

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЯГОВЫХ ЛИНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА НА ШАХТНЫЕ ЛИНИИ СВЯЗИ

И. Ф. Огороднейчук, Г. П. Верещагин, А. И. Таран

Харьков

Эксплуатация высокочастотных электровозов, внедряемых в настоящее время на угольных шахтах, выявила целый ряд их преимуществ по сравнению с электровозами аккумуляторной откатки.

Однако уже при испытании опытных образцов было установлено, что тяговые линии высокочастотного электровоза создают помехи в шахтных линиях связи. Эти помехи обусловлены:

а) совпадением рабочей частоты высокочастотного электровоза ($f = 3000$ гц) и передаваемого спектра частот телефонного сигнала;

б) значительными величинами линейных токов тяговых кабелей высокочастотного электровоза (до 200 а);

в) параллельным пробегом тяговых линий и кабелей связи при расстоянии между ними от 0,6 до 1,0 м.

Физическую сущность явления взаимного влияния можно объяснить следующим образом. При прохождении тока по какой-либо цепи она образует вокруг себя электромагнитное поле, воздействующее на цепи, находящиеся поблизости. Влияющая цепь создает помехи в приемниках, включенных в цепи, подверженные влиянию, вследствие наличия между обеими цепями магнитных и емкостных связей.

В действительности не существуют обособленно ни чисто магнитные, ни чисто электрические поля — оба они являются составными частями электромагнитного поля. Однако для упрощения удобно рассматривать отдельно влияния, возникающие от воздействия магнитного и электрического полей.

Величина, характеризующая магнитное влияние (магнитная связь), представляет собой

$$N_{12} = r_{12} + j\omega M_{12} = -\frac{\dot{E}_2}{\dot{I}_1},$$

где r_{12} — активная составляющая магнитной связи;

M_{12} — индуктивная связь;

$\dot{E}_2$ — эдс., наведенная в подверженной влиянию цепи;

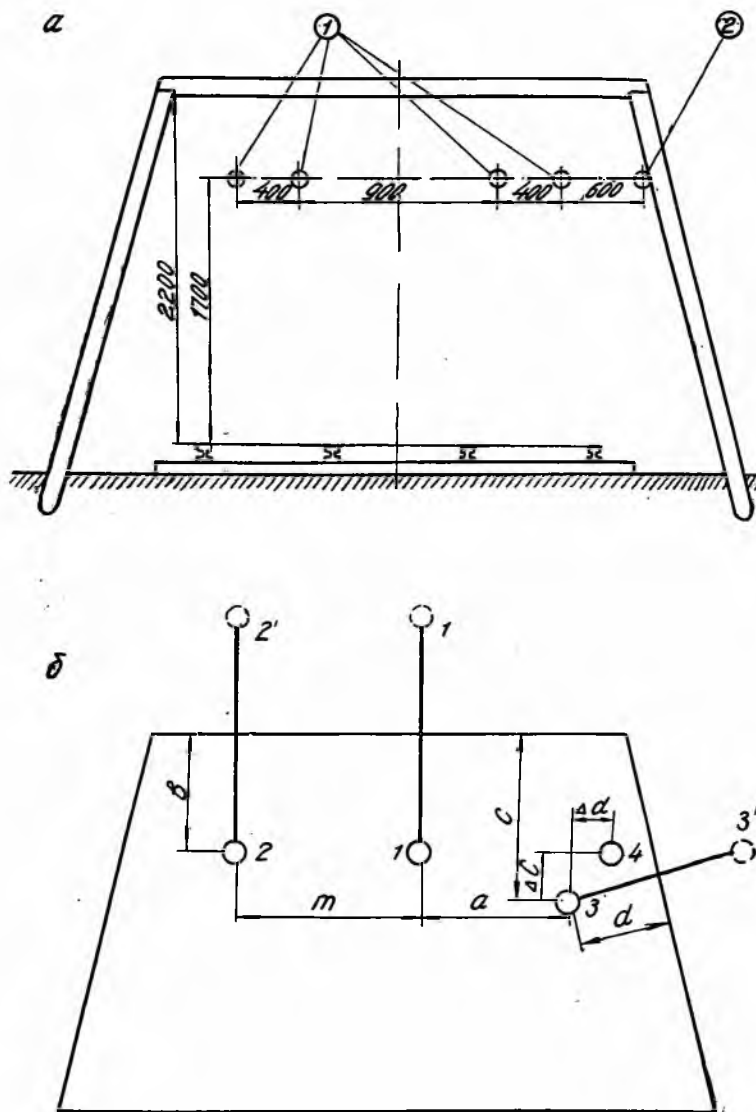
$\dot{I}_1$ — ток во влияющей цепи.

Величина, характеризующая электрическое влияние (электрическая связь), выражается формулой

$$K_{12} = g_{12} + j\omega C_{12} = \frac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1},$$

где g_{12} — активная составляющая электрической связи;
 C_{12} — емкостная связь.

Таким образом, степень магнитного влияния зависит от величины тока во влияющей цепи и от магнитной связи между цепями. Магнитная же связь зависит от взаимного расположения цепей, состояния изоляции между ними и других причин.



Степень электрического влияния в свою очередь зависит от напряжения влияющей цепи, от взаимного расположения цепей и от состояния изоляции между цепями. При указанном на рис. 1, а и 1, б расположении проводов влияющей и подверженной влиянию цепей основной удельный вес имеет магнитное влияние, электрическое же влияние гораздо меньше.

Величина магнитной связи $N_{12} = r_{12} + j \omega M_{12}$ в основном определяется своей индуктивной составляющей. На величину наводимого тока

в подверженной влиянию цепи, кроме коэффициентов электрической связи K_{12} и магнитной связи N_{12} , оказывает большое влияние состояние самой линии связи, т. е. состояние ее изоляции, асимметрия цепи по сопротивлению и по емкости. Наводимые напряжения и ток в любой точке цепи, подверженной влиянию, выразим общими уравнениями электромагнитного влияния:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 - K_2 \dot{U}_1 &= (\dot{U}_{2н} - K_2 \dot{U}_1) \operatorname{ch} \gamma_2 x - Z_2 (\dot{I}_{2н} + K_1 \dot{I}_1) \operatorname{sh} \gamma_2 x; \\ \dot{I}_2 + K_1 \dot{I}_1 &= (\dot{I}_{2н} + K_1 \dot{I}_1) \operatorname{ch} \gamma_2 x - \frac{\dot{U}_{2н} - K_2 \dot{U}_1}{Z_2} \operatorname{sh} \gamma_2 x, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\dot{U}_2, \dot{I}_2$ — векторные значения напряжения и тока в цепи, подверженной влиянию (линии связи);

$\dot{U}_1, \dot{I}_1$ — векторные значения напряжения и тока во влияющей цепи (силовой линии);

$\dot{U}_{2н}, \dot{I}_{2н}$ — векторные значения напряжения и тока подверженной влиянию цепи в ее начале;

$Z_2 = \sqrt{\frac{R_2 + j\omega L_2}{G_2 + j\omega C_2}}$ — полное сопротивление подверженной влиянию цепи;

$\Gamma_2 = \sqrt{(R_2 + j\omega L_2)(G_2 + j\omega C_2)}$ — постоянная распространения подверженной влиянию цепи;

$$K_1 = \frac{r_{12} + j\omega M_{12}}{R_2 + j\omega L_2} = \frac{N_{12}}{R_2 + j\omega L_2};$$

$$K_2 = \frac{g_{12} + j\omega C_{12}}{G_2 + j\omega C_2} = \frac{K_{12}}{G_2 + j\omega C_2}.$$

Обычно величины g_{12} и r_{12} значительны, следовательно,

$$K_1 = \frac{j\omega M_{12}}{R_2 + j\omega L_2}; \quad K_2 = \frac{j\omega C_{12}}{G_2 + j\omega C_2}.$$

Формулу для электрического влияния получим при $\dot{I}_1 = 0$:

$$\begin{aligned} U_2 - K_2 \dot{U}_1 &= (\dot{U}_{2н} - K_2 \dot{U}_1) \operatorname{ch} \gamma_2 x - Z_2 \dot{I}_{2н} \operatorname{sh} \gamma_2 x; \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_{2н} \operatorname{ch} \gamma_2 x - \frac{\dot{U}_{2н} - K_2 \dot{U}_1}{Z_2} \operatorname{sh} \gamma_2 x. \end{aligned} \quad (2)$$

Эта формула позволяет определить ток и напряжение мешающего электрического влияния в любой точке подверженной влиянию цепи.

Аналогично при $\dot{I}_1 \rightarrow 0$ и $\dot{I}_1 \neq 0$ получаем уравнение для определения напряжения и тока мешающего магнитного влияния в любой точке цепи:

$$\begin{aligned} \dot{U}_2 &= \dot{U}_{2н} \operatorname{ch} \gamma_2 x - Z_2 (\dot{I}_{2н} + K_1 \dot{I}_1) \operatorname{sh} \gamma_2 x; \\ \dot{I}_2 + K_1 \dot{I}_1 &= (\dot{I}_{2н} + K_1 \dot{I}_1) \operatorname{ch} \gamma_2 x - \frac{\dot{U}_{2н}}{Z_2} \operatorname{sh} \gamma_2 x. \end{aligned} \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) помогут нам рассмотреть электрическое и магнитное влияние в различных случаях.

а. Электрическое мешающее влияние. Мешающий ток в однопроводной цепи

$$\dot{I} = -j\omega C_{12} \dot{U}_{вл},$$

где C_{12} — электрическая (емкостная) связь;

$\dot{U}_{вл}$ — напряжение влияющей цепи.

Мешающий ток в телефонной цепи возникает вследствие геометрической и электрической асимметрий телефонной цепи.

Первая компонента

$$j' = \frac{-j\omega C_{12}\dot{U}_{вл}}{2}, \text{ или } \dot{I}' = j \frac{(\dot{U}_3 - \dot{U}_4)\omega C_K l}{4},$$

где $\dot{U}_3, \dot{U}_4$ — потенциалы (или напряжения по отношению к земле) проводов линии связи;

C_K — километрическая емкость провода связи по отношению к земле;

l — длина линии связи.

Вторая компонента мешающего тока зависит от электрической асимметрии линии связи и выражается следующим образом:

$$I'' = \frac{I \Delta L}{2(G_3 + G_4)},$$

где G_3, G_4 — проводимость изоляции проводов связи;

ΔG — асимметрия по изоляции.

Очевидно, для нахождения обеих составляющих мешающего тока необходимо определить величину C_{12} либо потенциалы проводов связи.

Из уравнений Максвелла для указанного на рис. 2 расположения проводов $U_1 = K(q_1\alpha_{11} + q_2\alpha_{12})$, $U_2 = K(q_1\alpha_{12} + q_2\alpha_{22})$, $U_3 = K(q_1\alpha_{13} + q_2\alpha_{23} + q_3\alpha_{33})$ находим величину U_3 .

Полагая, что $q_1 = -q_2$, $\alpha_{11} \approx \alpha_{22}$ и $\alpha_{12} \approx \alpha_{21}$, находим

$$U_{вл} = 2Kq_1(\alpha_{11} - \alpha_{12}).$$

Так как

$$C_{12} = -\frac{q}{U_{вл}} \text{ и } -q_3 = \frac{q_1(\alpha_{31} - \alpha_{32})}{\alpha_{33}},$$

находим

$$\begin{aligned} C_{12} &= \frac{\alpha_{31} - \alpha_{32}}{2K\alpha_{33}(\alpha_{11} - \alpha_{12})}; \\ U_3 &= \frac{\dot{I}}{j\omega C_3} = \frac{-j\omega C_{12}U_{вл}}{j\omega C_3} = -\frac{C_{12}}{C_3} U_{вл}, \\ C_3 &= \frac{1}{K\alpha_{33}}; \\ U_3 &= -\frac{\alpha_{31} - \alpha_{32}}{2(\alpha_{11} - \alpha_{12})} U_{вл}. \end{aligned}$$

Если принять $a = 600 \text{ мм}$; $b = 500 \text{ мм}$; $C \approx 500 \text{ мм}$; $m = 400 \text{ мм}$; $d = 20 \text{ мм}$; $r_1 = 12 \text{ мм}$ и $r_3 = 0,4 \text{ мм}$, определяем величину $2(\alpha_{11} - \alpha_{12}) \approx 7$. Обозначив величину $\alpha_{31} - \alpha_{32} = -h$, получаем

$$U_3 = U_{вл} \frac{h}{7}.$$

Величину h находим, разлагая в ряд Тейлора функцию $h = F(a, b)$. Для случая горизонтального расположения проводов линии получим

$$U_3 = \frac{2U_{вл}amAl_s(A^2 + B^2)}{7l_0B^4},$$

где l_s — длина неуравновешенного скрещивания участка;

l_0 — длина линии связи;

$$A = 2bc; \quad B = a^2 + b^2 + c^2.$$

Данная формула определяет потенциал одиночного провода связи. Зная U_3 для одиночного провода, можно найти величину $U_3 - U_4$ для телефонной цепи.

$$U_3 - U_1 = \frac{\partial U_3}{\partial a} \Delta a + \frac{\partial U_3}{\partial C} \Delta C.$$

$$\Delta a = m_1.$$

Для упрощения полагаем $\Delta C = 0$ (горизонтальное положение проводов), тогда

$$U_3 - U_4 = \frac{2U_{\text{вл}} m m_1 l_s A}{7l_0} \left[\frac{A^2}{B^3} (B - 8a^2) + \frac{1}{B^3} (B - 4a^2) \right].$$

Но так как

$$U_1 = i'Z = \frac{-j\omega C k l_0 Z (U_3 - U_4)}{4},$$

то мешающее влияние от геометрической асимметрии

$$U_1 = 0,85 \cdot 10^{-9} \omega Z U_{\text{вл}} F m m_1 b c l_s \left[\frac{A^2}{B^3} (B - 8a^2) + \frac{1}{B^3} (B - 4a^2) \right].$$

Напряжение от электрической асимметрии

$$U_2 = \frac{\Delta G \omega l_0 6 \cdot 10^{-9} Z U_3 F}{2(G_3 + G_4)}$$

или, подставив величину U_3 , получим

$$U_2 = \frac{1,7 \cdot 10^{-9} \omega \Delta G Z U_{\text{вл}} F b c m l_0 (A^2 + B^2)}{(G_3 + C_4)}.$$

Результирующее электрическое влияние в телефонной цепи

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}.$$

б. Магнитное мешающее влияние определяется влияющим током $I_{\text{вл}}$, т. е. током, протекающим в линии сильного тока. Этот ток наводит на каждом из проводов телефонной цепи продольную э. д. с.:

$$E_{\text{прод}} = -j2\omega M I_{\text{вл}} \frac{1}{\gamma} \text{th} \gamma \frac{l}{2},$$

где $\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$ — постоянная передачи телефонной цепи.

Обычно величина $\gamma \frac{l}{2}$ незначительна, поэтому с достаточной степенью точности можно утверждать, что $\text{th} \gamma \frac{l}{2} \approx \gamma \frac{l}{2}$, т. е.

$$E_{\text{прод}} = -j\omega M I_{\text{вл}} l.$$

Для кабельных линий при $l \leq 20$ км справедлива формула

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{a_{14} a_{23}}{a_{12} a_{24}} \text{ 2 н/км.}$$

Величина мешающего магнитного влияния обуславливается неравенством продольных э. д. с. E_1 и E_2 на каждом проводе, а также электрической асимметрией полных сопротивлений обоих проводов по отношению к земле. Первая составляющая U_1 определяется неуравновешенной длиной

скрещенной линии, которая, в свою очередь, равна длине участка скрещивания l_s :

$$U_1 = 0,5\omega M l_s I_{\text{экв}},$$

где M — коэффициент магнитной индукции между цепями при $f = 800$ гц
 $I_{\text{экв}}$ — эквивалентный мешающий ток.

Вторая составляющая, зависящая от электрической асимметрии линии связи, может быть вычислена по формуле

$$U_2 = 0,5\eta E = 0,5\eta\omega I_{\text{экв}} M_{300},$$

где η — коэффициент чувствительности телефонной цепи. Для воздушных линий связи $\eta \approx 0,008$.

Коэффициент M рекомендуется вычислять по формуле

$$M = 2 \cdot 10^{-4} \frac{m}{a} \text{ гн/км},$$

где m — расстояние между проводами линии связи;

a — расстояние между линиями.

Результирующее магнитное мешающее влияние равно:

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2}.$$

Примерный расчет величин электрического и магнитного влияний дает следующие результаты.

Исходные данные для расчета:

$$\Delta C = 0,1 \text{ мкф}; \quad g_1 = 200 \text{ мгом}; \quad g_2 = 180 \text{ мгом}$$

$$l = 1000 \text{ м}; \quad l_s = 60 \text{ м}; \quad U_{\text{вл}} = 1500 \text{ в};$$

$$I_{\text{вл}} = 200 \text{ а}; \quad M = 0,45 \text{ мкгн/км}.$$

1. Электрическое влияние: $U_1 = 3,43 \text{ мкв}$; $U_2 = 0,2 \cdot 10^{-12} \text{ мкв}$; $U_{\text{эл}} = 3,43 \text{ мкв}$.

2. Магнитное влияние: $U_1 = 13,6 \text{ мв}$; $U_2 = 56,5 \text{ мв}$; $U_{\text{маг}} = 58,5 \text{ мв}$.

Следовательно, результирующее наводимое напряжение обусловлено в основном мешающим магнитным влиянием $U \cong 58,5 \text{ мв}$, что соответствует уровню помехи по напряжению $P_{\text{пом}} = 2,6 \text{ неп}$.

Результат экспериментальных измерений при тех же условиях

$$P_{\text{пом}} = 2,7 + 3,0 \text{ неп}.$$

На основании проведенного теоретического анализа причин влияния тяговых линий высокочастотного электровоза на шахтные линии связи с проведенных примерных расчетов мешающего влияния можно сделать следующие выводы:

1. Основное значение в исследуемых условиях влияния тяговых линий высокочастотного электровоза на шахтные линии связи имеет магнитное влияние.

2. Основной удельный вес в величине результирующего мешающего влияния вносит та составляющая магнитного мешающего влияния, которая определяется электрической асимметрией цепи связи по отношению к земле.