УДК 613.168:621.315.318

НАВЕДЕННЫЕ ПРОДОЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ 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 параллельных 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 параллельных воздушных линиях электропередачи, для любых расстояний между линиями.

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

При проведении ремонтных работ на параллельных воздушных линиях (ВЛ) электропередачи для безопасности персонала необходимо знать величину электродвижущей силы (ЭДС), наведенной в проводе отключенной ремонтируемой ВЛ магнитным полем (МП), создаваемым токами работающей параллельной линии, т.к. при разъединении этого провода электромонтер может попасть под продольное напряжение, равное величине наведенной ЭДС. Для расчета наведенных ЭДС используются уравнения, полученные на основе интеграла Карсона, которые имеют ограничения в их применении по расстоянию между линиями.

1. Расчет наведенных ЭДС по уравнениям интеграла Карсона. Рассмотрим две параллельные однопроводные воздушные линии (ВЛ) 1 и 2 (см. рис. 1), расположенные на расстоянии « a_{12} » друг от друга. Линия 1 находится в рабочем режиме и в ее проводе протекает ток \dot{I}_1 , а линия 2 отключена и ее участок длиной l заземлен по концам. Примем для магнитной проницаемости воздуха и земли: $\mu_B = \mu_3 = \mu_0$. Расположим под проводом линии 2 на глубине h_{np} обратный провод, аналогичный проводу 2, и

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 металлически соединим его со спусками заземлителей, образуя замкнутый контур «провод 2 заземлители – обратный провод». Магнитным полем, создаваемым прямым током \dot{I}_1 , в полученном контуре наводится ЭДС \dot{E}_2 , которая без учета проводимости земли (земля идеальный диэлектрик) определяется по выражению (1).



Рис. 1. Две параллельные однопроводные ВЛ

$$\dot{E}_{2} = -j \frac{\omega \mu_{0} l \dot{I}_{1}}{4\pi} \ln \frac{a_{12}^{2} + (h_{1} + h_{np})^{2}}{a_{12}^{2} + (h_{1} - h_{2})^{2}} = -j \frac{\omega \mu_{0} l \dot{I}_{1}}{2\pi} \ln \frac{r_{10.np.}}{r_{12}}$$
(1)

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, f – частота переменного тока I_1 , μ_o – магнитная постоянная.

Если обратный провод участка длиной lлинии 2 отсутствует, а земля обладает конечным удельным сопротивлением ρ_3 , то для определения ЭДС \dot{E}_2 используется выражение $F_{12} = -2jJ(r,\theta)$, где $J(r,\theta) = P + jQ$ - интеграла: Карсона [1, 2], r и θ - параметры этого интеграла:

$$r = r_{12}^{\prime} \sqrt{\frac{\omega \mu_0}{\rho_3}}, \quad \theta = \operatorname{arctg} \frac{a_{12}}{h_1 + h_2}, \quad r_{12}^{\prime} = r_{10.np.} \quad \Pi p_{11} \quad h_{np} = h_2$$
(2)

ЭДС \dot{E}_2 находится по выражению [1, 2]:

$$\dot{E}_{2} = -j \frac{\omega \mu_{0} l\dot{I}_{1}}{2\pi} \left(\ln \frac{r_{12}'}{r_{12}} + F_{12} \right), F_{12} = 2 \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\nu + \sqrt{\nu^{2} - \left(k_{3}^{2} - k_{0}^{2}\right)}} e^{-\nu(h_{1} + h_{2})} \cos \nu a_{12} d\nu,$$
(3)

где k_3 – волновое число земли, k_0 – волновое число воздуха, $k_3^2 - k_0^2 = -j\omega\mu_0/\rho_3$. F_{12} раскладывается в ряд [1, 2] и для параметра $r \leq 0,25$ определяется по выражению:

$$F_{12} = -0,0772 - \ln\frac{r}{2} + \frac{2\cos\psi}{3}r\cos\theta - j\left(\psi - \frac{2\sin\psi}{3}r\cos\theta\right)$$

$$\tag{4}$$

а для $r \ge 5$ – по выражению:

$$F_{12} = \frac{2}{r} \left(\cos\theta \, e^{-j\psi} - \frac{\cos 2\theta}{r} e^{-j2\psi} + \frac{\cos 3\theta}{r^2} e^{-j3\psi} - \frac{3\cos 5\theta}{r^4} e^{-j5\psi} \right) \tag{5}$$

Учитывая, что $\sin \psi = \cos \psi = \sqrt{2}/2$, из первого уравнения (2) $r'_{12} = r \sqrt{\rho_3/(\omega \mu_0)}$, вводя [2] $\delta_3 = \sqrt{2\rho_3/(\omega \mu_0)}$ - глубину проникновения в землю (глубину, проникнув на которую электромагнитная волна затухает в е=2,72 раза), что

даст $r_{12}' = \frac{r\delta_3}{\sqrt{2}}$, $\cos\theta = \frac{h_1 + h_2}{r_{12}'} = \sqrt{2} \frac{h_1 + h_2}{r\delta_3}$, из первого уравнения (2) с учетом (3) получим [3] для параметра $r \le 0,25$:

$$\dot{E}_{2}^{(6)} = -j \frac{\omega \mu_{0} l \dot{I}_{1}}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2} \delta_{3}}{r_{12}} - j \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_{1} + h_{2}}{\delta_{3}} (1+j) - 0,0772 \right]$$
(6)

Аналогично для параметра $r \ge 5$:

$$\dot{E}_{2}^{(7)} = -j \frac{\omega \mu_{0} l I_{1}}{2\pi} \times \\ \times \left[\ln \frac{r_{12}'}{r_{12}} + \frac{2}{r} \left(\cos \theta e^{-j\psi} - \frac{\cos 2\theta}{r} e^{-j2\psi} + \frac{\cos 3\theta}{r^{2}} e^{-j3\psi} - \frac{3\cos 5\theta}{r^{4}} e^{-j5\psi} \right) \right],$$
(7)

где: $r'_{12} = \sqrt{a_{12}^2 + (h_1 + h_2)^2}$ и $r_{12} = \sqrt{a_{12}^2 + (h_1 - h_2)^2}$.

По параметру r существует зона разрыва, или «мертвая зона», от 0,25 до 5, где уравнения (6) и (7) дают очень большую погрешность, а по сути – неверный результат. Из первого уравнения (2) получим:

$$r_{12}' = \sqrt{a_{12}^2 + (h_1 + h_2)^2} = r / \left| \sqrt{j\omega\mu_0 / \rho_3} \right| = r \cdot \left| \sqrt{\rho_3 / (j\omega\mu_0)} \right|$$

Если считать, что $a_{11'} >> h_1 + h_{1'}$, то можно принять $h_1 + h_{i'} \approx 0$, тогда:

$$a_{12} = r \left| \sqrt{\rho_3 / (j \omega \mu_0)} \right| = r \sqrt{\rho_3 / (\omega \mu_0)} = r \delta_3 / \sqrt{2}$$
(8)

В таблице 1 для различных значений удельного сопротивления земли ρ_3 приведены границы

«мертвая зона»: максимальные $a_{12\max}^{\delta_3}$ расстояния между линиями, до которых допустимо использование выражения (6) и минимальным $a_{ik\min}^{\delta_3}$ расстоянием, начиная с которых допустимо использование выражений (7).

Таблица 1. Значения $a_{12\max}^{\delta_3}$ и $a_{12\min}^{\delta_3}$ для различных удельных сопротивлений ρ_3

$ ho_3$	Ом·м	1	5	10	50	100	500	1000
$a_{12\max}^{\delta_3}$	М	13	28	40	89	126	281	398
$a_{12\min}^{\delta_3}$	М	252	563	796	1800	2516	5627	7958

Таким образом, расчет ЭДС, наводимых магнитным полем в параллельных линиях, по уравнениям, полученным с помощью интеграла Карсона с использованием глубины δ_3 проникновения электромагнитной волны в землю, в зоне разрыва параметра *r* дает неверный результат.

2. Расчет наведенных ЭДС с использованием эквивалентной глубины обратного тока. Для устранения этого недостатка введем в расчет ЭДС, наведенной в контуре «провод длиной l – заземлители – земля» линии 2, эквивалентную глубину h_{3KB} обратного тока [2], протекающего в этом контуре и земле:

$$h_{\mathcal{3}KB} = \frac{2}{\gamma'} \sqrt{\frac{e\rho_3}{\omega\mu_0}} = \frac{2}{\gamma'} \sqrt{\frac{e}{2\pi\,\mu_0}} \sqrt{\frac{\rho_3}{f}} = 658,898 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}} \approx 660 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}}$$

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

<u>2.1. ЭДС, наведенная МП тока в проводе</u> работающей линии. Будем считать, что МП, создаваемое током \dot{I}_1 , глубже h_{3KB} в землю не проникает и обратный провод рассматриваемого контура линии 2 расположен на глубине h_{3KB} . Тогда, подставляя в уравнение (1) h_{3KB} вместо h_{np} , получим выражение для расчета ЭДС, наводимую в заземленном контуре линии 2 МП, создаваемым током \dot{I}_1 , протекающем в проводе линии 1:

$$\dot{E}_{2\Pi P1} = -j \frac{\omega \mu_0 l \dot{I}_1}{4\pi} \ln \frac{a_{12}^2 + (h_1 + h_{3KB})^2}{a_{12}^2 + (h_1 - h_2)^2}$$
(9)

Выражение (9) можно вывести с использованием уравнений для векторного потенциала и индукции МП. <u>2.2. ЭДС, наведенная вихревыми токами в</u> земле. Магнитным полем тока i_1 в земле наводится электрическое поле (ЭП), напряженность которого \dot{E}_1 определяется выражением:

$$\dot{\mathrm{E}}_{1}(x,y) = -j \frac{\omega \mu_{0} \dot{I}_{1}}{4\pi} \ln \frac{y^{2} + (h_{1} + h_{\mathcal{H}B})^{2}}{y^{2} + (h_{1} + x)^{2}}$$

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

$$\dot{\eta}_{1}(x,y) = \frac{\dot{\mathrm{E}}_{1}(x,y)}{\rho_{3}} = -j\frac{\omega\mu_{0}\dot{I}_{1}}{4\pi\rho_{3}}\ln\frac{y^{2} + (h_{1} + h_{3KB})^{2}}{y^{2} + (h_{1} + x)^{2}}$$

Токи, наведенные в земле магнитным полем, носят вихревой характер. На рис. 2 даны кривые распределения модуля плотности $\dot{\eta}_1(x, y)$ тока, наводимого МП в земле с $\rho_3 = 50$ Ом·м током $I_1 = 4000$ А линии 1 на глубине x=0 м (поверхность земли), 300 м, 600 м, 660 м ($h_{_{3KB}}$), 900 м, 1200 м и 1320 м ($^{2}h_{_{3KB}}$) при изменении у от -5000 м до 5000 м. На рис. 3 показано распределение значений фазного угла $\arg(\dot{\eta}_1)$ плотности тока $\dot{\eta}_1(x, y)$ для у = 0 м и изменения х от 0 м до 1320 м.



Рис. 2. Кривые распределения модуля плотности $\dot{\eta}_1(x, y)$ тока в земле для значений х от 0 до 1320 м при изменении у от -5000 м до 5000 м



Рис. 3. Распределение значений фазного угла $\arg(\dot{\eta}_1)$ плотности тока $\dot{\eta}_1(x, y)$ для y = 0 м и изменения х от 0 м до 1320 м

На участке 0 м $\leq x < 660$ м $\arg(\dot{\eta}_1) = -90^\circ$, при $x = h_{\Im KB} = 660$ м $\arg(\dot{\eta}_1)$ меняет свой знак на противоположенный: с -90° на $+90^\circ$, и далее на участке 660 м $\leq x \leq 1320$ м $\arg(\dot{\eta}_1) = +90^\circ$. Составляющая $d\dot{B}_y$ индукции $d\dot{B}_\eta$ МП, создаваемого (см. рис. 4) в произвольной точке D(X,Y) с координатами X и Y элементарным током $d\dot{I} = \dot{\eta}_1(x, y) dx dy$

определится выражением:



Рис. 4. К определению индукции МП, создаваемого в точке D(X,Y) элементарным током $d\dot{I} = \dot{\eta}_1(x, y) dx dy$

Составляющую dB_y индукции МП найдем по формуле:

$$d\dot{B}_{\eta y} = d\dot{B}_{\eta} \frac{X - x}{r} = \frac{\mu_0 \dot{\eta}_1(x, y)(X - x)}{2\pi r^2} dx dy.$$

Полное выражение для составляющей $\dot{B}_{\eta y}(X,Y)$ индукции $\dot{B}_{\eta}(X,Y)$ в точке D(X,Y) найдем, проинтегрировав последнее выражение по x от 0 до $2h_{3KB}$ и по y – от y^{-} до y^{+} :

$$\dot{B}_{\eta y}(X,Y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{y^-}^{y^+ 2h_{xx}} \int_{0}^{\dot{\eta}_1} (x,y)(X-x) (X-x) (X-x)^2 dx dy$$

ЭДС $\dot{E}_{2\eta}$, создаваемая в контуре заземленного участка провода линии 2 магнитным потоком индукции $\dot{B}_{\eta y}(X,Y)$, определяется по выражению:

$$\dot{E}_{2\eta} = -\frac{\omega^2 \mu_0^2 \dot{I}_1 l}{8\pi^2 \rho_3} \int_{-h_2}^{h_{2KB}} \int_{y^-}^{y^+ 2h_{xe}} \frac{\ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{3KB})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2} (X - x)}{(X - x)^2 + (a_{12} - y)^2} dx dy dX$$
(10)

<u>2.3. ЭДС, наведенная обратным током в</u> <u>земле.</u> Поскольку линия 1 является однопроводной, то ток \dot{I}_1 от источника \dot{E}_1 (см. рис. 5) проходит по проводу 1 к сопротивления нагрузки $Z_{\rm H}$, второй конец которого заземлен, и, проходя через землю в виде обратного тока $\dot{I}_{\rm OT1}$, возвращается к заземленному концу источника \dot{E}_1 .



Рис. 5. К определению плотности $\dot{\eta}_{OT}$ обратного тока линии 1 через землю

Рассматривая землю по всему объему от ее поверхности до глубины $2h_{3KB}$ как изотропную среду, элементарный обратный ток $d\dot{l}_{orl}$, проходящий через элементарный канал длиной $l_{OT} + 2r = l_{OT} + 2\sqrt{x^2 + y^2}$ и площадью сечения $dS_3 = -dx \cdot dy$, будет:

$$d\dot{I}_{\rm orl} = \frac{U_3}{\rho_3 \left(l_{\rm OT} + 2\sqrt{x^2 + y^2} \right)} dS_3,$$

где U_3 - напряжение между заземлениями источника и нагрузки.

В плоскости ABCD, перпендикулярной проводам фаз линии и расположенной на

расстоянии ζ от источника E_1 , плотность $\dot{\eta}_{\text{от}}$ обратного тока определится соотношением:

$$\dot{\eta}_{\text{OT}}(x, y) = \dot{\eta}_{\text{OT}} = \frac{U_3}{\rho_3 \left(l_{\text{OT}} + 2\sqrt{x^2 + y^2} \right)}$$

Величину обратного тока определим по напряжению \dot{U}_3 (см. рис. 5):

$$\dot{I}_{\text{or1}} = \int_{y^{-}}^{y^{-}} \int_{0}^{2h_{3KB}} \frac{\dot{U}_{3}}{\rho_{3} \left(l_{\text{OT}} + 2\sqrt{x^{2} + y^{2}} \right)} dx dy$$

Поскольку обратный ток и является током \dot{l}_1 линии 1, но протекающим в обратном направлении, то значение напряжения \dot{U}_3 находится по выражению:

$$\dot{U}_{3} = \frac{-I_{1}}{\int_{y^{-}}^{y^{+}2h_{3KB}} \int_{0}^{y^{-}} \frac{1}{\rho_{3} \left(l_{\text{OT}} + 2\sqrt{x^{2} + y^{2}} \right)} dx dy}$$
(11)

Составляющая $\dot{B}_{\eta_{\text{OT}}}(X,Y)$ по оси ОУ индукции МП, создаваемого обратным током \dot{I}_{OT1} , определяется выражением:

$$\dot{B}_{\eta_{\text{OT}}y}(X,Y) = \frac{\mu_0}{2\pi} \int_{y^-}^{y^+ 2h_{\text{RG}}} \int_{0}^{\dot{\eta}_{\text{OT}}} \frac{\dot{\eta}_{\text{OT}}(x,y)(X-x)}{(X-x)^2 + (Y-y)^2} dxdy$$

ЭДС \dot{E}_{20T} , создаваемая в контуре заземленного участка провода линии 2 магнитным потоком индукции $\dot{B}_{\eta_{0T}Y}(X,Y)$, найдем по формуле:

$$\dot{E}_{2\text{OT}} = -j \frac{\omega \mu_0 l}{2\pi} \int_{-h_{1'}}^{h_{5KB}} \int_{0}^{y^+} \int_{0}^{2h_{5KB}} \frac{\dot{U}_3 (X-x)}{\rho_3 (l_{\text{OT}} + 2\sqrt{x^2 + y^2}) [(X-x)^2 + (a_{12} - y)^2]} dx \, dy \, dX$$

Полное значение ЭДС рассчитывается как:

$$\dot{E}_{2}^{(12)} = \dot{E}_{2\Pi P1} + \dot{E}_{2\eta} + \dot{E}_{2OT}$$
(12)

3. Сравнение результатов расчета. Рассиотрим изменение величины ЭДС \dot{E}_2 , рассчитанной по выражениям (6) $\dot{E}_2^{(6)}$ и (7) $\dot{E}_2^{(7)}$, которые получены с помощью интеграла Карсона, и по уравнению (12) $\dot{E}_2^{(12)}$ при увеличении расстояния a_{12} между линиями от 10 до 50000 м,

принимая значение удельного сопротивления земли ρ_3 =50 Ом·м. Ток в линии 1 \dot{I}_1 = 4000 А, а частота его изменения во времени f = 50 Гц. Тогда эквивалентная глубина обратного тока h_{3KB} =660 м. Принимая $y^+ = -y^-$ = 100000 м, по выражению (11) получим значение напряжения \dot{U}_3 = -50,13 В. На рис. 6 показано изменение модулей ЭДС $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\Pi}$, \dot{E}_{2OT} , $\dot{E}_2^{(12)}$ и $\arg(\dot{E}_2^{(12)})$ при увеличении a_{12} от 100 до 2000 м.



Рис. 6. Изменение модулей ЭДС $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\eta}$, \dot{E}_{2OT} , $\dot{E}_{2}^{(12)}$ и $\arg(\dot{E}_{2}^{(12)})$ при увеличении a_{12} от 100 до 2000 м

На рис. 7 даны совмещенные кривые изменения модулей ЭДС $\dot{E}_2^{(6)}$ $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\eta}$, \dot{E}_{2OT} , $\dot{E}_2^{(12)}$ и аргументов ЭДС $\dot{E}_2^{(6)}$ и $\dot{E}_2^{(12)}$ при

увеличении расстояния a_{12} от 10 м до 100 м (до «мертвой зоны» по параметру r).



Рис. 7. Изменение модулей ЭДС $\dot{E}_{2}^{(6)}$ $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\eta}$, \dot{E}_{2OT} , $\dot{E}_{2}^{(12)}$ и аргументов ЭДС $\dot{E}_{2}^{(6)}$ и $\dot{E}_{2}^{(12)}$ при увеличении расстояния a_{12} от 10 м до 100 м

На рис. 8 показаны совмещенные кривые изменения модулей и аргументов ЭДС $\dot{E}_2^{(6)}$, $\dot{E}_2^{(7)}$, $\dot{E}_{2\Pi P1}$ и $\dot{E}_2^{(12)}$ при увеличении расстояния

*a*₁₂ от 100 м до 2000 м (в «мертвой зоне» по параметру *r*).



Рис. 8. Изменение модулей и аргументов ЭДС $\dot{E}_2^{(6)}$, $\dot{E}_2^{(7)}$, $\dot{E}_{2\Pi P1}$ и $\dot{E}_2^{(12)}$ при увеличении расстояния a_{12} от 100 м до 2000 м

На рис. 9 даны совмещенные кривые модулей ЭДС $\dot{E}_2^{(7)}$ $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\eta}$, \dot{E}_{2OT} , $\dot{E}_2^{(12)}$ и аргументов ЭДС $\dot{E}_2^{(7)}$, $\dot{E}_2^{(12)}$ и $\dot{E}_2^{(12)} - \dot{E}_{2OT}$ при

увеличении расстояния a_{12} от 1500 м до 5000 м (после «мертвой зоны» по параметру r).



Рис. 9. Изменение модулей ЭДС $\dot{E}_2^{(7)}$ $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\eta}$, \dot{E}_{2OT} , $\dot{E}_2^{(12)}$ и аргументов ЭДС $\dot{E}_2^{(7)}$, $\dot{E}_2^{(12)}$ и $\dot{E}_2^{(12)} - \dot{E}_{2OT}$ при увеличении расстояния a_{12} от 1500 м до 5000 м

До «мертвой зоны» по параметру r кривые изменения модулей и аргументов ЭДС $\dot{E}_{2}^{(6)}$ и $\dot{E}_{2}^{(12)}$ имеют хорошее совпадение (см. рис. 7). В «мертвой зоне» (см. рис. 8) по параметру r кривая модуля ЭДС $\dot{E}_{2}^{(6)}$ с увеличением расстояния *a*₁₂ резко уходит вверх в зону больших погрешностей, а кривая модуля ЭДС $\dot{E}_2^{(7)}$ - выходит из зоны больших погрешностей и с увеличением расстояния *a*₁₂ приближается к кривой модуля ЭДС $\dot{E}_{_{2\Pi P1}}$. Кривая модуля ЭДС $\dot{E}_{_{2}}^{^{(12)}}$ в «мертвой зоне» изменяется плавно, не уходя в зону больших погрешностей. После «мертвой зоны» (см. рис. 8) по параметру r ($a_{12} > 1800$ м) кривая модуля ЭДС $\dot{E}_{2}^{(7)}$ продолжает приближаться и практически совпадает с кривой модуля ЭДС $\dot{E}_{2\Pi P1}$, но остается значительно ниже кривых модулей ЭДС как $\dot{E}_{2}^{(12)}$, так и $\dot{E}_{2\eta}$. Расхождение аргументов ЭДС $\dot{E}_2^{(7)}$ и $\dot{E}_2^{(12)}$ значительны, причем, если кривая $\arg(\dot{E}_2^{(12)})$ с ростом a_{12} уходит в сторону угла -90°, то кривая $\arg(\dot{E}_2^{(7)})$ – в сторону угла -180°. Для наглядности картины, на рис. 9 показана кривая изменения $\arg(\dot{E}_{2}^{(12)}-\dot{E}_{20T})$, т.е. аргумента ЭДС $\dot{E}_{2}^{(12)}$ без учета влияния обратного тока. Кривая $\arg(\dot{E}_{2}^{(12)} - \dot{E}_{20T})$ с увеличением a_{12} также стремится к -180°, приближаясь к кривой $\arg(\dot{E}_2^{(7)})$. На рис. 10 показаны векторные диаграммы ЭДС $\dot{E}_2^{(12)}$, являющейся суммой ЭДС

 $\dot{E}_{2\Pi P1}$, $\dot{E}_{2\eta}$ и \dot{E}_{20T} , для a_{12} =100 м (масштаб M1, принят за 1), a_{12} =1500 м (масштаб M=5, увеличен в 5 раз) и a_{12} =5000 м (масштаб M=20).



*a*₁₂ = 100 м, M=1; *a*₁₂ = 1500 м, M=5; *a*₁₂ = 5000 м, M=20

Рис. 10. Векторные диаграммы ЭДС $\dot{E}_{2}^{(12)} = \dot{E}_{2\Pi P1} + \dot{E}_{2\eta} + \dot{E}_{20T}$

Выводы: рассмотренная математическая модель позволяет более точно рассчитать значения ЭДС, наведенных в параллельных линиях магнитным полем протекающих в них токов, особенно в «мертвой зоне» по параметру *r* интеграла Карсона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- 1. *Carson, J.R.* Wave propagation in overhead wires with ground return // Beii Syst. Techn. J. 1926.V. 5. № 4.
- 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.
- 3. *Цицикян, Г.Н.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. СПб.: Элмор, 2007. 184 с.

INDUSED LONGITUDINAL VOLTAGE IN PARALLEL OVERHEAD TRANSMISSION LINES

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

¹JSC Federal Network Company "Power Networks" ²JSC Federal Network Company "Power Networks" Branch "Main Power Networks of the Center"

Longitudinal voltage, induced by magnetic fields currents in parallel 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 parallel overhead transmission lines calculation for any distance between lines is suggested.

Key words: parallel 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