

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВИДА ПОВРЕЖДЕНИЯ СИЛОВОГО КАБЕЛЯ ПО КОНФИГУРАЦИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Колодченко Никита Владимирович Kolodchenko_NV@ba.rosseti-sib.ru
Павличенко Илья Александрович pavlichenkoia19@gmail.ru

Аннотация:

В данной статье рассматриваются современные методы обнаружения повреждений в кабельных линиях, которые играют ключевую роль в системе электроснабжения. Обсуждается актуальность данной проблемы, а также возможности применения технологии определения места повреждения силового кабеля по конфигурации электромагнитного поля, для повышения точности и эффективности поиска повреждений. Предлагается разработка системы интеллектуального поиска повреждений, включающая сбор и анализ данных, обучение моделей машинного обучения, разработку программного обеспечения и интеграцию с существующим оборудованием. Также рассмотрена система определения вида повреждения кабеля по конфигурации электромагнитного поля. Делается вывод о необходимости комплексного подхода к решению задачи по разработке и внедрению новых технологий и моделей, описывается положительный эффект от внедрения новых технологий.

Ключевые слова: кабельные линии, повреждения, поиск повреждений, машинное обучение, надежность электроснабжения, системы диагностики, развитие технологий.

У электроснабжения промышленных и городских объектов уже довольно давно видна тенденция увеличения протяженности кабельных линий 6-10 кВ, которая связана с большим количеством предприятий в крупных городах и населённых пунктах, ведь для них кабельные линии (КЛ) – это главный способ распределения электрической энергии. Также из-за большого спроса на земельные участки воздушные линии со временем заменяются кабельными линиями. Помимо всего прочего существует проблема, которая связана с тем, что большинство силовых КЛ, находящихся в эксплуатации, используются более 25 лет и имеют большое количество технологических нарушений, как при эксплуатации, так и при ремонте. Именно поэтому очень важную роль играет техническая диагностика при эксплуатации и ремонтах КЛ.

Распознавание отказа по конфигурации электромагнитного поля над местом повреждения силового кабеля один из способов диагностики, который рассмотрен в данной статье.

Если взглянуть на такие режимы и значения управляющих параметров, при которых характерные диагностические признаки повреждений получают наибольшее разрешение в силовых КЛ с электромагнитными экранами (рис. 1, а). Проводники кабеля 1, изоляционная оболочка 2 и броня 3 имеют среду между собой. В этой среде у каждого из слоев ЭМП в случае плоской, поляризованной, монохроматической волны, падающей на поверхность 1, подчиняется условиям [1–3].

где ∇ – набла-оператор; E_m – амплитуда вектора напряженности электрического поля; $\Gamma = \sqrt{j\omega\mu(\gamma + j\omega\mu)}$ – оператор Гамильтона; j – показатель мнимой части; ω – круговая частота тока; $\gamma = 1/\rho$ – удельная проводимость среды; μ – магнитная проницаемость среды,

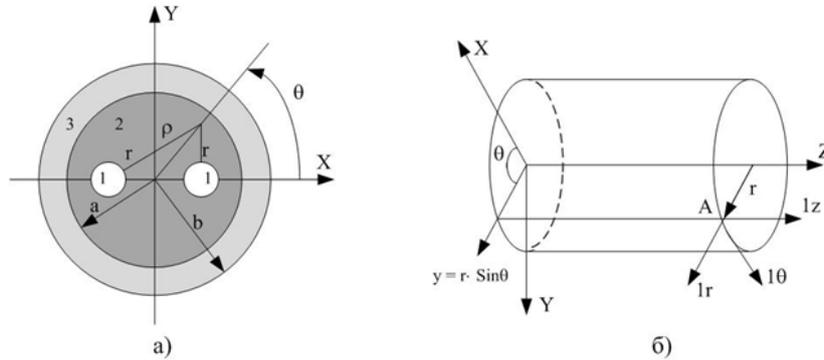


Рисунок 1 - Эквивалентное представление участка кабельной линии:
а – кабель с экраном; б – система координат для расчета ЭМП.

Для полупроводящих сред уравнение в цилиндрических координатах (рис. 1, б) имеет вид:

$$1_r \left(\nabla^2 E_{mr} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial E_{m\theta}}{\partial \theta} - \frac{E_{mr}}{r^2} \right) + 1_\theta \left(\nabla^2 E_{m\theta} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial E_{mr}}{\partial \theta} - \frac{E_{m\theta}}{r^2} \right) + 1_z \nabla^2 E_{mz} = \Gamma^2 (1_u E_{mu} + 1_\theta E_{m\theta} + 1_z E_{mz}). \quad (2)$$

Отдельные скалярные уравнения в цилиндрических координатах выделить трудно. Если принять допущение, что имеет место осевая симметрия векторов поля, т.е. $\partial E_m / \partial \theta = 0$, то в этом случае получим систему трех скалярных уравнений в системе прямоугольных координат

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 E_{mr}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_{mr}}{\partial r} - \frac{E_{mr}}{r^2} + \frac{\partial^2 E_{mr}}{\partial z^2} = \Gamma^2 E_{mr}; \\ \frac{\partial^2 E_{m\theta}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_{m\theta}}{\partial r} - \frac{E_{m\theta}}{r^2} + \frac{\partial^2 E_{m\theta}}{\partial z^2} = \Gamma^2 E_{m\theta}; \\ \frac{\partial^2 E_{mz}}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_{mz}}{\partial r} + \frac{\partial^2 E_{mz}}{\partial z^2} = \Gamma^2 E_{mz} \end{cases} \quad (3)$$

Уравнения (3) можно решить методом разделения переменных, если применить подстановку $E_{mr}(r, z) = R(r)Z(z)$ и произвести соответствующие преобразования. В случае, когда поле зависит только от одной переменной r (при параметрическом управлении процессом в целях диагностики), т.е. $\partial E_m / \partial z = 0$, тогда, подставляя новую комплексную переменную, $\rho = r\sqrt{-\Gamma^2}$ получаем два типа уравнений Бесселя для ∂E_{mr} и $E_{m\theta}$.

$$\frac{\partial^2 E_{mr}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_{mr}}{\partial \rho} + \left(1 - \frac{1}{\rho^2} \right) E_{mr} = 0 \quad (4)$$

и для E_{mz}

$$\frac{\partial^2 E_{mz}}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial E_{mz}}{\partial \rho} + E_{mz} = 0 \quad (5)$$

Общее решение (4) может иметь вид

$$E_{mr} = C_1 I_1(\rho) + C_2 N_1(\rho), \text{ либо } E_{mr} = C_2 H_1^{(1)}(\rho) + C_2 H_1^{(2)}(\rho).$$

Общее решение (5) может иметь вид

$$E_{mz} = C_5 I_0(\rho) + C_6 N_0(\rho), \text{ либо } E_{mz} = C_7 H_0^{(1)}(\rho) + C_8 H_0^{(2)}(\rho),$$

где $I_1(\rho)$ и $I_0(\rho)$ – функции Бесселя первого рода и нулевого порядка; $N_1(\rho)$ и $N_0(\rho)$ – функции Бесселя второго рода, первого и нулевого порядка, называемые функциями Неймана; $H_1^{(1)}(\rho)$, $H_0^{(1)}(\rho)$, $H_0^{(2)}(\rho)$ – взаимно сопряженные функции Ханкеля нулевого порядка.

Функция Бесселя n -го порядка для целых чисел α является суммой ряда

$$I_n(\rho) = \sum_{\alpha=1}^{\infty} \frac{(-1)^\alpha}{\alpha!(n+\alpha)!} \left(\frac{\rho}{2}\right)^{n+2\alpha} \quad (6)$$

Функции Ханкеля, называемые также функциями Бесселя третьего рода, связаны с функциями Бесселя и Неймана уравнениями

$$\begin{cases} H_v^{(1)}(\rho) = I_v(\rho) + jN_v(\rho); \\ H_v^{(2)}(\rho) = I_v(\rho) - jN_v(\rho); \end{cases} \quad (7)$$

где $v = n + 1/2$ – индекс функции Ханкеля.

Значение функции $H_v(\rho)$ Ханкеля для практического применения заключается в том, что среди функций Бесселя только они приобретают нулевые значения при бесконечных значениях комплексного аргумента, а именно: $H^{(1)}$ – когда мнимая часть является положительной и $H^{(2)}$, – когда она отрицательна. В противоположном случае обе функции растут до бесконечности

В рассматриваемом практическом приложении для диагностики повреждения силового кабеля это значит, что при контроле значений амплитуд гармонических составляющих спектра смена знака амплитуды выражает изменение фазы. Получаемый графический образ может быть использован как информационный признак при распознавании повреждения

Для векторного магнитного потенциала A тока i определим характеристики ЭМП снаружи цилиндрического экрана кабеля (рис. 1, а), имеющего магнитную проницаемость μ и охватывающего проводники 1,

$$A = \frac{\mu}{4\pi} \oint \frac{idl}{r} \quad (8)$$

Векторный потенциал двухпроводной линии будет иметь только составляющую A_z , направленную перпендикулярно плоскости (рис. 1, б):

$$A_z = \frac{\mu I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{dz}{\sqrt{r_1^2 + z^2}} - \frac{dz}{\sqrt{r_2^2 + z^2}} \right) = \frac{\mu I}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{r_1^2 + z^2} + z}{\sqrt{r_2^2 + z^2} + z} \right]_0^\infty = \frac{\mu I}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad (9)$$

Применяя так называемые круговые гармоники, полученные на основании уравнений (5), получим выражение для векторного потенциала в третьей области 3 (рис. 1, а)

$$A_z = \frac{4\mu I}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \left[(\mu_r + 1)^2 - (\mu_r + 1)^2 \left(\frac{a}{b}\right)^{4n+2} \right]^{-1} \times$$

$$\times \frac{1}{2\pi+1} \left(\frac{e}{\xi}\right)^{2\pi+1} \cos(2\pi + 1)\theta \quad (10)$$

Магнитное поле кабеля определяется на основании соотношения $B = \text{rot } A$, выраженного в цилиндрических координатах,

$$B_\xi = \frac{1}{\xi} \frac{\partial A_{3z}}{\partial \theta} \text{ и } B_\theta = -\frac{\partial A_{3z}}{\partial \xi} \quad (11)$$

Необходимо обеспечить растекание токов в месте повреждения кабеля. Растекание токов формирует пространственную структуру поля, которая определяется природой токов (видом реактивности L и C). Схема приведена на рисунке 2.

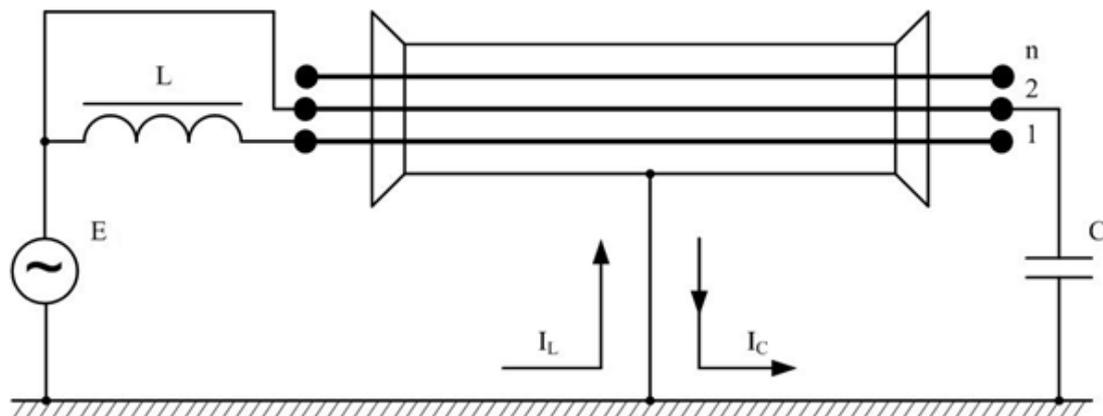


Рисунок 2 - Схема включения индуктивности L и C емкости при поиске повреждения изоляции одной из жил кабеля относительно земли

Поиск повреждений [4] осуществляется при рабочем напряжении на частоте 50 Гц. За счет тока конденсатора C и дросселя L в месте повреждения изоляции будут формироваться амплитудно-фазовые соотношения характеристик поля (значения амплитуд спектрального состава тока замыкания на землю и спектральная плотность мощности).

Ток возвращается через землю и стремится приблизиться к проводнику, но не может самопроизвольно протекать в земле. Из-за фазового и пространственного сдвига намагничивающих сил, поле рассеяния КЛ будет иметь характер сложной волны, которая проходит вдоль оси кабеля. Из показаний эксперимента известно, что при поиске места повреждения кабеля на трассах КЛ вполне достаточно вести учёт нескольких первых гармоник ряда Фурье распределения поля. На компьютере или ноутбуке выполняется построение графического образа и

рассчитываются характеристики ЭМП. При этом выполняется: цифровая фильтрация аналоговых сигналов и выделяются значения фазовых соотношений; определяются спектральные составляющие аналоговых сигналов двух каналов; определяется спектральная плотность мощности сигналов.

Испытания на месте повреждений прототипа такого устройства, в котором задействована обработка спектральных характеристик поля по прикладным программам быстрого преобразования Фурье, показали, что все виды повреждений кабеля формируют необычные образы, которые изменяются при движении вдоль трассы прокладки КЛ. Пример приведен на рисунке 3.

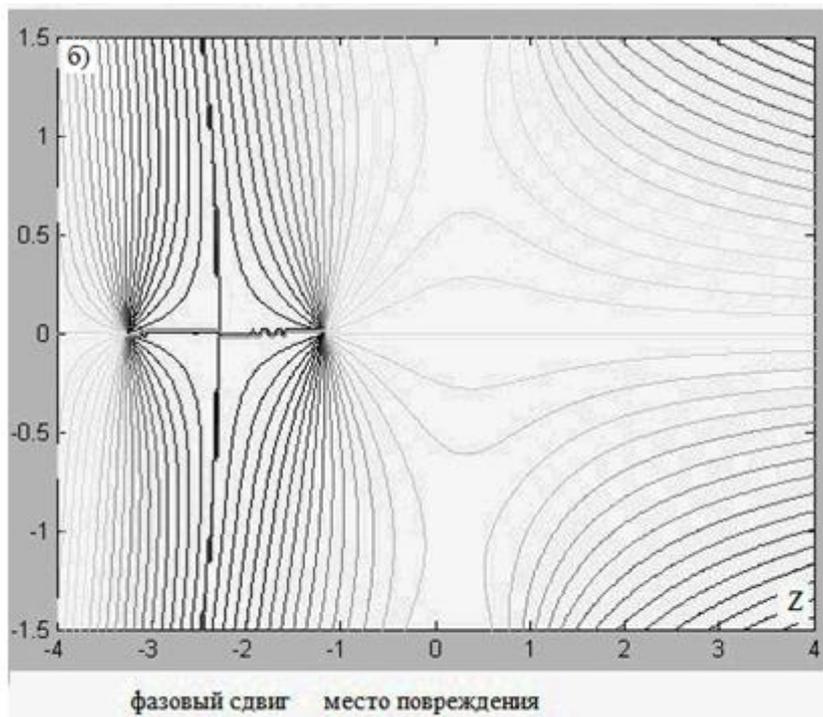


Рисунок 3 - Конфигурации электромагнитного поля над местом повреждения КЛ при малом переходном сопротивлении места повреждения

Графическая информация, отображаемая на экране ноутбука оператора, помогает однозначно определить не только место повреждения КЛ, но и классифицировать причину данного повреждения.

Список используемой литературы:

1. Математика для инженеров: поиск оптимального сочетания интерактивных и традиционных методов / Е. А. Беляускене, О. Н. Имас, С. В. Кривяков, Е. В. Царева // Высшее образование в России. – 2020. – Т. 29, № 7. – С. 22-31. – DOI 10.31992/0869-3617-2020-29-7-22-31. – EDN JGXDGW.
2. Линец, Г. И. Теория электрических и радиотехнических цепей : Учебное пособие / Г. И. Линец, В. И. Никулин. – Ставрополь : Общество с ограниченной ответственностью «Издательско-информационный центр «Фабула», 2021. – 258 с. – ISBN 978-5-91903-263-2. – DOI 10.52268/9785919032632. – EDN RVCGWB.

3. Баев, В. К. Теория колебаний : Учебное пособие / В. К. Баев. – 2-е изд.. – Москва : Издательство Юрайт, 2020. – 1 с. – (Высшее образование). – ISBN 978-5-534-08527-3. – EDN FLAQVN.

4. Самарханова, Р. И. Методы диагностики мест повреждения кабельных линий / Р. И. Самарханова, Д. М. Валиуллина // XVI Всероссийская открытая молодежная научно-практическая конференция «Диспетчеризация и управление в электроэнергетике», Казань, 20–21 октября 2021 года. – Казань: Общество с ограниченной ответственностью «Издательско-полиграфическая компания «Бриг», 2022. – С. 207-208. – EDN ZFEEDH.

Информация об авторах

Колодченко Н. В. – студент группы 8Э-31, Павличенко И. А. – аспирант кафедры ЭПП, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», РФ, Алтайский край, г. Барнаул.

Ссылка для цитирования

Колодченко, Н. В. Определение вида повреждения силового кабеля по конфигурации электромагнитного поля / Н. В. Колодченко, И. А. Павличенко // Энерджинет. 2023. № 1. URL: <http://nopak.ru/231-052> (дата обращения: 18.11.2023).

