \quad (2)$$

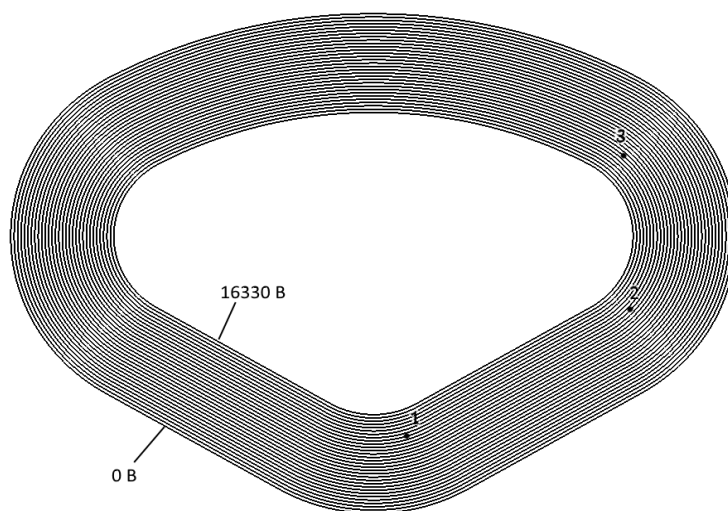


Рисунок 1 – Изоляция секторной токопроводящей жилы, разбитой на слои. 1, 2, 3 – пиковые значения тангенциальных составляющих электрического поля [6].

Наибольшие значения напряженности электрического поля наблюдаются в областях с минимальным радиусом закругления сектора ТПЖ [6]. Следовательно, график распределения напряженности электрического поля для сплошной изоляции (диэлектрическая постоянная ϵ постоянна по всей области изоляции) и для слоистой изоляции (с разными значениями ϵ) по толщине изоляции для бумажно-пластиковой пропитанной изоляции изображен на рис. 2.

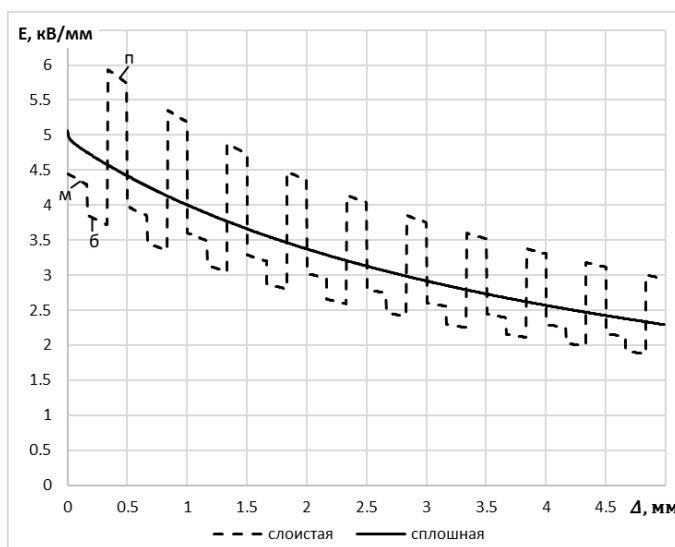


Рисунок 2 – График напряженности электрического поля в бумажно-пластиковой пропитанной изоляции. м – маслоканифольный состав, б – бумага, п – полимерный слой.

Контур каждого слоя бумажно-пластиковой или бумажной пропитанной изоляции подобен внешнему контуру секторной ТПЖ. Для определения тангенциальной составляющей напряженности электрического поля строится семейство линий через равные интервалы по толщине изоляции [6].

Для заданного напряжения максимальные значения нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля зависят от радиуса закругления секторной ТПЖ и толщины изоляции [6]. Поэтому были вычислены параметры секторной токопроводящей жилы [7] для каждого варианта с изменением радиуса закругления сектора ТПЖ от 4 до 6 мм и толщиной изоляции от 5 до 6 мм. Построены соответствующие геометрические модели, и в программном комплексе ANSYS MAXWELL определены электрические поля.

Пиковые значения тангенциальных составляющих электрического поля обозначены точками 1, 2, и 3 на рис. 1, которые располагаются от поверхности жилы на расстоянии равном 1/3 толщины изоляции. В точке 2 наблюдается наибольшее по абсолютной величине значение тангенциальной составляющей напряженности электрического поля.

В таблицах 2 и 3 представлены результаты максимальных нормальных E_n и тангенциальных E_t составляющих электрического поля для сплошной и слоистой изоляции при толщине изоляции $\Delta = 5$ мм и радиусе закругления секторной ТПЖ $r = 4$ мм. Максимальные нормальные составляющие в таблице 2 представлены для каждого материала в первом слое изоляции (рис. 2).

Таблица 2 – Максимальные нормальные и тангенциальные составляющие электрического поля в изоляции кабеля

Тип изоляции	Сплошная изоляция	Слоистая изоляция	
		м	б
E_n , кВ/мм	5,08	п	4,9
		б	3,9
		м	5,9
E_t , кВ/мм	0,48	0,48	

Из результатов таблицы видно, что тангенциальные составляющие электрического поля как для сплошной изоляции, так и для слоистой совпадают и равняются 0,48 кВ/мм.

Таким образом, расчет тангенциальных составляющих можно вести с допущением, что диэлектрическая постоянная не изменяется по всей толщине изоляции.

Результаты расчетов максимальных нормальных и тангенциальных составляющих электрического поля для всех вариантов геометрии изолированной секторной ТПЖ представлены в таблице 3. Радиус закругления секторной ТПЖ изменялся от 4 до 5 мм, с шагом 1 мм, а толщина изоляции – от 5 мм до 7 мм с таким же шагом.

Таблица 3 – Максимальные нормальные и тангенциальные составляющие электрического поля для всех вариантов геометрии

r , мм	Δ , мм					
	5		6		7	
	E_{τ} , кВ/мм	E_n , кВ/мм	E_{τ} , кВ/мм	E_n , кВ/мм	E_{τ} , кВ/мм	E_n , кВ/мм
4	0,48	5,08	0,46	4,53	0,44	4,03
5	0,41	4,85	0,39	4,19	0,37	3,77
6	0,36	4,58	0,33	3,99	0,31	3,57

Для бумажно-пластиковой изоляции допустимое значение напряженности электрического поля – 4,9 кВ/мм, допустимое значение тангенциальной составляющей – 0,49 кВ/мм. На рисунке 3 область допустимых значений радиуса (r) закругления сектора и толщины изоляции (Δ) является затемненная часть рисунка.

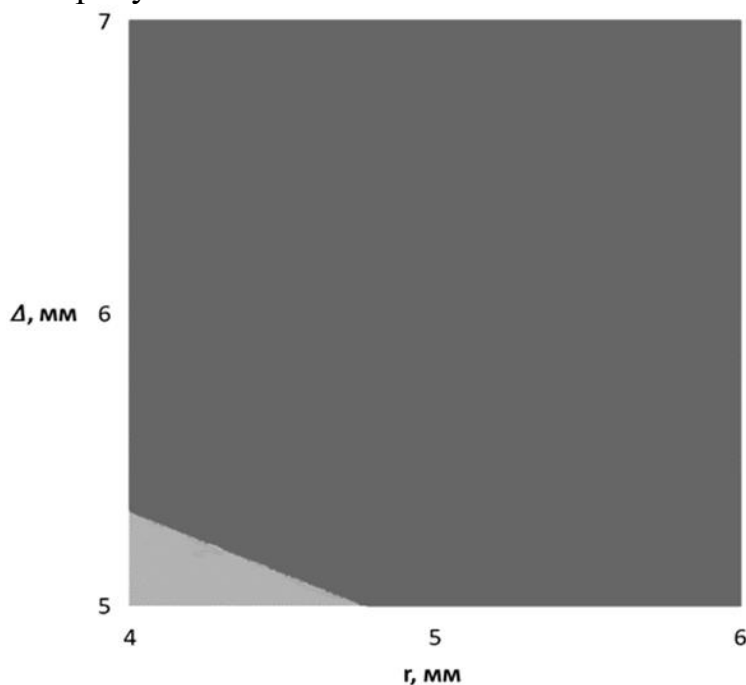


Рисунок 3 – Область допустимых значений толщины изоляции и радиуса закругления секторной токопроводящей жилы

Таким образом, сравнительный анализ математических моделей по определению электрического поля в однородной и слоистой изоляции кабелей с секторными токопроводящими жилами показал, что для оценки тангенциальной составляющей напряженности электрического поля можно использовать математическую модель с однородной изоляцией. При этом для определения нормальной составляющей напряженности электрического поля необходимо учитывать слоистую структуру изоляции.

В результате численных исследований электрического поля в слоистой изоляции кабелей с секторными ТПЖ сечением 240 мм² на напряжение 20 кВ были получены допустимые значения радиуса (r) закругления сектора и толщины изоляции (Δ).

Список литературы

1. Основы кабельной техники. Под ред. И.Б. Пешкова. М.: Издательский центр «Академия». 2006. 432 с.
2. Разыграев С.Н. Особенности устройства и поведения бумажной пропитанной изоляции кабелей в электрических полях среднего напряжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. №6. С. 516-516.
3. Щербинин А.Г., Кабирова А.И. Математическое моделирование электрического поля кабеля с жилами секторной формы // Научно-технический вестник Поволжья. 2017. № 5. С. 178-180.
4. Бате К.Ю. Методы конечных элементов. – М.: Физматлит, 2010. –1022 с.
5. Соловейчик Ю.Г., Рояк М.Э., Персова М.Г. Метод конечных элементов для решения скалярных и векторных задач: учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. – 895 с.
6. Щербинин А.Г., Лукоянов Р.П. Численные исследования электрического поля силового кабеля с секторными жилами с пропитанной бумажно-пластиковой изоляцией на напряжение 20 кВ // Электротехника. 2020. № 11. С. 51-55.
7. Савченко В.Г., Труфанова Н.М., Щербинин А.Г. Расчет секторной жилы // Кабели и провода. 2011. № 3 (328). С. 14–17.

Сведения об авторах

Щербинин Алексей Григорьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Конструирование и технологии в электротехнике» Пермского национального исследовательского политехнического университета, г. Пермь, e-mail: agshch@mail.ru.

Лукоянов Руслан Павлович – студент Пермского национального исследовательского политехнического университета, гр. КТЭ-20-1м, г. Пермь, e-mail: kkk.korol@yandex.ru

About the authors

Shcherbinin Alexey Grigorievich – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Design and Technology in Electrical Engineering, Perm National Research Polytechnic University, Perm, e-mail: agshch@mail.ru.

Lukoyanov Ruslan Pavlovich – student of the Perm National Research Polytechnic University, gr. KHPP-20-1m, Perm, e-mail: kkk.korol@yandex.ru