

Т.Ю.АНТОНЕЦ, технолог, ЗАО «Завод Южкабель»;
С.Ю.АНТОНЕЦ, технолог, ЗАО «Завод Южкабель»;
В.М.ЗОЛОТАРЕВ, канд.техн.наук, ген.директор, ЗАО «Завод Южкабель»;
А.А.НАУМЕНКО, канд.техн.наук; вед.специалист, ЗАО «Завод Южкабель»

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ РАСЧЕТА НАВЕДЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА ЭКРАНАХ КАБЕЛЕЙ

Розроблена математична модель для визначення наведених напруг на екранах однофазних силових кабелів в симетричному режимі роботи трьохфазної кабельної лінії.

The mathematical model for calculation of voltages induced at screens of single-phase power cables working in symmetrical operation mode of three-phase cable line is developed.

Введение. Трехфазные кабельные линии из трех одножильных кабелей получают все большее распространение в Украине в связи с освоением отечественной промышленностью выпуска одножильных кабелей сечением жилы до 2000 мм² с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение до 330 кВ включительно. Длина таких линий может составлять девятки километров и, если не принять специальных мер, то наведенные на экранах кабелей напряжения относительно земли могут лежать в пределах от нескольких киловольт до нескольких десятков киловольт. Это требует деления экранов по длине линии на участки с целью снижения тем или иным способом наведенного напряжения на элементарном участке до уровня, приемлемого с точки зрения правил сооружения эксплуатации таких линий. Поэтому исследование условий возникновения таких значительных напряжений и разработка инженерных методик их расчета представляет значительный практический интерес.

Анализ публикаций. В работах [1, 2] были развиты методы расчета токов в коаксиальных экранах одножильных кабелей трехфазных кабельных линий, причем третий кабель является обратной петлей для тока двух других, т.е. в принятой авторами математической модели земля, как проводящая среда, никак не была отражена. Это не позволяет в принципе определить наведенные относительно земли напряжения на экранах одножильных кабелей.

Основные допущения. С учетом упомянутых особенностей расположения одножильных кабелей в трехфазной кабельной линии примем следующие допущения.

Кабельную линию будем рассматривать как бесконечно длинную.

Будем полагать, что земля представляет собой грунт с удельным объем-

ным сопротивлением ρ и магнитной проницаемостью, равной магнитной проницаемости вакуума μ_0 .

Значение μ_0 примем постоянным и не зависящим от глубины. Землю будем считать изотропной средой.

Металлические экраны будем рассматривать как бесконечно тонкие, а их диаметры примем равным диаметру кабеля, поскольку толщина защитного покрова в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена относительно невелика. Кроме того, в справочной литературе указывают диаметр кабеля, а не диаметр экрана, который является чисто технологическим параметром. Это очень важно с точки зрения использования результатов расчетов в проектных работах.

Уравнительные токи, которые возникают в одном и том же экране, если он пронизывается переменным магнитным полем, учитывать не будем. Эти токи имеют вихревой характер и не создают значительных вторичных магнитных полей, которые бы могли повлиять на потенциалы экранов. Они определяют только потери в экранах от вихревых токов, которыми для упрощения обычно пренебрегают [3].

Емкостные токи в кабеле между жилой и экраном, которые составляют несколько процентов от тока в жиле при полной нагрузке кабеля, учитывать не будем.

Токами смещения в земле также пренебрегаем, поскольку длина электромагнитной волны на промышленной частоте $f = 50$ Гц намного больше длины кабельной линии.

Постановка задачи. При таких допущениях распределение тока в земле, которая при напряжениях 110 кВ и выше в целях безопасности всегда соединяется электрически с нейтралью сети, выражается сложной закономерностью, аналогичной закономерности распределения тока в массивных проводниках. Так, например, если принять, что проводник заполняет все нижнее полупространство и на него падает плоская электромагнитная волна с угловой частотой ω , то глубина проникновения поля в проводящую среду будет равна [4].

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu_0}}, \quad (1)$$

Карсон [5] рассмотрел модель (рис. 1, а) расположения провода радиуса r_0 с током I над проводящей землей на высоте h . Рюденберг [6] рассматривал модель (рис. 1, б), в которой провод находится в центре полуцилиндрической канавки. В результате решения задач проникновения поля в грунт была определена эквивалентная глубина возврата тока через землю D_3 как расстояние от центра провода до некоторой бесконечной идеально проводящей плоскости. То есть реальное объемное распределение обратного тока в земле было заменено эквивалентным распределением тока по плоскости с глубиной ее

залегания в земле, равной D_3 . Причем значение D_3 по Карсону составило

$$D_3 = 1,31 \delta, \quad (2)$$

а по Рюденбергу

$$D_3 = 0,315 \delta. \quad (3)$$

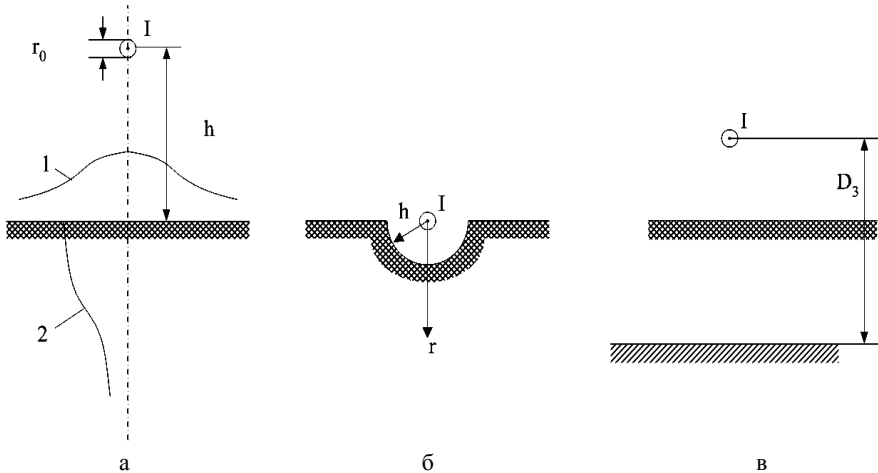


Рисунок 1 – Модель Карсона (а) и Рюденберга (б) для расчета распределения тока в земле; в – расчетная схема для определения эквивалентной глубины возврата тока через землю (1 – качественное распределение плотности тока на поверхности земли и по ее глубине – 2)

В обоих случаях величина D_3 не зависит от высоты h провода над землей, глубины канавки или глубины расположения самого провода в земле, как это бывает при прокладке кабеля. Известны и другие данные о величине D_3 . Так, например, в [7] и других работах авторов дается значение $D_3 = 1,58 \delta$ или приводятся более сложные зависимости для D_3 , например, по формулам Поллачека.

Различие в значениях D_3 обусловлено, очевидно, тем, что Карсон рассматривал двумерное распределение тока в земле, а Рюденберг – одномерное, когда плотность тока определялась через функции Ханкеля путем решения одномерного уравнения Бесселя и зависела только от одной полярной координаты r .

Учитывая, что модель Карсона более полно отражает реальное двумерное распределение обратного тока в земле, примем в качестве основного для дальнейших расчетов соотношение (2).

Тогда, **математическая модель** для расчета потенциалов экранов относительно земли для трехфазной кабельной линии может быть построена для случая расположения трех однофазных кабелей (рис. 2) над бесконечной иде-

ально проводящей плоскостью, включенных в трехфазную систему симметричных токов в жилах кабелей фаз А, В и С.

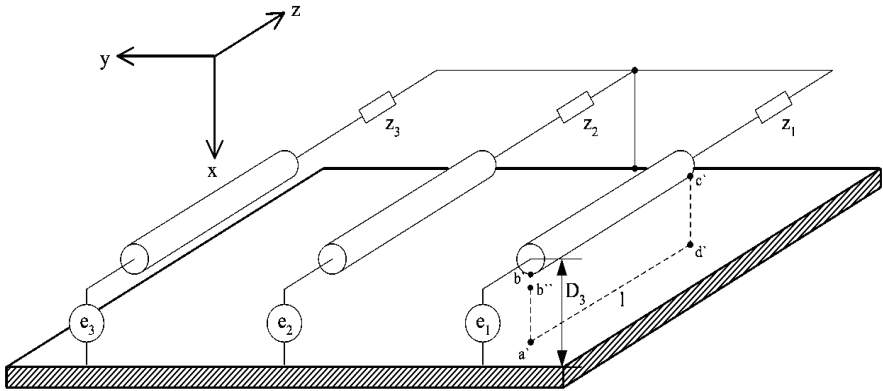


Рисунок 2 – Схема расположения кабельной линии относительно эквивалентной плоскости глубины возврата тока через землю

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= I_1 e^{j\psi}; \\ \dot{I}_2 &= a \dot{I}_1; \\ \dot{I}_3 &= a^2 \dot{I}_1. \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь ψ фаза тока I_1 , a – оператор поворота, то есть множитель, показывающий, что данный вектор нужно повернуть относительно исходного \dot{I}_1 , на угол $2\pi/3$:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}; \\ a^2 &= -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Кабельная линия, показанная на рис. 2 представляет собой трехфазный воздушных трансформатор, в котором роль первичных обмоток играют жилы кабелей с комплексными токами \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 образующими симметричную систему при симметричных э.д.с. e_1 , e_2 , e_3 и симметричной нагрузке z_1 , z_2 , z_3 , так как вторичные токи в экранах, даже при их заземлении в начале и в конце линии и возникающей при этом несимметрии практически не оказывают влияния на работу сети электроснабжения. Это допущение равноценно тому, что мощность трехфазного источника питания является бесконечно большой, как обычно и принимают на практике.

Учитывая, что в задаче необходимо определить потенциалы экранов относительно земли в качестве намагничивающего потока следует принять по-

ток, пронизывающий участок плоскости $a'b'c'd'$ (рис. 2) или параллельной ей. Тогда векторная диаграмма для вторичной цепи такого трансформатора в расчете на одну фазу будет иметь вид, приведенный на рис. 3.

Основной поток $\dot{\Phi}$ создается комплексными токами первичной обмотки $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$. Электродвижущая сила вторичной обмотки по закону Фарадея пропорциональна производной потока по времени со знаком минус, то есть вектор э.д.с. будет отставать от $\dot{\Phi}$ на угол $\pi/2$. Вторичный ток \dot{I}_2 будет отставать по фазе от э.д.с. на угол $\psi_2 = \arctg(x_2/R_2)$, где x_2, R_2 – полное индуктивное и активное сопротивление вторичной цепи, соответственно. Активное падение напряжения $\dot{I}_2 R_2$ будет совпадать по фазе с током \dot{I}_2 , а реактивное падение $jx_2 I_2$ – опережать ток \dot{I}_2 по фазе на угол $\pi/2$. Данная математическая модель позволяет определить потенциалы экранов реальной кабельной линии из одножильных кабелей в любом режиме работы трехфазной сети.

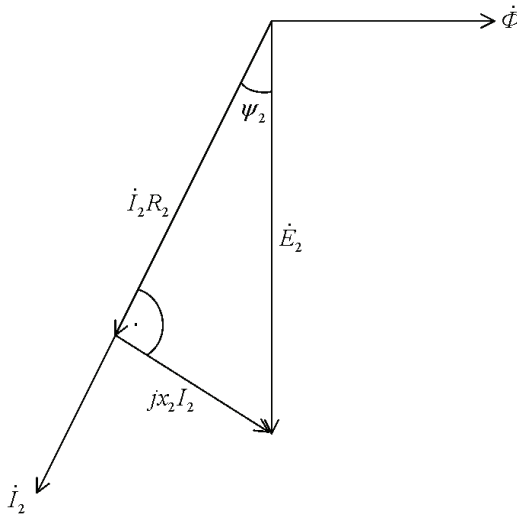


Рисунок 3 – Векторная диаграмма для вторичной цепи воздушного кабельного трансформатора

Выводы.

- 1 Характерным для современных мощных силовых кабельных линий является то, что они обычно выполняются из трех одножильных кабелей с металлическими экранами, которые служат для создания радиального поля в изоляции, и, одновременно, являются обратными токопроводами этих кабелей.
- 2 Значительный практический интерес представляет случай, когда все

три экрана трехфазной кабельной линии заземлены только с одного края. При этом на другом краю каждого экрана могут возникать значительные наведенные напряжения относительно земли.

- 3 Разработанная математическая модель показывает, что такое наведенное на экране напряжение возбуждается основным потоком $\dot{\Phi}$ кабельного трансформатора, образованного тремя кабелями кабельной линии, и бесконечной эквивалентной плоскостью возврата тока через землю. Причем, первичная цепь такого трансформатора образована в каждой фазе источником э.д.с., включенным между эквивалентной плоскостью возврата тока, жилой кабеля, нагрузкой и, собственно самой эквивалентной плоскостью возврата тока через землю. Вторичная цепь трехфазного кабельного трансформатора в каждой фазе образована экраном кабеля с заземлением экрана с одной стороны и эквивалентной плоскостью возврата тока через землю (контур $a'b'c'd'$ на рис. 2). При этом напряжение, наведенное на втором (разземленном) краю кабеля (между экраном и плоскостью возврата тока через землю, то есть между точками c' и d') можно принять численно равным э.д.с. во вторичной цепи кабельного трансформатора. Эта э.д.с. пропорциональна производной основного потока $\dot{\Phi}$ кабельного трансформатора по времени, т.е. производной потока $\dot{\Phi}$ по времени через участок плоскости, ограниченной контуром $a'b'c'd'$ (см. рис. 2).

Список литературы: 1. Ларина Э.Т. Силовые кабели и кабельные линии. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 368 С. 2. Кабели и провода. Т. 1., под ред. Привезенцева В.А., Линкова А.В. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 473 С. 3. Привезенцев В.А. и др. Основы кабельной техники. – М.: Энергия, 1975. – 472 С. 4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. – М.: Наука, 1976. – 614 с. 5. Carson J. Bell // Syst. Techn. Journ., 1926. – Vol. 5, № 539. – PP. 17-23. 6. Рюденберг Н. Переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.: ИЛ, 1955. – 715 с. 7. Дмитриев М.В., Евдокунин Г.А. Однофазные силовые кабели 6...500 кВ. Расчет заземления экранов // Новости электротехники, – 2008. – № 4 (52). – С. 12 – 18.

Надійшла до редколегії 15.03.2010