ИЗВЕСТИЯ
ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО
Том 76 ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА 1954 г.

ГРАФОАНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЬСОВЫХ ЦЕПЕЙ

В. М. РАЗИН

В статье предлагается для практического использования графоаналитический способ определения электрических параметров рельсовых цепей постоянного и переменного тока по данным измерений методом холостого хода и короткого замыкания.

1. Рельсовая цепь постоянного тока

При измерении электрических параметров рельсовых цепей постоянного тока по методу холостого хода и короткого замыкания на питающем конце рельсовой цепи измеряются напряжение и ток как при размыкании на релейном конце (U_x и I_x), так и при коротком замыкании на нем (U_k и I_k). По данным этих измерений определяются величины входных сопротивлений рельсовой цепи при холостом ходе и коротком замыкании на приемном конце:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x}, \tag{1}$$

$$R_k = \frac{U_k}{I_k}. \tag{2}$$

Если сопротивление балласта велико по сравнению с сопротивлением рельсов, то для коротких рельсовых цепей с достаточной для практических целей точностью принимают:

$$r_p = \frac{R_k}{l}, \tag{3}$$

$$r_б = R_x\, l, \tag{4}$$

где r_p — удельное сопротивление рельсов в *ом/км*,
$r_б$ — удельное сопротивление балласта в *ом/км*,
l — длина рельсовой цепи в *км*.

Если удельное сопротивление балласта мало или если рельсовая цепь имеет большую длину, то расчет ведется обычно по следующей схеме [1; 2].

Волновое сопротивление рельсовой цепи определяется выражением:

$$R_в = \sqrt{R_k R_x}. \tag{5}$$

Величину постоянной затухания находим из формулы:

$$\gamma = \frac{\operatorname{arth} \sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}{l} = \frac{1}{l}\,\frac{1}{2} \ln \frac{1 + \sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}{1 - \sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}. \tag{6}$$

Тогда искомые удельные сопротивления рельсов и балласта определяются простыми соотношениями:

$$r_p = R_в \gamma \tag{7}$$

$$r_б = \frac{R_в}{\gamma}. \tag{8}$$

Для вычисления параметров в этом случае требуется наличие таблиц логарифмов или гиперболических функций, что иногда представляет некоторое неудобство. Путем несложных преобразований и заменой табличных данных графической зависимостью расчетные формулы могут быть приведены к более удобному для расчетов виду. Используя соотношения (5) и (6), можно равенства (7) и (8) представить в виде:

$$r_p = \sqrt{R_k R_x}\,\frac{\operatorname{arth}\sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}{l} = \frac{R_k}{l}\,\frac{1}{\sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}\cdot\operatorname{arth}\sqrt{\frac{R_k}{R_x}}. \tag{9}$$

$$r_б = \frac{l\sqrt{R_k R_x}}{\operatorname{arth}\sqrt{\frac{R_k}{R_x}}} = \frac{R_x l}{\frac{1}{\sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}\operatorname{arth}\sqrt{\frac{R_k}{R_x}}}. \tag{10}$$

Обозначим

$$\frac{R_k}{R_x} = n, \quad \text{где} \quad n \leqslant 1. \tag{11}$$

Тогда

$$r_p = \frac{R_k}{l}\,\frac{1}{\sqrt{n}}\operatorname{arth}\sqrt{n} = \frac{R_k}{kl}, \tag{12}$$

$$r_б = \frac{R_x l}{\frac{1}{\sqrt{n}}\operatorname{arth}\sqrt{n}} = R_x \cdot l \cdot k. \tag{13}$$

Здесь принято

$$k = \frac{\sqrt{n}}{\operatorname{arth}\sqrt{n}}. \tag{14}$$

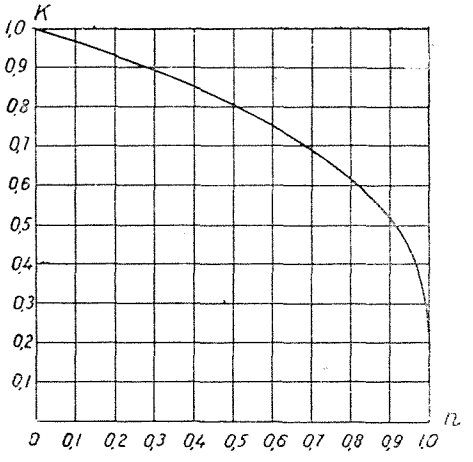
Коэффициент $k = f(n)$ в формулах (11) и (12) является в некотором роде поправочным коэффициентом к формулам (3) и (4), учитывающим влияние утечки тока через балласт. Зависимость $k = f(n)$ графически представлена на фиг. 1. Таким образом, определение параметров рельсовой цепи постоянного тока сводится к следующим простым вычислительным операциям. По данным измерений по методу холостого хода и короткого замыкания вычисляем из формул (1) и (2) R_x и R_k. Затем из формулы (11) находим величину n. После этого из графика фиг. 1 определяем величину поправочного коэффициента k для найденного значения параметра n.

В итоге искомые величины удельных сопротивлений рельсов и балласта определяются из соотношений (12) и (13).

2. Рельсовая цепь переменного тока

Для рельсовой цепи переменного тока, кроме определения удельных сопротивлений рельсов и балласта на переменном токе, необходимо также определить электрический угол сопротивления рельсов, обусловленный

наличием индуктивного сопротивления рельсов переменному току. Предположим, что измерение рельсовой цепи переменного тока производится по методу холостого хода и короткого замыкания с применением фазометра. В этом случае с помощью вольтметра, амперметра и фазометра измеряются напряжение, ток и угол сдвига фаз между током и напряжением на питающем конце как при коротком замыкании на приемном конце (U_k, I_k и $\varphi_к$), так и при размыкании цепи реле на нем (U_x, I_x и φ_x). Дальнейшие вычисления ведутся по следующей схеме [1; 2; 3]. Определяем входное сопротивление рельсовой цепи при холостом ходе и коротком замыкании:



Фиг. 1

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}, \tag{15}$$

$$Z_x = \frac{U_x}{I_x}. \tag{16}$$

Удельное сопротивление рельсов

$$Z_p = \sqrt{Z_k Z_x (\beta^2 + \alpha^2)}. \tag{17}$$

Удельное сопротивление балласта

$$Z_б = \sqrt{\frac{Z_k Z_x}{\beta^2 + \alpha^2}} = \frac{Z_k Z_x}{Z_p}. \tag{18}$$

Угол сопротивления рельсов

$$\varphi_p = \varphi_x + \varphi_k.$$

Величины коэффициентов α и β определяются из соотношений:

$$th\, 2\beta l = \frac{2\sqrt{Z_k Z_x}}{Z_к + Z_x} \cos\left(\frac{\varphi_к - \varphi_x}{2}\right), \tag{19}$$

$$\operatorname{tg} 2\alpha l = \frac{2\sqrt{Z_к Z_x}}{Z_x - Z_к} \sin\left(\frac{\varphi_к - \varphi_x}{2}\right). \tag{20}$$

Здесь l — длина рельсовой цепи.
Если найдена величина α, то величина β проще определяется из уравнения:

$$\beta = \frac{\alpha}{\operatorname{tg}\frac{\varphi_к + \varphi_x}{2}}. \tag{21}$$

Как это видно из приведенных выше выражений, наибольшую трудность здесь представляет вычисление коэффициентов α и β. При использовании номограмм гиперболического тангенса от комплексного аргумента величины α и β определяются следующим образом [1]. Модуль величины $\operatorname{th}\gamma l = \operatorname{th}(\beta l + j\alpha l)$ равняется:

$$T = \sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}}, \tag{22}$$

аргумент

$$\varphi_t = \frac{\varphi_к - \varphi_x}{2}. \tag{23}$$

Отсюда имеем:

$$\operatorname{th}\gamma l = \operatorname{th}(\beta l + j\alpha l) = T e^{j\varphi t}. \tag{24}$$

По данным этого уравнения на номограммах гиперболического тангенса от комплексного аргумента, имеющихся в литературе [1], находим αl и βl. После этого вычисляем удельное сопротивление рельсов

$$Z_p = \frac{\sqrt{Z_к Z_x [(\alpha l)^2 + (\beta l)^2]}}{l}. \tag{25}$$

Удельное сопротивление балласта

$$Z_б = \frac{Z_к Z_x}{Z_p}.$$

Угол сопротивления рельсов

$$\varphi_p = \varphi_x + \varphi_к. \tag{26}$$

Процесс вычисления несколько упрощается, однако вычисление по формуле (25) при большом количестве расчетов вносит некоторое затруднение. Кроме этого, необходимо наличие определенного навыка в пользовании номограммами для получения достаточной точности вычислений.

Легко показать, что расчетные уравнения для рельсовой цепи переменного тока могут быть приведены к виду уравнений (12) и (13), где величина поправочного коэффициента k может быть определена графически.

В самом деле, определяя значения α и β из уравнений (19) и (20), подставляя эти значения в уравнения (17) и (18) и производя несложные преобразования, будем иметь:

$$Z_p = \frac{Z_к}{l} \times$$

$$\sqrt{\operatorname{ar^2th}\left[\frac{2\sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}}}{1+\frac{Z_к}{Z_x}}\cos\left(\frac{\varphi_к-\varphi_x}{2}\right)\right]+\operatorname{ar^2tg}\left[\frac{2\sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}}}{1-\frac{Z_к}{Z_x}}\sin\left(\frac{\varphi_к-\varphi_x}{2}\right)\right]} \Big/ 2\sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}} \tag{27}$$

$$Z_б = Z_x l \times$$

$$2\sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}} \Big/ \sqrt{\operatorname{ar^2th}\left[\frac{2\sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}}}{1+\frac{Z_к}{Z_x}}\cos\left(\frac{\varphi_к-\varphi_x}{2}\right)\right]+\operatorname{ar^2tg}\left[\frac{2\sqrt{\frac{Z_к}{Z_x}}}{1-\frac{Z_к}{Z_x}}\sin\left(\frac{\varphi_к-\varphi_x}{2}\right)\right]}. \tag{28}$$

Вводя обозначения:

$$n = \frac{Z_к}{Z_x}, \tag{29}$$

$$\varphi = \frac{\varphi_к - \varphi_x}{2}, \tag{30}$$

$$k = \frac{2\sqrt{n}}{\sqrt{\operatorname{ar^2th}\left(\frac{2\sqrt{n}}{1+n}\cos\varphi\right)+\operatorname{ar^2tg}\left(\frac{2\sqrt{n}}{1-n}\sin\varphi\right)}}, \tag{31}$$

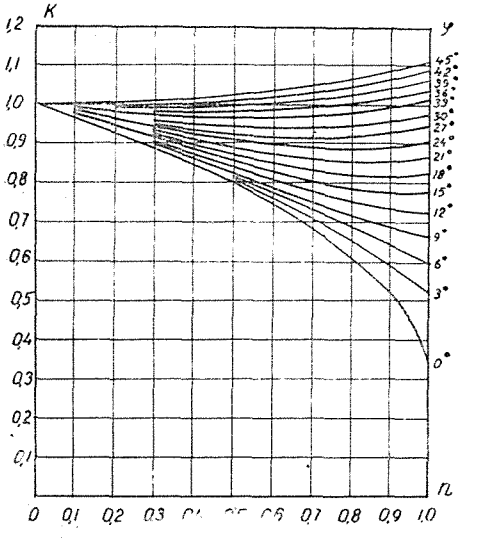
получаем:

$$Z_p = \frac{Z_к}{k\,l}, \tag{32}$$

$$Z_б = Z_x \,.\, kl. \tag{33}$$

Зависимость $k = f(n_1\varphi)$ представлена графически на фиг. 2.

Таким образом, и в случае рельсовой цепи переменного тока вычисление удельных сопротивлений рельсов и балласта сводится к простейшим математическим операциям. На основании данных измерений вычисляем $Z_к$ и Z_x по формулам (15) и (16), затем по формулам (29) и (30) находим значение вспомогательных параметров n и φ. Для вычисленных значений параметров n и φ из графиков фиг. 2 находим величину поправочного коэффициента k и по формулам (32) и (33) вычисляем искомые величины удельных сопротивлений рельсов и балласта. Угол сопротивления рельсов подсчитывается по формуле (26).



Фиг. 2

Как видно из вышеизложенного, предлагаемый метод подсчета параметров рельсовых цепей постоянного и переменного тока значительно упрощает вычислительную работу, отличается простотой и наглядностью при вполне достаточной для практических целей точности и не требует применения для вычислений математических таблиц.

Все это вместе взятое может дать значительную экономию времени при проведении большого количества вычислений подобного рода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брылеев А. М. и Рязанцев Б. С. Рельсовые цепи. Трансжелдориздат, 1952.
2. Вахнин М. И. Перегонные устройства СЦБ. Трансжелдориздат, 1947.
3. Пономаренко Л. П. Рельсовые цепи переменного тока, 27-й сборник НИИСС НКПС, 1933