

УДК 613.168:621.315.318

НАВЕДЕННЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СХОДЯЩИХСЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

© 2012 М.Ш. Мисриханов¹, С.Г. Мурзин¹, В.Н. Седунов², А.Ю. Токарский²

¹ ОАО «Федеральная Сетевая Компания Единой Энергетической Системы»

² Филиал ОАО «ФСК ЕЭС» - Магистральные электрические сети Центра

Поступила в редакцию 24.09.2012

В сходящихся воздушных линиях электропередачи магнитными полями, создаваемыми токами этих линий, наводятся продольные напряжения, под которые может попасть линейный персонал, проводящий работы на отключенной одной из этих линий. Значения продольных напряжений определяются по уравнениям, основанным на интеграле Карсона. Применение этих уравнений имеет ограничение по расстоянию между рассматриваемыми линиями, что приводит к очень большим погрешностям в вычислениях. В докладе предложена математическая модель, позволяющая рассчитывать продольные напряжения, наведенные магнитным полем в сходящихся воздушных линиях электропередачи.

Ключевые слова: сходящиеся однопроводные линии, магнитное поле, интеграл Карсона

При проведении ремонтных работ на сходящихся воздушных линиях (ВЛ) электропередачи для безопасности персонала необходимо знать величину напряжения (ЭДС), наведенного в проводе отключенной ремонтируемой ВЛ магнитным полем (МП), создаваемым токами работающей линии, т.к. при разъединении этого провода электромонтер может попасть под напряжение, равное величине ЭДС. С этой целью в расчете наведенной ЭДС используется уравнение [1] для сопротивления взаимной индуктивности между параллельными ВЛ, полученное на основе интеграла Карсона $J(r, \theta) = P + jQ$ для $r \leq 0,25$, где r и θ - параметры этого интеграла, и глубины проникновения электромагнитной волны в землю $\delta_3 = \sqrt{2\rho_3 / (\omega\mu_0)}$, где ρ_3 - удельное сопротивление земли, $\omega = 2\pi f$ - угловая частота, f - частота переменного тока в линии, μ_0 - магнитная постоянная. Это уравнение имеет ограничение в применении по расстоянию между линиями.

Мисриханов Мисрихан Шапиевич, доктор технических наук, профессор, секретарь-референт советника Председателя Правления

Мурзин Сергей Георгиевич, главный эксперт отдела оперативно-технологических систем службы электрических режимов

*Седунов Валерий Николаевич, генеральный директор
Токарский Андрей Юрьевич, доктор технических наук, доцент, главный специалист. E-mail: tokar48@mail.ru*

1. Расчет наведенных ЭДС по уравнению интеграла Карсона. Рассмотрим две однопроводные параллельные линии 1 и l (см. рис. 1), расположенные друг от друга по оси Y на расстоянии y . Сопротивления взаимной индуктивности между параллельными линиями 1 и l определяется выражением [1], полученным на основе интеграла Карсона для параметра $r \leq 0,25$ [2]:

$$Z_{1l} = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \left[\ln \frac{2\delta_3^2}{r_{1l}^2} - j\frac{\pi}{2} + \frac{4}{3} \frac{h_1 + h_l}{\delta_3} (1 + j) - 0,1544 \right] \quad (1)$$

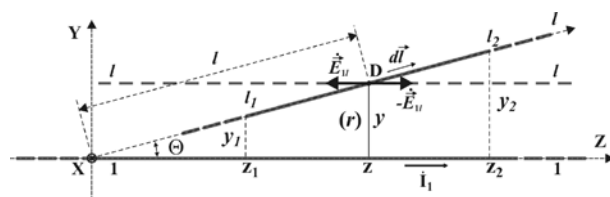


Рис. 1. К определению ЭДС для двух однопроводных сходящихся линий с использованием глубины проникновения электромагнитной волны в землю δ_3

Напряженность $\dot{\vec{E}}_{1l}$ электрического поля, создаваемая током \dot{I}_1 линии 1 (см. рис. 1) в точке D определится соотношением $\dot{\vec{E}}_{1l} = -\vec{z}^0 Z_{1l} \dot{I}_1$. Повернем линию l на угол Θ к линии 1 (см. рис. 1), делая их сходящимися, и определим ЭДС \dot{E}_l ,

наводимую токком \dot{I}_1 в контуре заземленного в точках l_1 и l_2 провода l , для чего проинтегрируем с учетом (1) уравнение (см. рис. 1) $-\dot{\vec{E}}_{1l} = \bar{z}^0 Z_{1l} \dot{I}_1$ по $d\vec{l}$ от l_1 до l_2 :

$$\begin{aligned} \dot{E}_l = & -\frac{j\omega\mu_0\dot{I}_1 \cos\Theta}{4\pi} \left\{ l_2 \ln \frac{2\delta_3^2}{(\Delta h)^2 + (l_2 \sin\Theta)^2} - l_1 \ln \frac{2\delta_3^2}{(\Delta h)^2 + (l_1 \sin\Theta)^2} + \right. \\ & + 2(l_2 - l_1) - 2\frac{\Delta h}{\sin\Theta} \left(\arctg \frac{l_2 \sin\Theta}{\Delta h} - \arctg \frac{l_1 \sin\Theta}{\Delta h} \right) + \\ & \left. + \left[\frac{4h_1 + h_l}{3\delta_3} (1+j) - j\frac{\pi}{2} - 0,1544 \right] (l_2 - l_1) \right\}. \end{aligned}$$

Поскольку использование уравнения (1) возможно [2, 3] для параметра $r \leq 0,25$, то область его применения в пересчете на расстояние между линиями ограничена. Так для $\rho_3 = 50$ Ом·м наибольшее допустимое для применения уравнения (1) расстояние между параллельными линиями составляет 89 м. Для сходящихся ВЛ длина заземленного участка ремонтируемой линии может достигать 1000 м и большая часть этого

$$-\dot{E}_l = -\int_{l_1}^{l_2} \dot{\vec{E}}_{1l} d\vec{l} = \int_{l_1}^{l_2} \bar{z}^0 Z_{1l} \dot{I}_1 d\vec{l} = \int_{l_1}^{l_2} Z_{1l} \dot{I}_1 dl \cos\Theta$$

Учитывая, что $\sin\Theta = y/l = y_1/l_1 = y_2/l_2$, получим:

участка может находиться на расстоянии большем допустимого по условию $r \leq 0,25$.

2. Расчет наведенных ЭДС с использованием эквивалентной глубины обратного тока. Для поддержания точности определения ЭДС, наведенной в контуре заземленного в точках l_1 и l_2 провода сходящейся линии l , введем в расчет эквивалентную глубину $h_{\text{ЭКВ}}$ обратного тока [2], протекающего в этом контуре:

$$h_{\text{ЭКВ}} = \frac{2}{\gamma'} \sqrt{\frac{e\rho_3}{\omega\mu_0}} = \frac{2}{\gamma'} \sqrt{\frac{e}{2\pi\mu_0}} \sqrt{\frac{\rho_3}{f}} = 658,898 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}} \approx 660 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}},$$

где: e – основание натурального логарифма, $\gamma' = 1,781$ из постоянной Эйлера $\ln \gamma' = 0,5772$, f – частота тока в линии.

2.1. ЭДС, наведенная магнитным полем тока в проводе работающей линии. Векторный магнитный потенциал \dot{A}_1 , создаваемый в точке D токком \dot{I}_1 провода линии 1 (см. рис. 2), расположенной на высоте h_1 над поверхностью земли, с учетом того, что его значение становится равным нулю на глубине равной $h_{\text{ЭКВ}}$, определяется выражением:

$$\dot{A}_1 = \frac{\mu_0 \dot{I}_1}{4\pi} \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2}$$

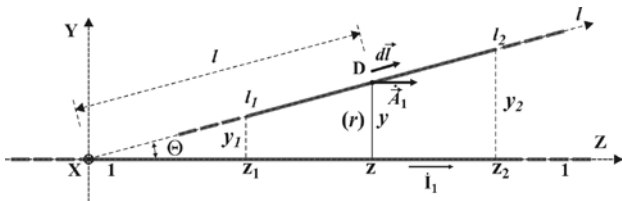


Рис. 2. К определению наведенной ЭДС для двух однопроводных сходящихся линий через векторный магнитный потенциал и $h_{\text{ЭКВ}}$

Элементарную ЭДС $d\dot{E}_{M1l}$, создаваемую магнитным полем тока \dot{I}_1 в элементе dl прямолинейного провода l , расположенного на высоте x над поверхностью земли и повернутого относительно провода 1 на угол Θ (см. рис. 2) определим по выражению:

$$d\dot{E}_{M1l} = -j\omega \dot{A}_1 \cdot d\vec{l} = -j\omega \dot{A}_1 \cdot dl \cdot \cos\Theta$$

Полное значение ЭДС \dot{E}_{M1l} , наведенной в контуре заземленного в точках l_1 и l_2 провода l , будет:

$$\dot{E}_{M1l} = -j\omega \int_{l_1}^{l_2} \dot{A}_1 \cdot d\vec{l} = -j\omega \cdot \cos\Theta \int_{l_1}^{l_2} \dot{A}_1 \cdot dl$$

Учитывая, что $\sin\Theta = y/l = y_1/l_1 = y_2/l_2$, получим:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{MI} = & -j \frac{\omega \mu_0 \dot{I}_1 \cos \Theta}{4\pi} \left\{ l_2 \ln \left[\frac{(l_2 \sin \Theta)^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{(l_2 \sin \Theta)^2 + (h_1 - h_l)^2} \right] - \right. \\ & - l_1 \ln \left[\frac{(l_1 \sin \Theta)^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{(l_1 \sin \Theta)^2 + (h_1 - h_l)^2} \right] + \frac{2(h_1 + h_{\text{ЭКВ}})}{\sin \Theta} \times \\ & \times \left(\arctg \frac{l_2 \sin \Theta}{h_1 + h_{\text{ЭКВ}}} - \arctg \frac{l_1 \sin \Theta}{h_1 + h_{\text{ЭКВ}}} \right) - \frac{2(h_1 - h_l)}{\sin \Theta} \times \\ & \left. \times \left(\arctg \frac{l_2 \sin \Theta}{h_1 - h_l} - \arctg \frac{l_1 \sin \Theta}{h_1 - h_l} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (3)$$

2.2. ЭДС, наведенная вихревыми токами в земле. Магнитным полем тока \dot{I}_1 в земле наводится электрическое поле (ЭП), напряженность которого $\dot{E}_1(x, y)$ определяется выражением:

$$\dot{E}_1(x, y) = -j \omega \dot{A}_1(x, y) = -j \frac{\omega \mu_0 \dot{I}_1}{4\pi} \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2}.$$

Рассматривая землю как изотропную среду, плотность $\dot{\eta}_1(x, y)$ тока в ней, создаваемого напряженностью $\dot{E}_1(x, y)$ ЭП, найдем по формуле:

$$\dot{\eta}_1(x, y) = \frac{\dot{E}_1(x, y)}{\rho_3} = -j \frac{\omega \mu_0 \dot{I}_1}{4\pi \rho_3} \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2}.$$

Модуль составляющей $\dot{B}_{\eta y}(X, Y)$ по оси ОУ (см. рис. 3) индукции МП $\dot{B}_\eta(X, Y)$, создаваемого плотностью тока $\dot{\eta}_1(x, y)$, можно найти по выражению:

$$\dot{B}_{\eta y}(X, Y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{\text{экс}}} \frac{\dot{\eta}_1(x, y)(X-x)}{(X-x)^2 + (Y-y)^2} dx dy,$$

Тогда модуль составляющей $\dot{B}_{\eta y}^\perp(X, Y)$ вектора $\dot{B}_\eta(X, Y)$, перпендикулярной плоскости контура $l_1, l_2, l_{2\text{ЭКВ}}, l_{1\text{ЭКВ}}$, образованного заземленным по концам участком l_{12} линии l (см. рис. 3), с учетом того, что

$$Y = l \sin \Theta \text{ и } \dot{B}_{\eta y}^\perp(X, Y) = \dot{B}_{\eta y}(X, Y) \cos \Theta,$$

может быть определен по формуле:

$$\dot{B}_{\eta y}^\perp(X, l) = \frac{\mu_0 \cos \Theta}{2\pi} \times \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{\text{экс}}} \frac{\dot{\eta}_1(x, y)(X-x)}{(X-x)^2 + (l \sin \Theta - y)^2} dx dy.$$

Потоком индукции $\dot{B}_{\eta y}^\perp(X, l)$ в контуре заземленного участка провода линии l наводится ЭДС $\dot{E}_{\eta l}$:

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\eta l} = & - \frac{\omega^2 \mu_0^2 \cos \Theta \dot{I}_1}{8\pi^2 \rho_3} \int_{l_1 - h_l}^{l_2 h_{\text{ЭКВ}}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{\text{экс}}} \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2} \times \\ & \frac{(X-x)}{(X-x)^2 + (l \sin \Theta - y)^2} dx dy dX dl. \end{aligned} \quad (4)$$

Потоком индукции $\dot{B}_{\eta y}^\perp(X, l)$ в контуре заземленного участка провода линии l наводится ЭДС $\dot{E}_{\eta l}$ по формуле (4-1).

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\eta l} = & - \frac{\omega^2 \mu_0^2 \cos \Theta \dot{I}_1}{8\pi^2 \rho_3} \int_{l_1 - h_l}^{l_2 h_{\text{ЭКВ}}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{\text{экс}}} \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2} \times \\ & \frac{(X-x)}{(X-x)^2 + (l \sin \Theta - y)^2} dx dy dX dl. \end{aligned} \quad (4-1)$$

2.3. ЭДС, наведенная обратным током в земле. Поскольку для однопроводной линии 1, схема расположения которой в координатах $X_{\text{от}}, Y_{\text{от}}, Z_{\text{от}}$ показана на рисунке 4, обратным проводом является земля, то обратный ток $\dot{I}_{\text{от}1}$ линии 1, проходящий в земле, равен току \dot{I}_1 , проходящему в проводе этой линии, но по оси $OZ_{\text{от}}$ направлен в сторону от конца к началу линии. Плотность обратного тока в земле, являющейся изотропной средой, определим по уравнению (4-2).

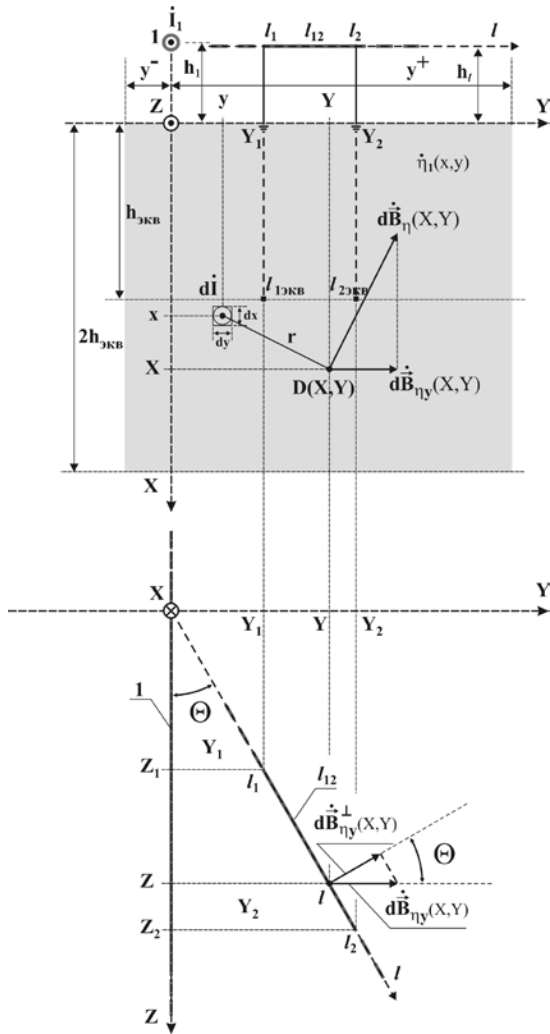


Рис. 3. К определению составляющей $\dot{B}_{1y}^{\perp}(X,Y)$ индукции МП, создаваемого наведенным в земле током с плотностью $\dot{j}_1(x,y)$

$$\dot{j}_{OT1}(x,y) = \dot{j}_{OT1} = \dot{U}_3 / \left[\rho_3 \left(l_{OT1} + 2\sqrt{x_{OT}^2 + y_{OT}^2} \right) \right], \quad (4-2)$$

где l_{OT1} - расстояние по прямой между началом и концом линии 1 (см. рис. 4), а \dot{U}_3 - напряжение между входами заземлений в начале и конце ВЛ, которое определяется по выражению:

$$\dot{U}_3 = \frac{\dot{I}_1}{\int_{y_{OT}^-}^{y_{OT}^+} \int_0^{2h_{экв}} \frac{1}{\rho_3 \left(l_{OT1} + 2\sqrt{x_{OT}^2 + y_{OT}^2} \right)} dx_{OT} dy_{OT}} \quad (5)$$

Модуль составляющей по оси OY_{OT} индукции \dot{B}_{1OY} МП (см. рис. 5), создаваемого током \dot{I}_{OT1} , найдем по формуле:

$$\dot{B}_{1OY}(X_{OT}, Y_{OT}) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{y_{OT}^-}^{y_{OT}^+} \int_0^{2h_{экв}} \frac{\dot{j}_{OT1}(x_{OT}, y_{OT})(x_{OT} - X_{OT})}{(x_{OT} - X_{OT})^2 + (Y_{OT} - y_{OT})^2} dx_{OT} dy_{OT}$$

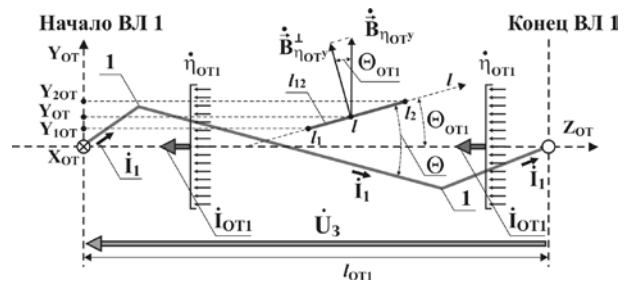


Рис. 4. Схема расположения линии 1 и участка l_{12} линии 1

Модуль составляющей $\dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, Y_{OT})$ вектора $\dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, Y_{OT})$, перпендикулярной плоскости контура $l_1, l_2, l_{2ЭКВ}, l_{1ЭКВ}$, образованного заземленным по концам участком l_{12} линии l (см. рис. 4 и 5), с учетом того, что

$$\dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, l) = \frac{\mu_0 \cos \Theta_{OT1}}{2\pi} \int_{y_{OT}^-}^{y_{OT}^+} \int_0^{2h_{ЭКВ}} \frac{\dot{\eta}_{OT1}(x_{OT}, y_{OT})(X_{OT} - x_{OT})}{(X_{OT} - x_{OT})^2 + (l \sin \Theta_{OT1} - y_{OT})^2} dx_{OT} dy_{OT}$$

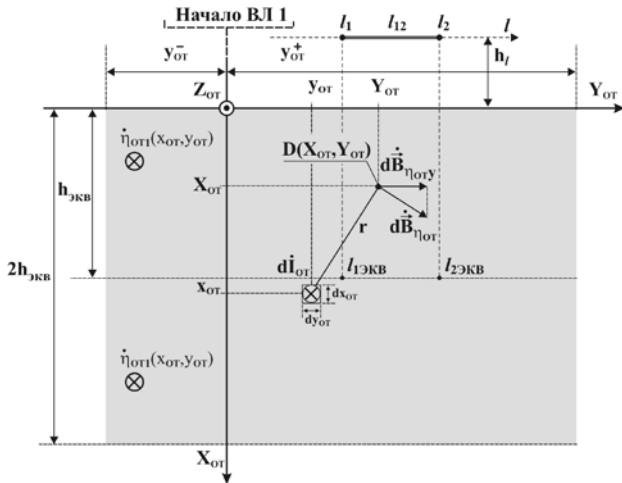


Рис. 5. К определению модуля составляющей $\dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, Y_{OT})$ индукции МП

$Y_{OT} = l \sin \Theta_{OT1}$ и $\dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, Y_{OT}) = \dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, Y_{OT}) \cos \Theta_{OT1}$, найдем по выражению:

Магнитный поток $\dot{\Phi}_{\eta_{OTl}}$ индукции $\dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, l)$ сквозь плоскость контура $l_1, l_2, l_{2ЭКВ}, l_{1ЭКВ}$ определим по формуле:

$$\dot{\Phi}_{\eta_{OTl}} = \int_{l_1 - h_1}^{l_2 h_{ЭКВ}} \dot{B}_{\eta_{OTy}}^{\perp}(X_{OT}, l) dX_{OT} dl$$

Найдем ЭДС $\dot{E}_{\eta_{OTl}}$, наведенную током i_{OT1} в контуре $l_1, l_2, l_{2ЭКВ}, l_{1ЭКВ}$:

$$\dot{E}_{\eta_{OTl}} = - \frac{d\dot{\Phi}_{\eta_{OTl}}}{dt} = -j\omega \dot{\Phi}_{\eta_{OTl}}$$

Т.к. $X_{OT} = X$, то окончательно ЭДС $\dot{E}_{\eta_{OTl}}$ найдем по выражению:

$$\dot{E}_{\eta_{OTl}} = -j\omega \frac{\mu_0 \cos \Theta_{OT1}}{2\pi} \times \int_{l_1 - h_1}^{l_2 h_{ЭКВ}} \int_{y_{OT}^-}^{y_{OT}^+} \int_0^{2h_{ЭКВ}} \left[\frac{\dot{U}_3(X_{OT} - x_{OT})}{\rho_3 (l_{OT1} + 2\sqrt{x_{OT}^2 + y_{OT}^2})} \right] \frac{dx_{OT} dy_{OT} dX dl}{(X_{OT} - x_{OT})^2 + (l \sin \Theta_{OT1} - y_{OT})^2}. \quad (6)$$

ЭДС \dot{E}_l , наведенную в заземленном участке провода сходящейся линии l магнитным полем линии 1 находится суммированием ЭДС \dot{E}_{M1l} , $\dot{E}_{\eta l}$ и $\dot{E}_{\eta_{OTl}}$:

$$\dot{E}_l^{(7)} = \dot{E}_{M1l} + \dot{E}_{\eta l} + \dot{E}_{\eta_{OTl}} \quad (7)$$

3. Сравнение результатов расчета. Рассмотрим прямолинейную однопроводную воздушную линию 1 протяженностью 50000 м, по которой протекает ток $\dot{I}_1 = 4000$ А частотой 50 Гц. На расстоянии Y_1 от линии 1 (см. рис. 6) расположено начало l_1 участка линии l протяженностью $l_{12} = 1000$ м. Линии l сходятся с линией 1 под углом $\Theta = 45^\circ$. Высота расположения проводов обеих линий 19 м: $h_1 = h_l = 19$ м.

Удельное сопротивление земли, над которой расположены линии, составляет $\rho_3 = 50$ Ом·м. Поскольку ВЛ 1 прямолинейна, то $l_{OT1} = 50000$ км и $\Theta_{OT1} = \Theta = 45^\circ$. При определении ЭДС $\dot{E}_{\eta l}$ и $\dot{E}_{\eta_{OTl}}$ для интегралов по l введем переменные пределы интегрирования $l_1 = Y_1 / \sin \Theta$ и $l_2 = Y_1 / \sin \Theta + l_{12}$, а также подставим в (2) выражения для l_1 и l_2 , тогда уравнения (2), (3), (4) и (6) примут вид (8) – (11).

По заданным исходным данным из выражения (5) получим $\dot{U}_3 = -138,114$ В. Для интегрирования по осям $0Y$ и $0Y_{OT}$ в уравнениях (10) и (11) примем: $y^+ = -y^- = 10000$ м, $y_{OT}^+ = -y_{OT}^- = 50000$ м. Для уравнения (8) $\Delta h = |h_1 - h_l| = 0$.

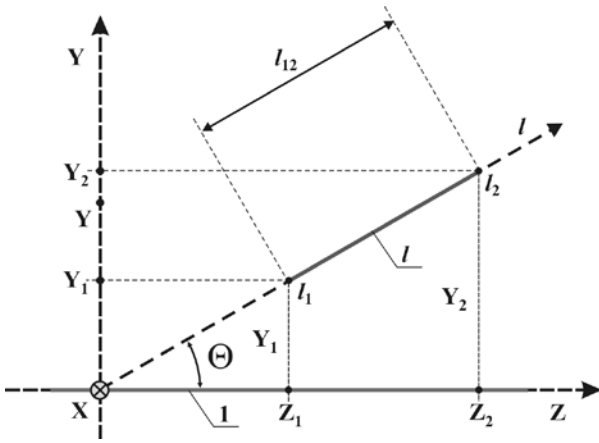


Рис. 6. К определению переменных пределов интегрирования по l

На рис. 7 показано изменение модулей и аргументов ЭДС $\dot{E}_l^{(7)}$, а также ее составляющих \dot{E}_{MII} , $\dot{E}_{\eta l}$, $\dot{E}_{\eta or l}$ и $\dot{E}_l^{(8)}$ при увеличении расстояния Y_1 от 10 м до 100 м, а на рис. 8 – при увеличении Y_1 от 100 м до 2000 м. При увеличении расстояния Y_1 от 10 м до 100 м (см. рис. 7) модули и аргументы ЭДС $\dot{E}_l^{(7)}$ и $\dot{E}_l^{(8)}$ имеют хорошее совпадение, не смотря на то, что часть заземленного по концам участка линии l находится вне зоны применения уравнений (2) и (8) по параметру r интеграла Карсона.

$$\begin{aligned} \dot{E}_l^{(8)} = & -j \frac{\omega \mu_0 \dot{I}_1 \cos \Theta}{4\pi} \left\{ \left(\frac{Y_1}{\sin \Theta} + l_{12} \right) \ln \frac{2\delta_3^2}{(\Delta h)^2 + (Y_1 + l_{12} \sin \Theta)^2} - \right. \\ & - \frac{Y_1}{\sin \Theta} \ln \frac{2\delta_3^2}{(\Delta h)^2 + Y_1^2} + 2l_{12} - 2 \frac{\Delta h}{\sin \Theta} \left(\arctg \frac{Y_1 + l_{12} \sin \Theta}{\Delta h} - \arctg \frac{Y_1}{\Delta h} \right) + \\ & \left. + \left[\frac{4h_1 + h_l}{3\delta_3} (1+j) - j \frac{\pi}{2} - 0,1544 \right] l_{12} \right\}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{MII} = & -j \frac{\omega \mu_0 \dot{I}_1 \cos \Theta}{4\pi} \left\{ l_2 \ln \left[\frac{(Y_1 + l_{12} \sin \Theta)^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{(Y_1 + l_{12} \sin \Theta)^2 + (h_1 - h_l)^2} \right] - \right. \\ & - l_1 \ln \left[\frac{Y_1^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{Y_1^2 + (h_1 - h_l)^2} \right] + \frac{2(h_1 + h_{\text{ЭКВ}})}{\sin \Theta} \times \left(\arctg \frac{Y_1 + l_{12} \sin \Theta}{h_1 + h_{\text{ЭКВ}}} - \arctg \frac{Y_1}{h_1 + h_{\text{ЭКВ}}} \right) - \\ & \left. - \frac{2(h_1 - h_l)}{\sin \Theta} \left(\arctg \frac{Y_1 + l_{12} \sin \Theta}{h_1 - h_l} - \arctg \frac{Y_1}{h_1 - h_l} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\eta l} = & - \frac{\omega^2 \mu_0^2 \cos \Theta \dot{I}_1}{8\pi^2 \rho_3} \times \\ & \times \int_{Y_1/\sin \Theta}^{Y_1/\sin \Theta + l_{12} h_{\text{ЭКВ}}} \int_{-h_l}^{y_{OT}^+} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{\text{жс}}} \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{\text{ЭКВ}})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2} \frac{(X-x)}{(X-x)^2 + (l \sin \Theta - y)^2} dx dy dX dl, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{\eta or l} = & -j \omega \frac{\mu_0 \cos \Theta_{OT1}}{2\pi} \times \\ & \times \frac{\dot{U}_3 (X_{OT} - x_{OT})}{\rho_3 (l_{OT1} + 2\sqrt{x_{OT}^2 + y_{OT}^2})} \int_{Y_1/\sin \Theta}^{Y_1/\sin \Theta + l_{12} h_{\text{ЭКВ}}} \int_{-h_l}^{y_{OT}^+} \int_{y_{OT}^-}^{y_{OT}^+} \int_0^{2h_{\text{жс}}} \frac{dx_{OT} dy_{OT} dX dl}{(X_{OT} - x_{OT})^2 + (l \sin \Theta_{OT1} - y_{OT})^2}. \end{aligned} \quad (11)$$

Однако дальнейшее увеличение расстояния Y_1 (см. рис. 8) приводит к резкому уходу кривых модуля и аргумента ЭДС $\dot{E}_l^{(8)}$ в зону большой

погрешности, что не происходит с кривыми модуля и аргумента ЭДС $\dot{E}_l^{(7)}$.

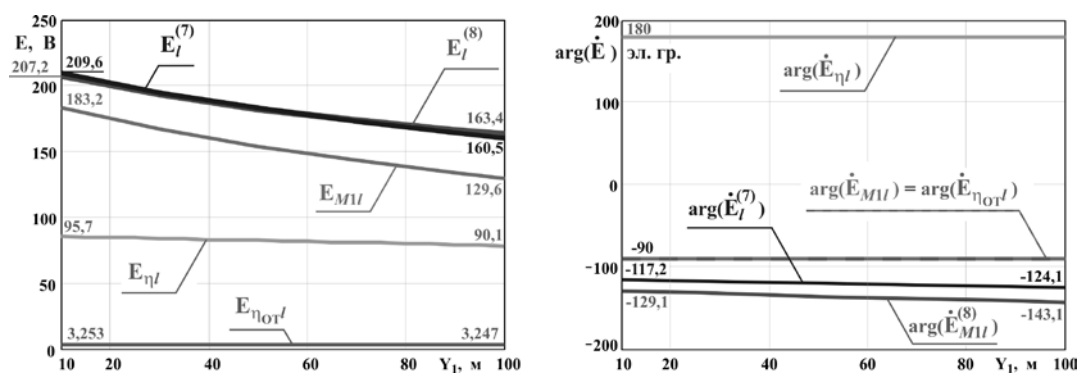


Рис. 7. Изменение модулей и аргументов ЭДС \dot{E}_{MII} , \dot{E}_{nI} , \dot{E}_{norI} , $\dot{E}_I^{(7)}$ и $\dot{E}_I^{(8)}$ при увеличении расстояния Y_1 от 10 м до 100 м

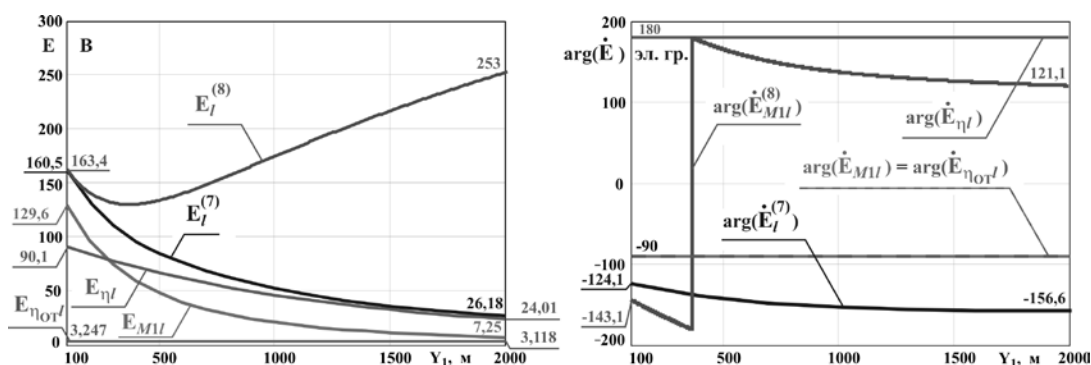


Рис. 8. Изменение модулей и аргументов ЭДС \dot{E}_{MII} , \dot{E}_{nI} , \dot{E}_{norI} , $\dot{E}_I^{(7)}$ и $\dot{E}_I^{(8)}$ при увеличении расстояния Y_1 от 100 м до 2000 м

Выводы: рассмотренная математическая модель позволяет более точно рассчитать значения ЭДС, наведенных в сходящихся линиях магнитным полем протекающих в них токов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Цицкиян, Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – СПб.: Элмор, 2007. 184 с.
2. Carson, J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return // Bell Syst. Techn. J. 1926. V. 5. № 4.
3. Костенко, М.В. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения / М.В. Костенко, Л.С. Перельман, Ю.П. Шкарин. – М.: Энергия, 1973. 272 с.

INDUCED LONGITUDINAL VOLTAGE IN CONVERGING OVERHEAD TRANSMISSION LINES

© 2012 M.Sh. Misrikhanov¹, S.G. Murzin¹, B.N. Sedunov², A.Yu. Tokarskiy²

¹ JSC Federal Network Company “Power Networks”

² JSC Federal Network Company “Power Networks” Branch “Main Power Networks of the Center”

Longitudinal voltage, induced by magnetic fields currents in converging overhead transmission line can effect to linemen that carry out the works in one of this switch off line. Longitudinal voltage values are determined by derivative of Carson integral equations. These equations application is limited by distance between concerned lines that lead to very high miscalculations. Simulator of longitudinal voltage values induced by magnetic field in converging overhead transmission lines calculation for any distance between lines is suggested.

Key words: *converging single-wire lines, magnetic field, Carson’s integral*

Misrikhan Misrikhanov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Referent-Secretary of the Board Chairman Adviser Sergey Murzin, Main Expert of the Department of Operative-Technological Systems at Service of Electric Modes Valeriy Sedunov, General Director Andrey Tokarskiy, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Main Specialist. E-mail: tokar48@mail.ru