УДК 622.62: 621.317.33

М.М. Белый, канд. техн. наук
(Украина, Днепропетровск, Национальный горный университет)
В.В. Коренский, канд. техн. наук
(Россия, Мирный, филиал Якутского государственного университета)
С.Г. Киров,
(Россия, Мирный, ЦПК АК “АЛРОСА”

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КООРДИНАТЫ УТЕЧКИ В КОНТАКТНОЙ СЕТИ ПО ПАРАМЕТРАМ ПРИРАЩЕНИЯ ВХОДНЫХ ПРОВОДИМОСТИ И СОПРОТИВЛЕНИЯ

Возможность определения координаты повреждения изоляции относительно входных зажимов контактной сети вытекает из анализа трансформации параметров утечки сетью. В работе [1] в частности, показано, что при обеспечении в контролируемом ответвлении режима бегущей волны, аргумент проводимости утечки, приведенной к входным зажимам сети определяется из выражения

$$tg\psi_{вх} = \frac{|Y_{вх}|\sin\varphi_{вх}}{|Y_{вх}|\cos\varphi_{вх} - |Y_c|}. \qquad (1)$$

Учитывая, что при существовании концевой нагрузки, равной волновому сопротивлению по оперативному току справедлива зависимость

$$Y_{вх} = \frac{1}{Z_c}\sqrt{\frac{cn^2(\beta x + c) + \cos 2\alpha x}{cn^2(\beta x + c) - \cos 2\alpha x}}, \qquad (2)$$

тогда

$$tg\varphi_{вх} = -\frac{\sin 2\alpha x}{sn2(\beta x + c)}, \qquad (3)$$

где: $c = \frac{1}{2} l_n \frac{Z_c + 2R_y}{Z_c}$, а x - координата утечки (расстояние от входных зажимов контактной сети).

Выражение для тангенса аргумента приращения входной проводимости контактной сети, нагруженной по оперативному току на волновое сопротивление, при существовании на защищаемом участке повреждения изоляции можно записать так:

$$tg\psi = \frac{\sqrt{cn2(\beta x + c) + \cos 2\alpha x}\,\cdot}{\sqrt{cn2(\beta x + c) + \cos 2\alpha x}\cos arctg\left[-\frac{\sin 2\alpha x}{sn(\beta x + c)}\right] -} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{\cdot \sin arctg\left[-\frac{\sin 2\alpha x}{\sin(\beta x + c)}\right]}{-\sqrt{cn2}(\beta x + c) - \cos 2\alpha x}. \qquad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что аргумент точечной утечки R_y, приведенной к входным зажимам контактной сети, является функцией координаты утечки. При малых проводимостях утечки $R_y >> Z_c$ с достаточной для практического использования точностью он стремится к виду

$$tg\psi = -tg 2\alpha x \Rightarrow x = \left|\frac{\psi}{2\alpha}\right|. \qquad (5)$$

Таким образом расстояние от входных зажимов контактной сети до места повреждения изоляции однозначно определяется аргументом приращения проводимости контактной сети, измерение которого не вызывает затруднений.

Полезность зависимости (5), заключающаяся в ее универсальности (возможность применения в воздушных и кабельных силовых цепях, в линиях связи и т.д.), однако ее сложность, затрудняет анализ погрешностей определения x при изменяющемся уровне утечки, а также, при утечках соизмеримых с волновым сопротивлением линии и т.д. Это является причиной того, что для анализа рассматриваемых вопросов была выполнена самостоятельная исследовательская работа [1].

Здесь в частности, параметры приращения входной проводимости

$$\Delta Y_{вх} = Y_{вх} - Y_c = \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{Z_2 + Z_c cth\gamma x}{Z_2 \cdot cth\gamma x + Z_c} - \frac{1}{Z_c}, \qquad (6)$$

где Z_2 представляет собой нагрузку отрезка контактной сети от ее входных зажимов до места возникновения сосредоточенной утечки. Учитывая, что входное сопротивление участка контактной сети за утечкой при существовании согласованной концевой нагрузки всегда равно Z_c, Z_2 определяется как

$$Z_2 = \frac{Z_c Z_y}{Z_c + Z_y}$$

или при $Z_y = R_y$

$$Z_2 = \frac{Z_c R_y}{Z_c + R_y}. \qquad (7)$$

Определяя таким образом приращение входной проводимости и выделяя ее активную (8) и реактивную (9) составляющие получим:

$$\Delta G_{вх} = \frac{R_c\left[(R_c - R_2)^2 \cdot (sh\beta x - ch2\beta x)\right] +}{\left(R_c{}^2 + R_2{}^2\right) \cdot \left[\left(R_c{}^2 + R_2{}^2\right)ch2\beta x + \right.} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ D\left[R_c \cdot \cos(2\alpha x - \delta) - x_c \cdot \sin(2\alpha x + \delta)\right]}{\left. + 2R_2 R_c \cdot sh2\beta x - D\cos(2\alpha x - \delta)\right]} \qquad (8)$$

$$\Delta B_{вх} = \frac{X_c\left[(R_c - R_2)^2 \cdot (sh2\beta x - ch2\beta x)\right] +}{\left(R_2{}^2 + X_0{}^2\right) \cdot \left[\left(R_c{}^2 + R_2{}^2\right)ch2\beta x)\right] +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ D\left[X_c \cdot \cos(2\alpha x - \delta) - R_c \cdot \sin(2\beta x + \delta)\right]}{+ \left[2R_2 R_c \cdot sh2\beta x - D\cos(2\alpha x - \delta)\right]}. \qquad (9)$$

По их соотношению определяют параметры аргумента приращения входной проводимости

$$tg\Delta\varphi_y = \frac{X_c\left[(R_c - R_2)^2 \cdot (sh2\beta x - ch2\beta x)\right] +}{R_c\left[(R_c + R_2)^2 \cdot (sh2\beta x - ch2\beta x)\right] +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ D\left[X_c \cdot \cos(2\alpha x - \delta) - R_c \cdot \sin(2\alpha x + \delta)\right]}{+ D\left[R_c \cdot \cos(2\alpha x - \delta) - X_c \cdot \sin(2\alpha x + \delta)\right]}. \qquad (10)$$

Здесь и выше: R_c и X_c - соответственно активная и реактивная составляющая волнового сопротивления контактной сети; R_2 и X_2 - активная и реактивная составляющие нагрузки отрезка контактной сети от входных зажимов до места утечки.

$$tg\delta = \frac{B_2}{A_2}, \quad D = \sqrt{A_2^2 + B_2^2}, \quad A_2 = R_2^2 + X_2^2 - R_c^2 - X_c^2, \quad B_2 = R_2 X_c - R_c X_2. \qquad (11)$$

Не ставя под сомнение полученные в [1,2] результаты, отметим очевидное – зависимость (10) нисколько не проще полученный ранее (4). При определенных допущениях: $\beta = 0$ и $Z_c = R_c$, а также ограничениях $R_y >> R_c$, можно показать, что и в этом случае наблюдается линейная зависимость между аргументом приращения входной проводимости контактной сети и координатной утечки, вызвавшей это приращение

$$tg\Delta\varphi_y = -tg2\alpha x \Rightarrow x = \left|\frac{\Delta\varphi_y}{2\alpha}\right|. \qquad (12)$$

С целью упрощения исходных выражений (1) и (10), приводящих к простой и удобной зависимости (12), и придания этим выражениям наглядности и прозрачности, считаем необходимым ввести допущения, не вносящие принципиальных изменений в исходные формулы, представляющие входную проводимость контактной сети и ее изменения. Прежде всего, будем отождествлять контактную сеть с линией без потерь. Тогда

$$\Delta Y_{вх} = Y_{вх} - \frac{1}{Z_c}\left(\frac{Z_c \cos\alpha x + jZ_2 \sin\alpha x}{Z_2 \cos\alpha x + jZ_c \sin\alpha x} - 1\right) =$$

$$= \frac{1}{Z_c}\left[\frac{(Z_c - Z_2)\cdot Z_2 \cos^2\alpha x - (Z_c - Z_2)Z_c \sin^2\alpha x}{Z_2 \cos^2\alpha x + Z_c^2 \sin^2\alpha x} - \to\right. \tag{13}$$

$$\left.\to - j\frac{(Z_c^2 - Z_2^2)\sin x \cdot \cos\alpha x}{Z_2^2 \cos^2\alpha x + Z_c^2 \sin^2\alpha x}\right].$$

Представляя комплекс приращений входной проводимости в показательной форме:

$$\Delta Y_{вх} = \Delta\psi_{вх} e^{j\psi\Delta y}, \tag{15}$$

его аргумент с учетом (15) определится:

$$tg\psi_{\Delta y} = \frac{(Z_c - Z_2)\sin\alpha x \cos\alpha x}{Z_2 \cos^2\alpha x - Z_c \sin^2\alpha x}. \tag{16}$$

Полученное выражение является простым, наглядным и удобным для анализа. В частности, при $R_y >> Z_c$, когда $R_2 \approx Z_c$, имеем

$$tg\psi_{\Delta y} = -\frac{2\sin\alpha x \cos\alpha x}{\cos^2\alpha x - \sin^2\alpha x} = -tg 2\alpha x. \tag{17}$$

Таким образом, аргумент приращения входной проводимости контактной сети при наличии высокоомной сосредоточенной активной утечки является линейной функцией ее координаты. Знак « - » объясняется тем, что конец вектора входной проводимости линии, нагруженной волновым сопротивлением при перемещении по ней сосредоточенной активной утечки описывает почти окружность радиуса $\frac{1}{R_y}$ вокруг точки с координатами $(Y_c, 0)$. Целесообразность применения смягчающего «почти» ослабевает по мере усиления неравенства $R_y >> R_c$. Однако, при любом R_y нагрузка отрезка линии до утечки всегда меньше волнового сопротивления, так как $\frac{R_y Z_c}{R_y + Z_c} < Z_c$. Следовательно, этот отрезок по энергетическому режиму находится ближе к короткому замыканию и его проводимость носит активно-индуктивный характер, при котором реактивная составляющая проводимости отрицательна. То есть конец вектора $Y_{вх}$ описывает «почти» окружность радиуса $\frac{1}{R_y}$ вокруг точки с координатами $(Y_c, 0)$ из точки $[(Y_c + Y_y), 0]$ по часовой стрелке. При перемещении утечки по линии на половину длины волны оперативного напряжения концом этого вектора описывается полная окружность..

Аргумент приращения входного сопротивления также является функцией координаты утечки и может быть использован для ее определения.

Воспользовавшись аналогичными выкладками как и в ранее приведенных выводах получим:

$$tg\psi_{\Delta Z} = -\frac{(Z_c - Z_2)\sin\alpha x \cos\alpha x}{Z_2\cos^2\alpha x - Z_2\sin^2\alpha x}\ , \qquad (18)$$

что при $R_y >> Z_c \ \Rightarrow \ R_2 \approx Z_c$ дает:

$$tg\,\psi_{\Delta Z} = -tg\,2\alpha x. \qquad (19)$$

Внешнее сходство выражений для тангенсов аргументов приращений входной проводимости и входного сопротивления отнюдь не означает идентичности изменения самих аргументов этих величин. При $R_y >> Z_c$ аргумент приращения входной проводимости изменяется в функции координаты утечки от 0^0 по часовой стрелке, т.е. в сторону отрицательных углов. При этих же условиях аргумент приращения входного сопротивления изменяется в функции координаты утечки от 180^0 тоже по часовой стрелке, т.е. конец вектора $Z_{вх}$ описывает «почти» окружность радиуса $\frac{Z_c^{\ 2}}{Z_{c+R_y}}$ вокруг точки $(Z_c, 0)$ из точки $\left[\left(\frac{Z_c R_y}{Z_c + R_y}\right), 0\right]$ по часовой стрелке, описывая полную окружность при перемещении утечки по линии на половину длины волны оперативного напряжения.

ВЫВОДЫ

1. При возникновении в консольном ответвлении контактной сети, нагруженной по оперативному току волновым сопротивлением изменение его входного сопротивления определяется как параметрами утечки, так и координатой утечки, отсчитываемой от начала ответвления.

2. Аргумент приращения входной проводимости контактной сети когда $R_y >> Z_c$ является практически линейной и позволяет индицировать расстояние от начала контактной сети до утечки с точностью до 2-4 изоляторов подвески. При низкоомных утечках $R_y \leq Z_c$ эта зависимость становится существенно нелинейной и при $R_y = 0$ погрешность нелинейности достигает до 25 % длины контролируемого ответвления.

3. Зависимость аргумента приращения входного сопротивления контактной сети также является функцией координаты утечки с теми же погрешностями. Основным отличием зависимости $\arg\Delta Z_{вх}(X)$ от зависимости $\arg\Delta Y_{вх}(X)$ является сдвиг директрисы на π и смещение максимумов нелинейных искажений на $\frac{\lambda}{4}$ по длине контролируемого участка контактной сети.

4. Погрешности определения координаты утечки, обусловленные нелинейностью определяющих их зависимостей могут быть уменьшены до любого предварительно заданного уровня путем реализации алгоритма обработки измерительной информации, основанного на многократном последовательном усреднении результатов измерений с разграничением приоритетов стадий усреднения по диапазону контролируемых значений.

Список литературы

1. Коренский В.В. Разработка устройства для определения места повреждения в контактных сетях электровозной откатки карьеров: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Д., 1980. – 23 с.
2. А.с. № 759993. СССР, М. $К^{3}_{Л.}$, G 01R31/08// G 01R31/11. Способ определения места возникновения токов утечки в силовых сетях / В.В. Коренский, В.А. Бунько, А.И. Трач // Открытия. Изобретения. – 1980. – № 32 – С. 25.