

Распределение напряжения вдоль отключенной и заземленной линии, наведенного магнитным полем параллельной линии

А.Ю. Токарский, рук. группы¹, ведущий эксперт², доцент, д-р техн. наук

Н.Б. Рубцова, зав. отделом, профессор, д-р биолог. наук¹

¹ ФГБНУ «Научно-исследовательский институт медицины труда», Москва

² ОАО «Научно-технический центр Федеральной сетевой компании Единой энергетической системы», Москва

e-mail: tokar48@mail.ru

Ключевые слова:

однопроводная линия электропередачи, магнитное поле, собственные сопротивления, взаимные сопротивления, наведенные напряжения и токи, распределение напряжения вдоль линии.

С целью повышения точности расчетных методов рассмотрены параметры, наведенные ЭДС, токи и распределение напряжения вдоль заземленной по концам однопроводной линии электропередачи, создаваемые магнитным полем токов параллельной однопроводной работающей линии, при расчете по методу Карсона, упрощенному методу Карсона и методу h_{equ} . Показано, что метод h_{equ} устраняющий погрешности, возникающие в «мертвой зоне» при расчете по методу Карсона, вне «мертвой зоны» дает практически полное совпадение результатов с этим методом и небольшие расхождения с результатами по упрощенному методу Карсона.

1. Введение

При проведении ремонтных работ на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи линейный персонал подвергается воздействию напряжения, наведенного в проводе ремонтируемой отключенной и заземленной ВЛ магнитным полем (МП), создаваемым токами работающей параллельной линии. Значение наведенного напряжения прямо пропорционально электродвижущей силе (ЭДС), создаваемой в проводе ремонтируемой линии МП работающей ВЛ. Величина ЭДС определяется в [1, 2] по уравнениям интеграла Карсона $J(r, \theta) = P + jQ$, где r и θ — параметры интеграла, применимость которых ограничена наличием «мертвой зоной» по параметру r , находящейся в диапазоне изменения r от 0,25 до 5. В «мертвой зоне» уравнения метода Карсона дают очень большую погрешность результатов расчета. Для устранения «мертвой зоны» в [3, 4] предложен метод h_{equ} , в котором магнитное поле линии рассмотрено как имеющее три составляющие: МП, создаваемое непосредственно током линии, МП, создаваемое наведенными в земле токами, и МП, создаваемое обратным током в земле. Метод h_{equ} не содержит

«мертвой зоны», а результаты его расчета вне этих зон должны совпадать с результатами расчета по положительно зарекомендовавшему себя методу Карсона, в чем и заключается основная цель настоящей статьи.

2. Индуктивные параметры линии и удельное сопротивление земли

Собственная индуктивность L_i однопроводной (однофазной) линии i и взаимная индуктивность M_{ik} между параллельными однопроводными линиями i и k с учетом удельного сопротивления земли определяются в [1] выражениями:

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{2h_i}{r_i} + F_{ii} \right) \text{ и } M_{ik} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{r'_{ik}}{r_{ik}} + F_{ik} \right),$$

где μ_0 — магнитная постоянная; h_i — высота расположения над землей провода i ; r_i — радиус провода i ; r_{ik} — расстояние между проводами i и k ; r'_{ik} — расстояние между проводом i и зеркальным отражением от поверхности земли провода k .

По методу интеграла Карсона для его параметра $r \leq 0,25$, характеризующего расстояние между линиями i и k , уравнения для F_{ii} и F_{ik} в [2] имеют вид:

$$F_{ii} = \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{2h_i} - j\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \frac{h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \text{ и}$$

$$F_{ik} = \ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{r'_{ik}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_i + h_k}{\delta_3} (1+j) - 0,0772,$$

где $\delta_3 = \sqrt{2\rho_3 / (\omega\mu_0)}$ — глубина проникновения в землю, т.е. глубина, проникнув на которую, электромагнитная волна затухает в $e = 2,72$ раза; h_k — высота расположения над землей провода k ; ρ_3 — удельное сопротивление земли; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; $f = 50$ Гц.

Тогда внешняя индуктивность L_i провода i определяется выражением:

$$L_i = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{r_i} - j\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \frac{h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right).$$

Удельные собственное индуктивное сопротивление $Z_{ii}^{(Кар)}$ однопроводной линии i и взаимное индуктивное сопротивление $Z_{ik}^{(Кар)}$ между параллельными линиями i и k по методу Карсона определяются выражениями:

$$Z_{ii}^{(Кар)} = j\omega L_i = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \times \left[\ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{r_i} - j\frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \frac{h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right], \text{ Ом/м.} \quad (1)$$

$$Z_{ik}^{(Кар)} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \times \left[\ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{r_{ik}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_i + h_k}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right], \text{ Ом/м.} \quad (2)$$

Как отмечено в [1], наличие конечной проводимости земли приводит к увеличению внешнего индуктивного сопротивления провода линии и появлению его внешнего активного сопротивления. В [5, 6] приводятся упрощенные выражения по методу Карсона для расчета собственного $Z_{ii}^{(Кар упр)}$ и взаимного $Z_{ik}^{(Кар упр)}$ сопротивления проводов однопроводных линий i и k :

$$Z_{ii}^{(Кар упр)} = (R_\Lambda + 9,869 \cdot 10^{-4} \cdot f) + j(12,356 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln \frac{D_e}{r_{EL}}), \text{ Ом/км.}$$

$$Z_{ik}^{(Кар упр)} = (9,869 \cdot 10^{-4} \cdot f) + j(12,356 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln \frac{D_e}{r_{ik}}), \text{ Ом/км,} \quad (3)$$

где R_Λ — удельное активное сопротивление линии, Ом/км; f — частота, Гц; $D_e = 658,898\sqrt{\rho_3/f}$, м; $r_{EL} = \sqrt[n]{n \cdot r_s \cdot r_p^{(n-1)}}$ — эквивалентный радиус провода линии по МП, м; n — число проводов в расщепленной фазе; r_p — радиус расщепления проводов фазы, м; r_s — радиус провода с учетом внутреннего магнитного потока $r_s = r_{np} \cdot e^{-(1/4)}$, м; r_{np} — радиус провода, м.

Расчет индуктивного сопротивления по выражению (2) имеет так называемую «мертвую зону», при параметре r больше 0,25 и меньше 5 [1, 3, 4], в которой рассчитанное значение $Z_{ik}^{(Кар)}$ во много раз превышает истинные. Для устранения «мертвой зоны» в [3, 4] предложен метод h_{equ} .

Для определения составляющих собственной индуктивности однопроводной линии i по методу h_{equ} рассмотрим (рис. 1) индукцию \dot{B}_i МП, создаваемую током \dot{I}_i провода i в точке D , лежащей в вертикальной плоскости, проходящей через ось провода i , и расположенной на расстоянии x от оси этого провода:

$$\dot{B}_i = \frac{\mu_0 \dot{I}_i}{2\pi x}.$$

Тогда магнитный поток $\dot{\Phi}_i$ через поверхность длиной l по оси z рассматриваемой плоскости линии i будет:

$$\dot{\Phi}_i = \int_{r_i}^{h_i+h_{equ}} \dot{B}_i l dx = \frac{\mu_0 \dot{I}_i l}{2\pi} \int_{r_i}^{h_i+h_{equ}} \frac{dx}{x} = \frac{\mu_0 \dot{I}_i l}{2\pi} \ln \frac{h_i+h_{equ}}{r_i},$$

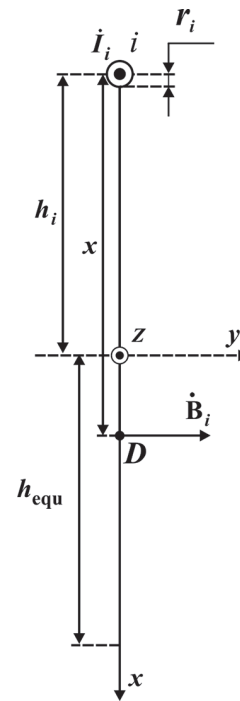


Рис. 1. К определению индуктивности L_i

где $h_{equ} = \frac{2}{\gamma'} \sqrt{\frac{e\rho_3}{\omega\mu_0}} = 658,898 \sqrt{\frac{\rho_3}{f}}$ — глубина расположения провода с эквивалентным обратным током; $\ln \gamma' = 0,5772$ — постоянная Эйлера.

Внешняя индуктивность участка линии i :

$$L_i = \frac{\dot{\Phi}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{h_i + h_{equ}}{r_i},$$

тогда индуктивное сопротивление этого участка составит:

$$jX_{L_i} = j\omega L_i = j \frac{\omega\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{h_i + h_{equ}}{r_i}. \quad (4)$$

Определим составляющую индуктивного сопротивления участка длиной l однопроводной линии i , обеспеченную магнитным потоком $\dot{\Phi}_\eta$, создаваемым вихревыми токами с плотностью η , наведенными в земле магнитным полем тока \dot{I}_i . Магнитный поток $\dot{\Phi}_\eta$ однопроводной линии i определяется следующим образом [3, 4]:

$$\dot{\Phi}_\eta = -j \frac{\omega\mu_0^2 \dot{I}_i l}{8\pi^2 \rho_3} \int_{-h_i}^{h_{equ}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{equ}} \frac{(X-x) \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{equ})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2}}{(X-x)^2 + y^2} dx dy dX.$$

Индуктивность L_η , обеспечиваемую магнитным потоком $\dot{\Phi}_\eta$, найдем как $L_\eta = \dot{\Phi}_\eta / \dot{I}_i$, тогда сопротивление $Z_{L_\eta} = j\omega L_\eta$ будет определяться выражением:

$$Z_{L_\eta} = \frac{\omega^2 \mu_0^2 l}{8\pi^2 \rho_3} \int_{-h_i}^{h_{equ}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{equ}} \frac{(X-x) \ln \frac{y^2 + (h_1 + h_{equ})^2}{y^2 + (h_1 + x)^2}}{(X-x)^2 + y^2} dx dy dX \quad (5)$$

Обратный ток с плотностью η_{OT} протекает в земле на участке линии i длиной l между заземляющими устройствами (ЗУ), установленными в конце и начале участка. Активное сопротивление этого участка определяется в [3, 4] выражением:

$$R_3 = \frac{1}{\int_{y^-}^{y^+} \int_{x^-}^{x^+} \frac{1}{\rho_3 (l + 2\sqrt{x^2 + y^2})} dx dy} \quad (6)$$

Рассмотрим заземленную по концам однопроводную линию i протяженностью 1 км, провод которой радиусом $r_i = 0,014$ м расположен над землей на высоте $h_i = 17,5$ м. Абстрагируясь от активных сопротивлений провода и ЗУ, рассчитаем по уравнениям (1), (3), (4), (5) и (6) активные и индуктивные составляющие полного собственного сопротивления линии при изменении ρ_3 от 1 до 1000 Ом·м. Для провода радиусом $r_i = 0,014$ м значение радиуса $r_s = 0,0109$ м, поэтому в уравнениях (1) и (4) вместо r_i ставится r_s , в уравнении (3) принимается $R_\lambda = 0$, в уравнениях (4), (5) и (6) $l = 1000$ м, а в уравнение (1) вводится общий множитель $l = 1000$ м. В уравнениях (5) и (6) принято $y^+ = x^+ = -y^- = 100\,000$ м.

На рис. 2а показано изменение активных сопротивлений $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap)}]$, $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap \text{ упр})}]$, R_3 и Z_{L_η} , а на рис. 2б — $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap)}]$, $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap \text{ упр})}]$ и $Z_{L_\eta} + R_3$ для

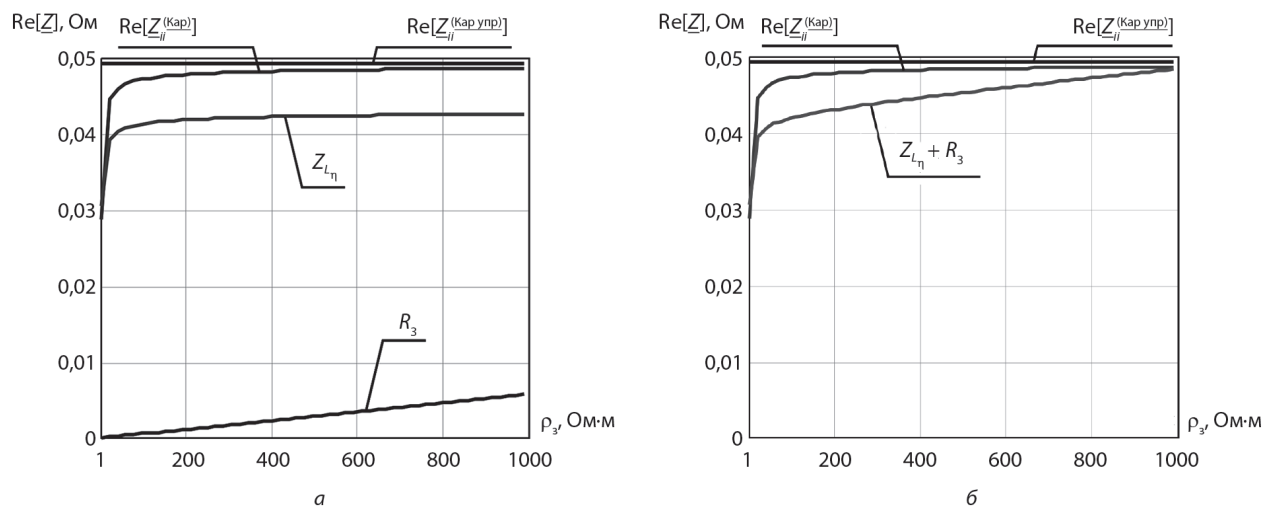


Рис. 2. Изменение активных сопротивлений $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap)}]$, $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap \text{ упр})}]$, R_3 и Z_{L_η} (а) и $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap)}]$, $\text{Re}[Z_{ii}^{(Kap \text{ упр})}]$ и $Z_{L_\eta} + R_3$ (б) при изменении ρ_3 от 1 до 1000 Ом·м

рассматриваемой однопроводной ВЛ при изменении ρ_3 от 1 до 1000 Ом·м. Поскольку для однопроводной ВЛ сопротивление R_3 входит в цепь полного тока линии, кривые R_3 и Z_{L_n} на рис. 2б объединены в кривую $Z_{L_n} + R_3$. Как следует из рис. 2 и первого уравнения в (3), $\text{Re}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар упр})}\right] = 0,0493$ Ом и не зависит от ρ_3 . Упрощенные уравнения (3) записаны для одного значения ρ_3 , судя по рис. 2, значения $\rho_3 = 1000$ Ом·м.

Кривые $\text{Re}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right]$ и Z_{L_n} имеют одинаковый характер изменения, но на участке изменения ρ_3 от 50 до 1000 Ом·м $\text{Re}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right] > Z_{L_n}$ на 0,0057–0,0060 Ом.

Кривая $Z_{L_n} + R_3$ с увеличением ρ_3 приближается к кривой $\text{Re}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right]$ и при $\rho_3 = 1000$ Ом·м их значения практически выравниваются: $\text{Re}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right] = 0,0487$ Ом, а $Z_{L_n} + R_3 = 0,0485$ Ом.

На рис. 3 показано изменение индуктивных сопротивлений $\text{Im}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right]$, $\text{Im}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар упр})}\right]$ и $\text{Im}\left[jX_{L_i}\right] = X_{L_i}$ для рассматриваемой однопроводной ВЛ при изменении ρ_3 от 1 до 1000 Ом·м.

Как следует из рис. 3, кривые значений индуктивных сопротивлений $\text{Im}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right]$, и $\text{Im}\left[jX_{L_i}\right] = X_{L_i}$ при изменении ρ_3 от 1 до 1000 Ом·м полностью совпадают, а кривая $\text{Im}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар упр})}\right]$ имеет несколько меньшие значения.

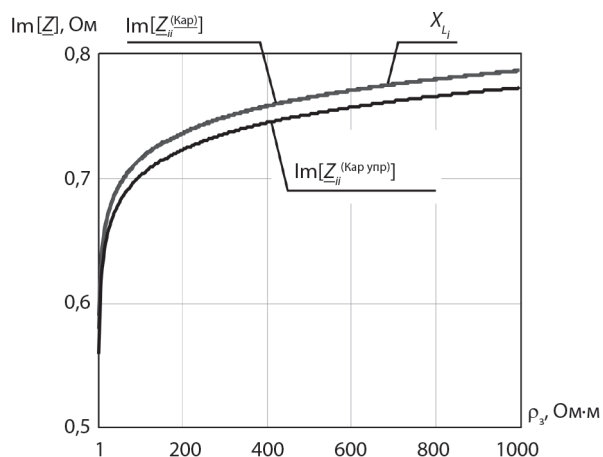


Рис. 3. Кривые изменения $\text{Im}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар})}\right]$, $\text{Im}\left[Z_{ii}^{(\text{Кар упр})}\right]$ и $\text{Im}\left[jX_{L_i}\right] = X_{L_i}$ при изменении ρ_3 от 1 до 1000 Ом·м

3. Распределение напряжения вдоль заземленной по концам линии

Электрическая схема замещения рассматриваемой однопроводной линии с параметрами по методу Карсона ($Z_{ii}^{(\text{Кар})}$) показана на рис. 4а, а по методу h_{equ} — на рис. 4б. Схема для упрощенного метода Карсона аналогична схеме на рис. 4а. На рис. 4: R_{3Y} — сопротивление $3Y$, R_Λ — сопротивление линии.

Для различных ρ_3 значения R_{3Y} изменяются от 0,5 до 60 Ом [7], а емкостное сопротивление между проводом линии i протяженностью 1 км и землей составляет 448 кОм. В схемах на рис. 4 емкостными токами можно пренебречь.

Входные сопротивления $Z_{\text{ВХ}}^{(\text{Кар})}$, $Z_{\text{ВХ}}^{(\text{Кар упр})}$ и $Z_{\text{ВХ}}^{(h_{\text{equ}})}$ определяем по выражениям:

$$Z_{\text{ВХ}}^{(\text{Кар})} = R_\Lambda + 2R_{3Y} + Z_{ii}^{(\text{Кар})}; \quad Z_{\text{ВХ}}^{(\text{Кар упр})} = R_\Lambda + 2R_{3Y} + Z_{ii}^{(\text{Кар упр})};$$

$$Z_{\text{ВХ}}^{(h_{\text{equ}})} = R_\Lambda + 2R_{3Y} + Z_{L_n} + R_3 + jX_{L_i}.$$

Для $\rho_3 = 100$ Ом·м получим:

$$Z_{ii}^{(\text{Кар})} = 0,0473 + j0,716 \text{ Ом};$$

$$Z_{ii}^{(\text{Кар упр})} = 0,0493 + j0,702 \text{ Ом};$$

$$Z_{L_n} = 0,0414 \text{ Ом}; \quad R_3 = 0,0006 \text{ Ом} \quad \text{и} \quad X_{L_i} = 0,715 \text{ Ом}.$$

Тогда значения входных сопротивлений будут:

$$Z_{\text{ВХ}}^{(\text{Кар})} = 20,121 + j0,716 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{ВХ}}^{(\text{Кар упр})} = 20,123 + j0,702 \text{ Ом};$$

$$Z_{\text{ВХ}}^{(h_{\text{equ}})} = 20,116 + j0,715 \text{ Ом}.$$

К рассмотренной выше заземленной по концам однопроводной линии i протяженностью $l = 1$ км добавим на расстоянии a (вне «мертвой зоны») параллельную однопроводную линию k протяженностью $l_k = 100$ км,

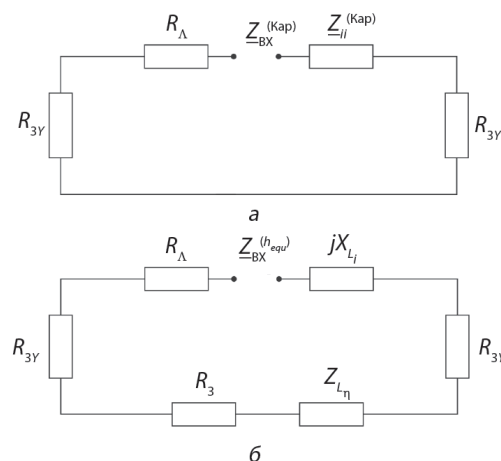


Рис. 4. Схема определения входного сопротивления для однопроводной линии с параметрами по методу Карсона (а) и по методу h_{equ} (б)

Методы и средства обеспечения безопасности Methods and Means of Safety

провод которой радиусом $r_k = 0,014$ м расположен на высоте $h_k = 19$ м и в нем протекает ток $I_k = 1000$ А.

По методу Карсона продольная ЭДС $\dot{E}_{ki}^{(Кар)}$, наводимая в линии i длиной l магнитным полем тока I_k линии k , определяется с использованием (2) по выражению в [2-4]:

$$\dot{E}_{ki}^{(Кар)} = -Z_{ki}^{(Кар)} I_k l = -\frac{j\omega\mu_0 I_k l}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2}\delta_3}{\sqrt{a^2 + (h_k - h_i)^2}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_k + h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right], \text{ В,}$$

где $l = 1000$ м.

По упрощенному методу Карсона из второго уравнения в (3) аналогично получим ЭДС $\dot{E}_{ki}^{(Кар упр)}$:

$$\dot{E}_{ki}^{(Кар упр)} = -Z_{ik}^{(Кар упр)} I_k l = -10^3 \left[(9,869 \cdot 10^{-4} \cdot f) + j \left(12,356 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot \ln \frac{D_e}{r_{ik}} \right) \right], \text{ В}$$

где $l = 1$ км.

По методу h_{equ} найдем, как в [3, 4], составляющие продольной ЭДС $\dot{E}_{ki}^{(h_{equ})}$, наведенной в линии i длиной l :

- ЭДС, наведенная МП тока I_k в линии k по выражению:

$$\dot{E}_{iki}^{(h_{equ})} = -j \frac{\omega\mu_0 l I_k}{4\pi} \ln \frac{a^2 + (h_k + h_{equ})^2}{a^2 + (h_k - h_i)^2};$$

- ЭДС, наведенная МП вихревых токов в земле по выражению:

$$\dot{E}_{\eta ki}^{(h_{equ})} = -\frac{\omega^2 \mu_0^2 I_k l}{8\pi^2 \rho_3} \int_{-h_i}^{h_{equ}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{equ}} \frac{\ln \frac{y^2 + (h_k + h_{equ})^2}{y^2 + (h_k + x)^2} (X-x)}{(X-x)^2 + (a-y)^2} dx dy dX;$$

- ЭДС, наведенная МП обратного тока в земле по выражению:

$$\dot{E}_{от ki}^{(h_{equ})} = -j \frac{\omega\mu_0 l}{2\pi} \times \int_{-h_i}^{h_{equ}} \int_{y^-}^{y^+} \int_0^{2h_{equ}} \frac{\dot{U}_3 (X-x)}{\rho_3 \left(l_k + 2\sqrt{x^2 + y^2} \right) \left[(X-x)^2 + (a-y)^2 \right]} dx dy dX,$$

где l_k — длина линии k ; $y^+ = x^+ = -y^- = 100\,000$ м; \dot{U}_3 — напряжение между ЗУ в начале и конце линии k

$$\dot{U}_3 = -\dot{I}_k \int_{y^-}^{y^+} \int_{x^-}^{x^+} \frac{1}{\rho_3 \left(l_k + 2\sqrt{x^2 + y^2} \right)} dx dy.$$

Значение результирующей ЭДС получим по выражению:

$$\dot{E}_{ki}^{(h_{equ})} = \dot{E}_{iki}^{(h_{equ})} + \dot{E}_{\eta ki}^{(h_{equ})} + \dot{E}_{от ki}^{(h_{equ})}.$$

Для расстояния между линиями $a = 50$ м, $\rho_3 = 100$ Ом·м и $l_k = 100\,000$ м величины наведенной ЭДС составят:

$$\dot{E}_{ki}^{(Кар)} = 191,815 e^{-j104,2^\circ} \text{ В, } \dot{E}_{ki}^{(Кар упр)} = 187,305 e^{-j105,3^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{E}_{ki}^{(h_{equ})} = 190,475 e^{-j102,5^\circ} \text{ В,}$$

при $\dot{E}_{iki}^{(h_{equ})} = -j185,12$ В, $\dot{E}_{\eta ki}^{(h_{equ})} = -41,30$ В, $\dot{E}_{от ki}^{(h_{equ})} = -j0,82$ В.

В схемы на рис. 4 включим наведенные ЭДС (рис. 5).

Ток в заземленной по концам однопроводной линии i определяем по выражениям:

$$j_{ki}^{(Кар)} = \dot{E}_{ki}^{(Кар)} / Z_{ВХ}^{(Кар)}, j_{ki}^{(Кар упр)} = \dot{E}_{ki}^{(Кар упр)} / Z_{ВХ}^{(Кар упр)} \text{ и}$$

$$j_{ki}^{(h_{equ})} = \dot{E}_{ki}^{(h_{equ})} / Z_{ВХ}^{(h_{equ})}.$$

Он имеет значения:

$$j_{ki}^{(Кар)} = 9,53 e^{-j106,3^\circ} \text{ А, } j_{ki}^{(Кар упр)} = 9,30 e^{-j107,3^\circ} \text{ А,}$$

$$j_{ki}^{(h_{equ})} = 9,46 e^{-j104,6^\circ} \text{ А.}$$

Умножая ток в линии i на сопротивление ЗУ $R_{3Y} = 10$ Ом, получим напряжение на заземляющем устройстве линии:

$$\dot{U}_{3Y}^{(Кар)} = 95,3 e^{-j106,3^\circ} \text{ В, } \dot{U}_{3Y}^{(Кар упр)} = 93,0 e^{-j107,3^\circ} \text{ В,}$$

$$\dot{U}_{3Y}^{(h_{equ})} = 94,6 e^{-j104,6^\circ} \text{ В.}$$

Вне «мертвой зоны» значения наведенных ЭДС, токов в линии и падений напряжений на ЗУ, полу-

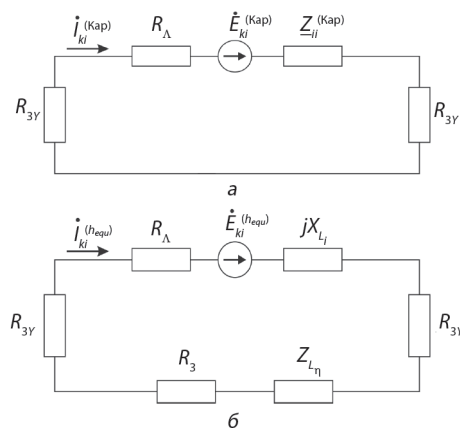


Рис. 5. Схема определения тока в однопроводной линии с параметрами по методу Карсона (а) и по методу h_{equ} (б)

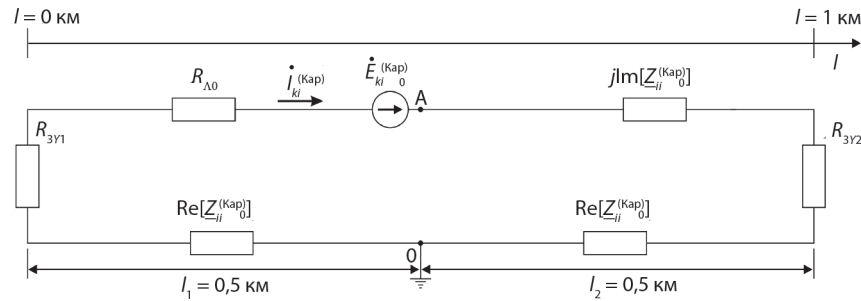


Рис. 6. Схема замещения участка однопроводной линии i по методу Карсона

ченные по методу Карсона и методу h_{equ} , практически совпадают между собой, но незначительно превышают результаты расчета, полученные по упрощенному методу Карсона.

Распределение напряжения вдоль рассмотренной линии i протяженностью 1 км или той же протяженности заземленного по концам участка этой линии рассмотрим с использованием параметров, полученных по методу Карсона. Значения параметров R_Λ , $Z_{ii}^{(Kap)}$ и $\dot{E}_{ki}^{(Kap)}$ получены для 1 км линии i , если мы их разделим на 1 км, то получим распределенные параметры:

$$R_{\Lambda 0} = R_\Lambda / 1 \text{ км} = 0,074 \text{ Ом/км},$$

$$\text{Im} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right] = \text{Im} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right] / 1 \text{ км} = 0,716 \text{ Ом/км},$$

$$\dot{E}_{ki}^{(Kap)} = \dot{E}_{ki}^{(Kap)} / 1 \text{ км} = 191,815 e^{-j104,2^\circ} \text{ В/км}.$$

Ток $j_{ki}^{(Kap)} = 9,53 e^{-j106,2^\circ}$ А во всех элементах схемы.

$\text{Re} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right] = 0,0473 \text{ Ом/км}$ обеспечивается активным сопротивлением земли и уходит в подземную часть схемы, т.е. ниже R_{3Y} , а $j \text{Im} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right]$ — удельное индуктивное сопротивление линии i остается в верхней части схемы — над R_{3Y} .

Примем потенциал в точке 0 равным нулю и определим изменение потенциала $\dot{U}(l)$ вдоль провода линии i при перемещении от точки 0 через сопротивление $\frac{1}{2} \text{Re} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right]$, R_{3Y1} и по проводу от начала участка линии i ($l = 0$ км) к концу линии i ($l = 1$ км) (рис. 6). При $l = 0$ км, т.е. в начале линии

$$\dot{U}(0) = -j_{ki}^{(Kap)} \left(R_{3Y1} + l_1 \text{Re} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right] \right) = 95,5 e^{j73,8^\circ} \text{ В}.$$

Распределение потенциала вдоль участка линии i определим по выражению:

$$\dot{U}(l) = \dot{U}(0) - j_{ki}^{(Kap)} \left\{ R_{\Lambda 0} + j \text{Im} \left[Z_{ii}^{(Kap)} \right] \right\} l + \left[\dot{E}_{ki}^{(Kap)} \right] l.$$

На рис. 7а показано распределение модуля, а на рис. 7б — аргумента потенциала $\dot{U}(l)$ вдоль участка линии i при изменении l от 0 до 1 км.

В точке А, когда $l = l_1 = 0,5$ км, $|\dot{U}(l)| = 0$ В. Аргумент $\dot{U}(l)$ в начале линии и до ее середины составляет $\arg[\dot{U}(l)] = 73,8^\circ$, а от середины и до конца ВЛ $\arg[\dot{U}(l)] = -106,2^\circ$. Таким образом, при $l = l_1 = 0,5$ км напря-

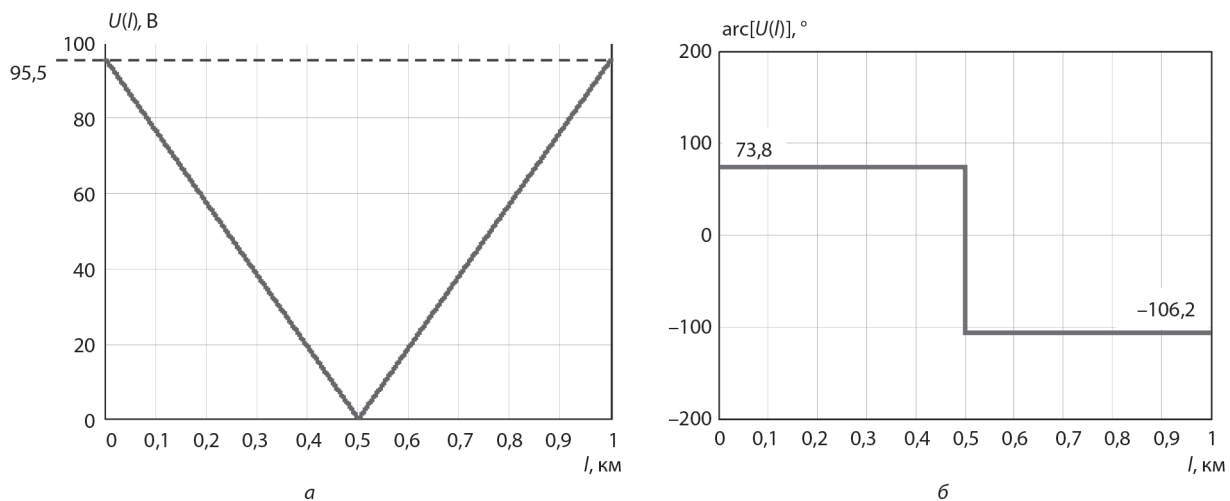


Рис. 7. Распределение модуля (а) и аргумента (б) потенциала $\dot{U}(l)$ вдоль линии i при изменении l от 0 до 1 км

Методы и средства обеспечения безопасности Methods and Means of Safety

жение $\dot{U}(l)$ на комплексной плоскости, проходя значение модуля через 0 В, изменяет свое направление на 180° .

Практически совпадающие кривые изменения $\dot{U}(l)$ получаются по упрощенному методу Карсона и по методу h_{equ} .

Заключение

Расчет наведенного напряжения по методу h_{equ} — помимо устранения больших погрешностей,

ЛИТЕРАТУРА

1. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. М.: Энергия, 1973.
2. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. СПб.: Элмор, 2007.
3. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Учет проводимости земли при определении ЭДС, наведенных в параллельных воздушных линиях электропередачи // ЭЛЕКТРО. 2010. № 3. С. 13–18.
4. Rubtsova N.B., Misrikhanov M.Sh., Murzin S.G., Tokarskij A.Yu. Longitudinal voltages, induced by parallel overhead transmis-

REFERENCES

1. Kostenko M.V., Perelman L.S., Shkarin Yu. P. Wave processes and electrical interference in a multi-wire high voltage lines. Moscow, Energia Publ., 1973. (in Russian)
2. Tsitsikjan G.N. Electromagnetic compatibility in electric power industry. St. Petersburg, ELMOR Publ., 2007. (in Russian)
3. AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above. EPRI, 2005.
4. Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 5th Ed. ABB, 1997.
5. Misrikhanov M.Sh., Tokarskiy A.Yu. Accounting for the ground conductivity under voltage induced in the parallel

возникающих в «мертвой зоне» расстояний между линиями при расчете по методу Карсона, — вне «мертвой зоны» дает хорошее совпадение с результатами этого метода и имеет небольшие расхождения с результатами, полученными по упрощенному методу Карсона.

Использование метода суперпозиции (наложения) позволит применить рассмотренный алгоритм для трехфазных параллельных воздействующих линий.

5. sion lines magnetic fields. PIERS Proceeding, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15, 2013, pp. 305–309.
5. AC Transmission Line Reference Book-200kV and Above. EPRI, 2005.
6. Electrical Transmission and Distribution Reference Book, 5th Ed. ABB, 1997.
7. РД 34.20.504-94. Типовая инструкция по эксплуатации воздушных линий электропередачи напряжением 35–800 кВ / РАО энергетики и электрификации «ЕЭС России», Департамент электрических сетей, 1996.

- overhead transmission lines determining. 2010, I. 3, pp.13-18. (in Russian)
6. Rubtsova N.B., Misrikhanov M.Sh., Murzin S.G., Tokarskij A. Yu. Longitudinal voltages, induced by parallel overhead transmission lines magnetic fields. PIERS Proceeding, Stockholm, Sweden, Aug. 12–15. 2013. P. 305–309.
7. RD 34.20.504-94. Standard instruction on the operation of 35–800 kV overhead transmission lines. RAO energy and electrification "UES of Russia". The Department of electrical networks, 1996. (in Russian)

Distribution of Voltage Induced by Magnetic Field of Parallel Transmission Line Along Dead and Grounded Lines

A.Yu. Tokarskiy, Team Manager, Senior Expert, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, FSBSI "Scientific Research Institute of Occupational Health", Moscow, Russia, JSC "Scientific-Technical Center of United Energy System Federal Grid Company", Moscow, Russia

N.B. Rubtsova, Head of the Scientific Coordination Department, Doctor of Biological Science, Professor, JSC "Scientific-Technical Center of United Energy System Federal Grid Company", Moscow, Russia

With the view of calculation methods accuracy increase during calculations by Carson's method, by simplified Carson's method and by hequ method, we considered induced voltage parameters, currents and voltage distribution along grounded on the ends single-wire transmission lines created by magnetic field of parallel single-wire operating line. It is shown that hequ method, eliminating errors in the "dead zone" in calculation by Carson's method, gives almost identical results outside the "dead zone", and small differences with the results of simplified Carson's method.

Keywords: single-wire transmission line, magnetic field, inherent resistance, mutual resistance, induced voltage and currents, voltage distribution along transmission line.