

УДК 621.315.175

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЛ 110–220 КВ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАВЕДЕННОГО ТОКА В ГРОЗОЗАЩИТНОМ ТРОСЕ НА ПРИМЕРЕ ВЛ 220 КВ

Воздушная линия электропередачи высокого напряжения (ВЛ ВН) в рабочем режиме является мощным источником магнитного поля промышленной частоты. В условиях эксплуатации получить параметры магнитного поля, создаваемого ВЛ ВН, затруднительно. Поэтому определение параметров магнитного поля, как на эксплуатируемых, так и на проектируемых ВЛ ВН, рекомендуется выполнять на основе математического моделирования. При разработке методики определения параметров магнитного поля ставилась задача получить аналитические выражения, позволяющие оценить вектор индукции магнитного поля двухцепной ВЛ 110–220 кВ в рабочем режиме. Найдены аналитические выражения для оценки вектора индукции магнитного поля двухцепной ВЛ 110–220 кВ на плоскости XOY зависят от времени, варианта фазировки цепей, величин фазных токов каждой цепи и координат точек подвеса фазных проводников. На расчетном примере показано, что наибольшее значение вектора индукции магнитного поля обеспечивает вариант одинаковой фазировки цепей двухцепной ВЛ 220 кВ, проводники которой расположены симметрично относительно оси OY . Применение разработанной методики позволяет оценить величину наведенного тока для предотвращения гололедообразования на грозозащитном тросе двухцепной ВЛ 110–220 кВ в рабочем режиме.

АВТОРЫ:

Кротков Е.А.,
Безменова Н.В.,
Дадонов Д.Н.,
Сорокин А.Г.,
Щобак А.А.,
Самарский государственный
технический университет, г. Самара

#воздушная линия электропередачи;
#грозозащитный трос;
#гололедно-изморозевые отложения;
#электромагнитное поле; #вектор индукции магнитного поля;
#наведенный ток



ВВЕДЕНИЕ

Воздушная линия электропередачи высокого напряжения (далее — ВЛ ВН) в рабочем режиме является мощным источником магнитного поля промышленной частоты [1, 2]. В условиях эксплуатации получить экспериментальные данные, отвечающие максимальным уровням напряженности магнитного поля, создаваемого ВЛ ВН, затруднительно. Это связано с тем, что регистрация параметров магнитного поля отличается от аналогичной задачи для электрического поля высоким уровнем неопределенности электрического режима ВЛ ВН, возникающей вследствие большого диапазона изменения фазных токов, в то время как фазные напряжения изменяются в небольшом интервале. В связи с этим для оценки напряженности магнитного поля ВЛ ВН применяют два метода: аналитический и численный. Преимущество аналитического метода заключается в его простоте, а недостаток — в зависимости погрешности результатов расчета от принятых допущений в математической модели. В качестве численных методов расчета используется метод конечных элементов, имеющий достаточно высокую точность результатов расчета параметров магнитного поля ВЛ ВН [3]. При разработке методики определения параметров магнитного поля ставилась задача получить относительно простые аналитические выражения, позволяющие оценить вектор индукции магнитного поля ВЛ ВН [4].

Оценка параметров вектора индукции магнитного поля ВЛ 110–220 кВ необходима для расчета величины наведенного тока, предотвращающего образование гололеда на грозозащитном тросе [5–7]. Для этого на двухцепной ВЛ 110–220 кВ создается замкнутый и заземленный с двух сторон в нормальном режиме контур, состоящий из грозозащитного троса T_1 и изолированного проводника T_2 , проложенного по поверхности земли (рис. 1) [8]. Ток, наведенный в контуре T_1-T_2 , является результатом взаимодействия магнитных полей проводников фаз ВЛ 110–220 кВ, а его величина зависит от пространственно-временных параметров результирующего вектора индукции магнитного поля и геометрических размеров контура.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Известно [9–11], что токи фазных проводников одноцепной ВЛ ВН создают магнитное поле, пространственный вектор индукции которого в различные моменты времени не остается постоянным и, вращаясь неравномерно, описывает эллипс (рис. 2) с полуосями B_{max} и B_{min} , имеющий наклон к оси OX . Модуль вектора индукции магнитного поля (рис. 3) дважды за период промышленной частоты становится максимальным и минимальным.

Математические модели, рассматриваемые в работах [12–16], ориентированы на определение уровней напряженности электрического и магнитного поля, создаваемое

СХЕМА СОЕДИНЕНИЯ ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА T_1 И ПРОВОДНИКА T_2 НА УЧАСТКЕ l_k ВЛ 110–220 КВ

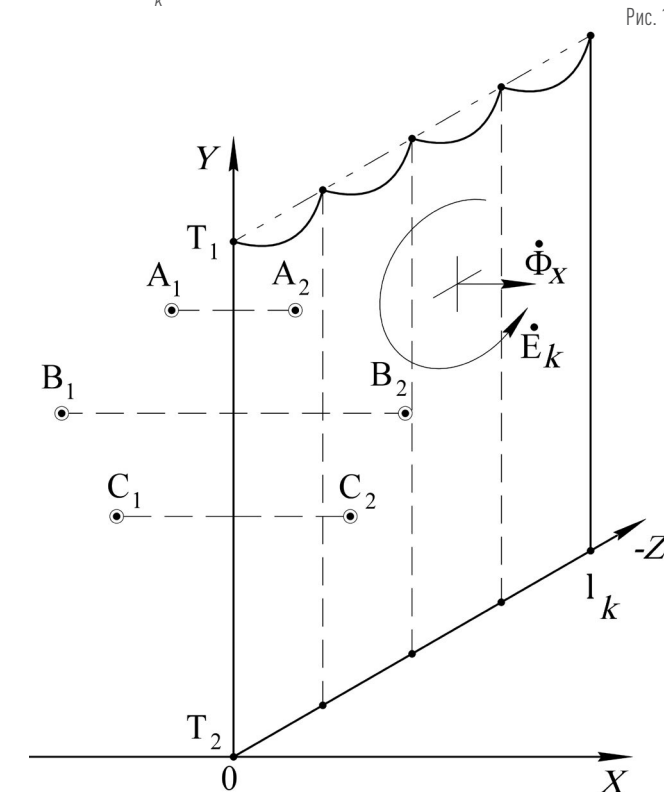


Рис. 1.

ЭЛЛИПС, ОПИСЫВАЕМЫЙ ВЕКТОРОМ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЛ ВН НА ПЛОСКОСТИ XOY

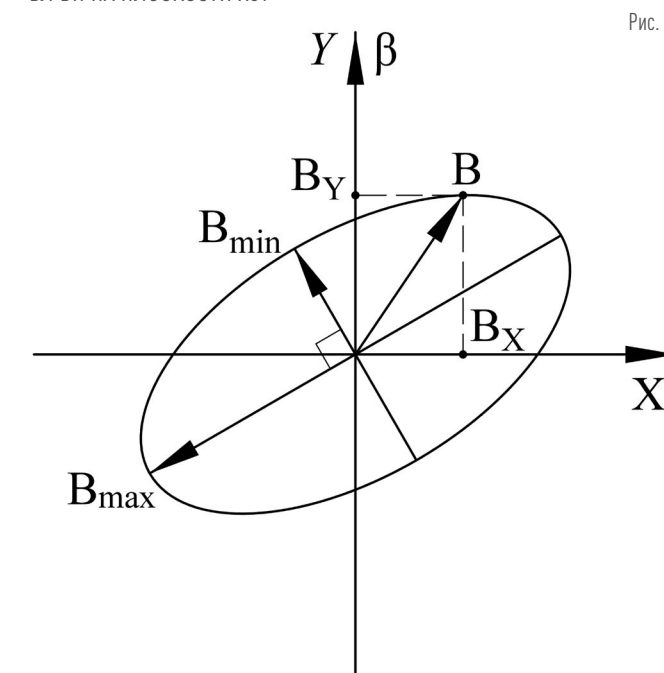


Рис. 2.

ЗАВИСИМОСТЬ МОДУЛЯ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЛ ОТ ВРЕМЕНИ

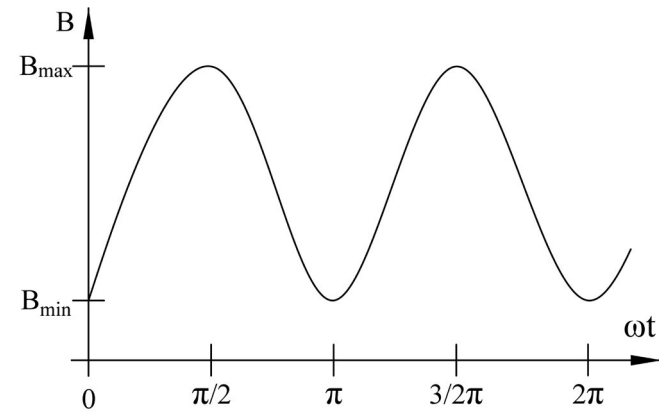


Рис. 3.

СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ ПРОВОДОВ ЦЕПИ A₁B₁C₁(A₂B₂C₂) И ГРОЗОЗАЩИТНОГО ТРОСА T₁ И ПРОВОДНИКА T₂ НА ОПОРЕ ВЛ 110–220 кВ

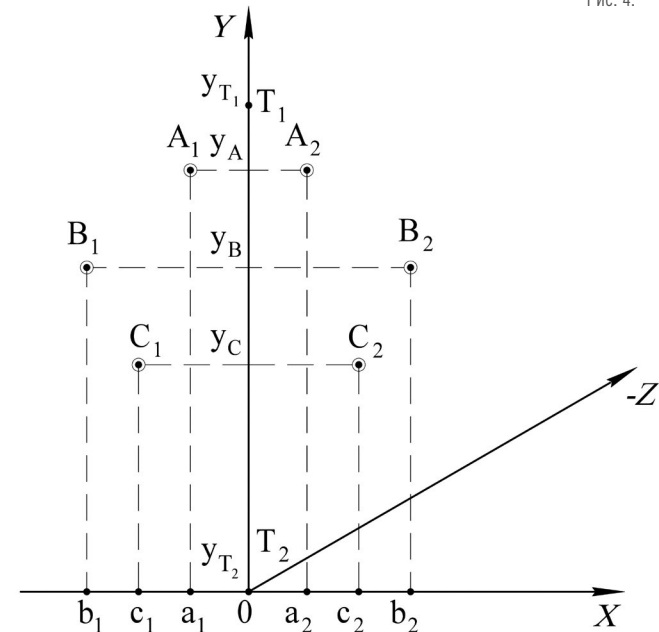


Рис. 4.

ного ВЛ 500 кВ с горизонтальным расположением фазных проводников, для оценки их влияния на окружающую среду и человека. В указанных математических моделях рассматривается частный случай электромагнитного поля: плоскопараллельное электрическое и магнитное поле длинной трехфазной ВЛ ВН. В общем случае магнитное поле двухцепной ВЛ 110–220 кВ в точках, принадлежащих отрезку [Y_{T1}; Y_{T2}] (рис. 4), является не плоскопараллельным.

При разработке методики расчета параметров вектора индукции магнитного поля ВЛ 110–220 кВ было принято следующее допущение [17]: распределение плотности тока в фазных проводниках принималось равномерным, поэтому фазные проводники моделировались в виде прямых длинных нитей.

Для определения вектора индукции магнитного поля от проводника конечной длины с током применяется закон полного тока [18]. С учетом принятых допущений вектор индукции магнитного поля в некоторой точке K, принадлежащей отрезку [Y_{T1}; Y_{T2}] (рис. 4), отдельно для каждого фазного проводника цепи A₁ B₁ C₁ (A₂ B₂ C₂) ВЛ 110–220 кВ определяется выражением:

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \frac{i}{2\pi r} \quad (1)$$

где: μ₀ = 4π · 10⁻⁷ Гн/м — магнитная постоянная;

μ = 1 — относительная магнитная проницаемость воздуха, принимаемая в технических расчетах;

r — расстояние между точкой K и проводниками цепей A₁ B₁ C₁ (A₂ B₂ C₂).

Составляющие вектора магнитной индукции поля \vec{B} по оси OX в точке K, принадлежащей отрезку [Y_{T1}; Y_{T2}], создаваемые токами цепи A₁ B₁ C₁ (A₂ B₂ C₂) двухцепной ВЛ 110–220 кВ, определяются выражениями [12, 13]:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{XA_1} &= \mu_0 \frac{i_{A_1}}{2\pi} \cdot \frac{y_a - y}{a_1^2 + (y_a - y)^2}; \\ \dot{B}_{XB_1} &= \mu_0 \frac{i_{B_1}}{2\pi} \cdot \frac{y_b - y}{b_1^2 + (y_b - y)^2}; \\ \dot{B}_{XC_1} &= \mu_0 \frac{i_{C_1}}{2\pi} \cdot \frac{y_c - y}{c_1^2 + (y_c - y)^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{XA_2} &= \mu_0 \frac{i_{A_2}}{2\pi} \cdot \frac{y_a - y}{a_2^2 + (y_a - y)^2}; \\ \dot{B}_{XB_2} &= \mu_0 \frac{i_{B_2}}{2\pi} \cdot \frac{y_b - y}{b_2^2 + (y_b - y)^2}; \\ \dot{B}_{XC_2} &= \mu_0 \frac{i_{C_2}}{2\pi} \cdot \frac{y_c - y}{c_2^2 + (y_c - y)^2}. \end{aligned} \quad (3)$$

Составляющие вектора магнитной индукции поля \vec{B} по оси OY в точке K, принадлежащей отрезку [Y_{T1}; Y_{T2}], создаваемые токами цепи A₁ B₁ C₁ (A₂ B₂ C₂) двухцепной ВЛ 110–220 кВ, определяются выражениями [12, 13]:

$$\begin{aligned} \dot{B}_{YA_1} &= \mu_0 \frac{i_{A_1}}{2\pi} \cdot \frac{a_1}{a_1^2 + (y_a - y)^2}; \\ \dot{B}_{YB_1} &= \mu_0 \frac{i_{B_1}}{2\pi} \cdot \frac{b_1}{b_1^2 + (y_b - y)^2}; \\ \dot{B}_{YC_1} &= \mu_0 \frac{i_{C_1}}{2\pi} \cdot \frac{c_1}{c_1^2 + (y_c - y)^2}. \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{B}_{YA_2} &= \mu_0 \frac{i_{A_2}}{2\pi} \cdot \frac{a_2}{a_2^2 + (y_a - y)^2}; \\ \dot{B}_{YB_2} &= \mu_0 \frac{i_{B_2}}{2\pi} \cdot \frac{b_2}{b_2^2 + (y_b - y)^2}; \\ \dot{B}_{YC_2} &= \mu_0 \frac{i_{C_2}}{2\pi} \cdot \frac{c_2}{c_2^2 + (y_c - y)^2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Результирующий вектор магнитной индукции \vec{B}_{XK} и \vec{B}_{YK} в точке K определяется суммой векторов магнитных индукций, создаваемых токами цепей ВЛ 110–220 кВ в отдельности:

$$\vec{B}_{XK} = \vec{B}_{XA_1} + \vec{B}_{XB_1} + \vec{B}_{XC_1} + \vec{B}_{XA_2} + \vec{B}_{XB_2} + \vec{B}_{XC_2}. \quad (6)$$

$$\vec{B}_{YK} = \vec{B}_{YA_1} + \vec{B}_{YB_1} + \vec{B}_{YC_1} + \vec{B}_{YA_2} + \vec{B}_{YB_2} + \vec{B}_{YC_2}. \quad (7)$$

При симметричном расположении фаз цепей (вариант фазировки цепей A₁ B₁ C₁ (A₂ B₂ C₂)) относительно оси OY двухцепной ВЛ 110–220 кВ вектор индукции магнитного поля \vec{B} имеет только одну составляющую по оси OX, в чем можно убедиться, рассмотрев составляющие вектора индукции \vec{B}_K по осям координат в точке K. В качестве примера на рис. 5 показаны составляющие \vec{B}_{CX1} , \vec{B}_{CY1} , \vec{B}_{CX2} и \vec{B}_{CY2} векторов индукции \vec{B}_{C1} и \vec{B}_{C2} , создаваемых токами фаз C₁ и C₂. При симметричной электрической нагрузке цепей комплексные значения токов фаз C₁ и C₂ равны i_{C1} = i_{C2}, поэтому равны и составляющие $\dot{B}_{CX} = \dot{B}_{CX1} = \dot{B}_{CX2}$ и $\dot{B}_{CY} = \dot{B}_{CY1} = \dot{B}_{CY2}$, но, учитывая их направления, получаем $\vec{B}_{CX} = \vec{B}_{CX2}$ и $\vec{B}_{CY1} = -\vec{B}_{CY2}$. Вследствие этого $\vec{B}_{CX\text{SUM}} = \vec{B}_{CX1} + \vec{B}_{CX2} = 2\vec{B}_{CX}$, а $\vec{B}_{CY\text{SUM}} = \vec{B}_{CY1} + \vec{B}_{CY2} = 0$. Аналогичные рассуждения справедливы и для фаз A₁, A₂ и B₁, B₂.

При несимметричном расположении фаз цепей (варианты фазировки C₁ B₁ A₁ (A₂ B₂ C₂); B₁ C₁ A₁ (A₂ B₂ C₂)) относительно оси OY двухцепной ВЛ 110–220 кВ вектор индукции магнитного поля \vec{B} будет иметь две составляющие \vec{B}_X , \vec{B}_Y по осям OX и OY.

Таким образом, для варианта фазировки цепей A₁ B₁ C₁ (A₂ B₂ C₂) двухцепной ВЛ 110–220 кВ вектор индукции магнитного поля \vec{B} в плоскости YOZ рассматриваемой ВЛ имеет линейную поляризацию, т.к. составляющая $\vec{B}_Y = 0$, а для вариантов C₁ B₁ A₁ (A₂ B₂ C₂); B₁ C₁ A₁ (A₂ B₂ C₂) — эллиптическую [9, 11, 12].

Для вариантов фазировки цепей C₁ B₁ A₁ (A₂ B₂ C₂) и B₁ C₁ A₁ (A₂ B₂ C₂) двухцепной ВЛ 110–220 кВ определим параметрическое уравнение эллипса (годографа) результирующего вектора индукции магнитного поля в точке K, для этого перейдем от комплексных действующих значений составляющих \vec{B}_{XK} и \vec{B}_{YK} к временным зависимостям [19]:

СОСТАВЛЯЮЩИЕ ВЕКТОРОВ ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ТОКОВ ФАЗ C₁ И C₂

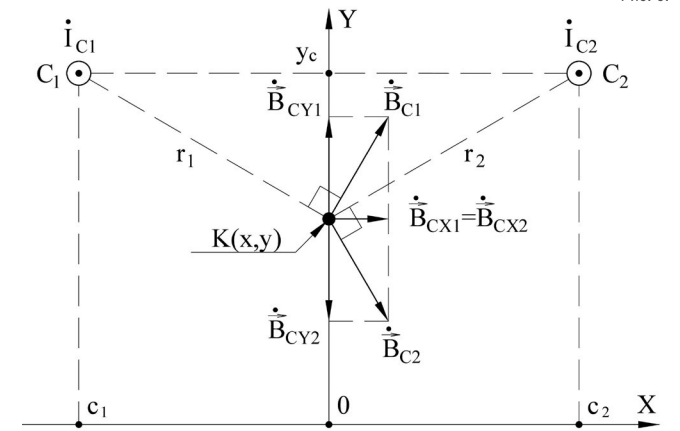


Рис. 5.

$$B_{XK}(t) = \sqrt{2} B_X \sin(\omega t + \varphi_X). \quad (8)$$

$$B_{YK}(t) = \sqrt{2} B_Y \sin(\omega t + \varphi_Y). \quad (9)$$

где φ_X, φ_Y — начальные фазные углы составляющих \vec{B}_{XK} и \vec{B}_{YK} .

Экстремальные действующие значения индукции магнитного поля B_{max/min} рассчитываются по формуле [9]:

$$B_{max/min} = \left[\frac{(B_X^2 + B_Y^2)}{2} \pm \sqrt{\frac{(B_X^2 + B_Y^2)^2 - 4B_X^2 B_Y^2 \sin^2(\varphi_X - \varphi_Y)}{2}} \right]^{1/2}, \quad (10)$$

в которой знак «плюс» соответствует максимуму, а «минус» — минимуму.

Коэффициент эллипсности k_э индукции магнитного поля и угол прохождения максимума α_{max} в радианах определяются по выражениям [9]:

$$k_{э} = \frac{B_{min}}{B_{max}}. \quad (11)$$

$$\alpha_{max} = 0,5 \arccos \left(\frac{B_X^2 - B_Y^2}{\sqrt{(B_X^2 + B_Y^2)^2 - 4B_X^2 B_Y^2 \sin^2(\varphi_X - \varphi_Y)}} \right). \quad (12)$$

Для нахождения ЭДС \dot{E}_k , наведенной в контуре T₁–T₂, определим элементарный магнитный поток dΦ_X(y) через элементарную площадь dS = ydyX плоскости контура T₁–T₂:

$$d\Phi_X(y) = \dot{B}_X(y) dS, \quad (13)$$

тогда полный магнитный поток по оси OX Φ_X(l_k), проходящий через плоскость контура T₁–T₂ длиной l_k (рис. 1), найдем по выражению:

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ КОНТУРА T₁-T₂ ДЛИНОЙ l_k

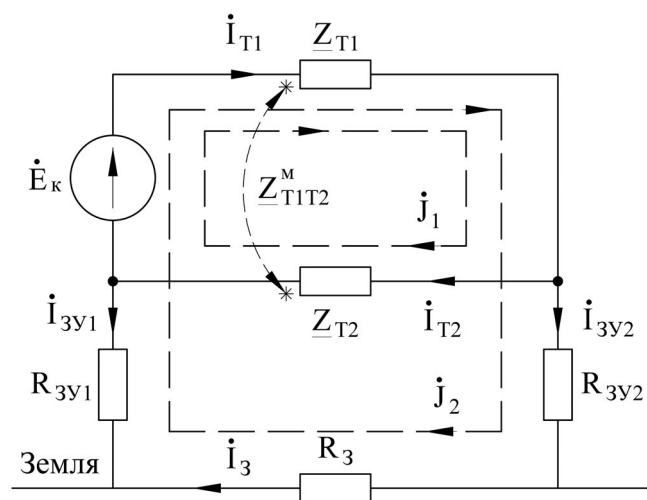


Рис. 6.

$$\Phi_x(l_k) = \int_0^{y_{T1}} \dot{B}_x(y) \int_0^{l_k} dz dy = l_k \int_0^{y_{T1}} \dot{B}_x(y) dy. \quad (14)$$

где $\dot{B}_x(y)$ — результирующая составляющая индукции магнитного поля по оси OX, полученная по выражениям [2, 3, 6].

С учетом выражения (14) получим ЭДС \dot{E}_k , наведенную в контуре T₁-T₂:

$$\dot{E}_k = -\frac{d\Phi_x(l_k)}{dt} = -j\omega l_k \int_0^{y_{T1}} \dot{B}_x(y) dy. \quad (15)$$

Для нахождения токов, протекающих в грозозащитном тросе T₁ и проводнике T₂ контура T₁-T₂, составим схему замещения, приведенную на рис. 6,

где: Z_{T1}, Z_{T2} — комплексные сопротивления грозозащитного троса T₁ и проводника T₂ длиной l_k;

Z_{T1T2}^M — взаимное индуктивное сопротивление между грозозащитным тросом T₁ и проводником T₂ длиной l_k;

РАЗМЕРЫ ОПОРЫ П220-2,4-9 ДВУХЦЕПНОЙ ВЛ 220 КВ

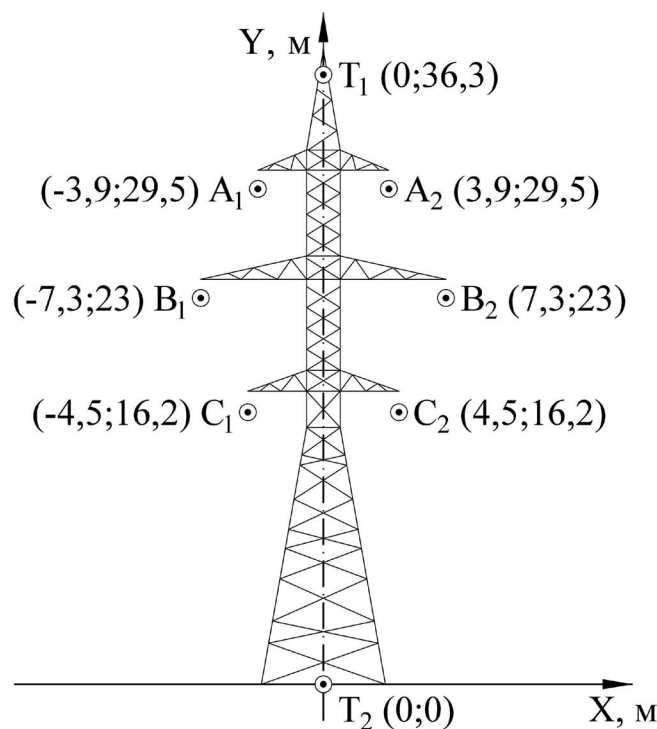
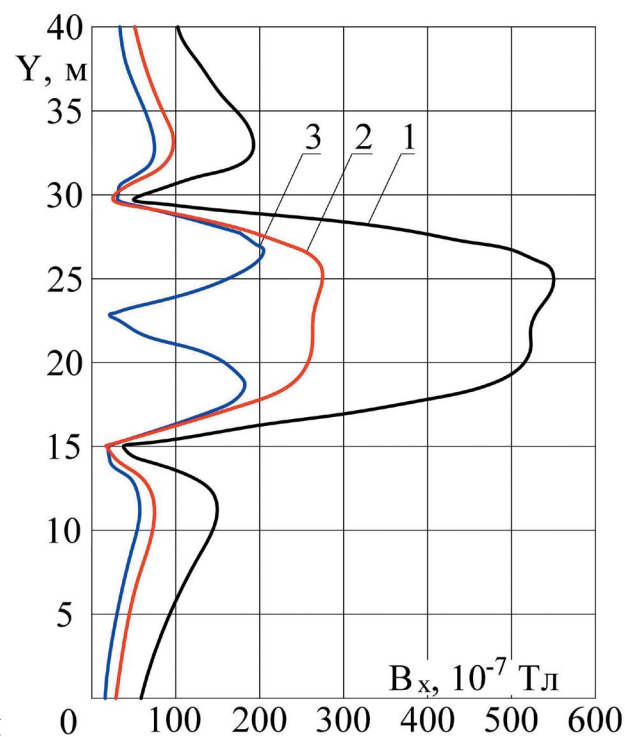


Рис. 7.

КРИВАЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ B_x ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ОТРЕЗКЕ [0;40] ДЛЯ ВАРИАНТОВ ФАЗИРОВКИ ЦЕПЕЙ: 1 — A₁B₁C₁ (A₂B₂C₂); 2 — B₁C₁A₁ (A₂B₂C₂); 3 — C₁B₁A₁ (A₂B₂C₂)

Рис. 8.



R_{3y1}, R_{3y2} — активные сопротивления заземляющего устройства опор ВЛ;

R_3 — активное сопротивление обратному току в земле.

Собственное индуктивное сопротивление грозозащитного троса T₁, проводника T₂ длиной l_k определяется на основе уравнения Carson [20–22] по выражению:

$$Z_{T1(T2)}^C = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{2} \delta_3}{r_{np}} - j \frac{\pi}{4} + \frac{4}{3} \frac{h_i}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right) l_k. \quad (16)$$

где: $\delta_3 = \sqrt{2\rho_3/\omega\mu_0}$ — глубина проникновения электромагнитного поля в землю;

ρ_3 — удельное сопротивление земли;

r_{np} — радиус проводника (грозозащитного троса T₁, проводника T₂);

h_i — высота расположения грозозащитного троса T₁, проводника T₂ над землей ($h_{T1} = y_{T1}; h_{T2} = 0$).

В выражении (16) мнимая часть $Im[Z_{T1}^C], Im[Z_{T2}^C]$ определяет индуктивные сопротивления грозозащитного троса T₁ и проводника T₂, а реальная часть $Re[Z_{T1}^C], Re[Z_{T2}^C]$ — активное сопротивление обратному току в земле R_3 , расположенное на схеме замещения (рис. 6) после R_{3y1}, R_{3y2} . При выполнении расчетов сопротивление обратному току в земле принимается равным $R_3 = 0,047$ Ом/км.

Комплексные сопротивления Z_{T1}, Z_{T2} грозозащитного троса T₁ и проводника T₂ определяются по выражениям:

$$Z_{T1} = R_{T1} + jIm[Z_{T1}^C], Z_{T2} = R_{T2} + jIm[Z_{T2}^C]. \quad (17)$$

где: R_{T1}, R_{T2} — активные сопротивления грозозащитного троса T₁ и проводника T₂ длиной l_k.

Взаимное индуктивное сопротивление между грозозащитным тросом T₁ и проводником T₂ длиной l_k определяется на основе уравнения Carson [20–22] по выражению:

$$Z_{T1T2}^M = j \frac{\omega \mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{\sqrt{2} \delta_3}{r_{T1T2}} - j \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_{T1} + h_{T2}}{\delta_3} (1+j) - 0,0772 \right) l_k. \quad (18)$$

где: $r_{T1T2} = \sqrt{a^2_{T1T2} + (h_{T1} - h_{T2})^2}$ — расстояние между осями грозозащитного троса T₁ и проводником T₂;

h_{T1}, h_{T2} — высоты осей грозозащитного троса T₁ и проводника T₂;

a_{T1T2} — расстояние между проекциями осей грозозащитного троса T₁ и проводника T₂ на землю. Учитывая, что $h_{T1} = y_{T1}; h_{T2} = 0, a_{T1T2} = 0$, получаем $r_{T1T2} = h_{T1} = y_{T1}$.

ДЕЙСТВУЮЩИЕ ЗНАЧЕНИЯ СОСТАВЛЯЮЩИХ B_x, B_y ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВЛ 220 КВ

Таблица 1

Время	Вариант фазировки цепей ВЛ 220 кВ						
	A ₁ B ₁ C ₁ (A ₂ B ₂ C ₂)	B ₁ C ₁ A ₁ (A ₂ B ₂ C ₂)	C ₁ B ₁ A ₁ (A ₂ B ₂ C ₂)	B _x , 10 ⁻⁷ Тл	B _y , 10 ⁻⁷ Тл	B _x , 10 ⁻⁷ Тл	B _y , 10 ⁻⁷ Тл
t, с	B _x , 10 ⁻⁷ Тл	B _y , 10 ⁻⁷ Тл	B _x , 10 ⁻⁷ Тл	B _y , 10 ⁻⁷ Тл	B _x , 10 ⁻⁷ Тл	B _y , 10 ⁻⁷ Тл	
0	-247,99	0	-264,11	-161,98	16,11	-6,07	
0,001	-91,62	0	-248,30	-150,79	18,20	-2,52	
0,002	73,72	0	-208,20	-124,85	18,50	1,27	
0,003	231,84	0	-147,71	-86,69	17,00	4,94	
0,004	367,27	0	-72,76	-40,04	13,82	8,13	
0,005	466,75	0	9,30	10,52	9,30	10,52	
0,006	520,54	0	90,46	60,06	3,86	11,89	
0,007	523,38	0	162,76	103,72	-1,94	12,09	
0,008	474,98	0	219,13	137,23	-7,56	11,10	
0,009	380,09	0	254,05	157,30	-12,45	9,03	
0,01	247,99	0	264,11	161,98	-16,11	6,07	
0,011	91,62	0	248,30	150,79	-18,20	2,52	
0,012	-73,72	0	208,20	124,85	-18,50	-1,27	
0,013	-231,84	0	147,71	86,69	-17,00	-4,94	
0,014	-367,27	0	72,76	40,04	-13,82	-8,13	
0,015	-466,75	0	-9,30	-10,52	-9,30	-10,52	
0,016	-520,54	0	-90,46	-60,06	-3,86	-11,89	
0,017	-523,38	0	-162,76	-103,72	1,94	-12,09	
0,018	-474,98	0	-219,13	-137,23	7,56	-11,10	
0,019	-380,09	0	-254,05	-157,30	12,45	-9,03	
0,02	-247,99	0	-264,11	-161,98	16,11	-6,07	

Для нахождения токов в ветвях схемы замещения (рис. 6) составим систему уравнений по методу контурных токов [23]:

$$\begin{cases} J_1(Z_{T1} + Z_{T2} - 2Z_{T1T2}^M) + J_2(Z_{T1} - Z_{T1T2}^M) = \dot{E}_k; \\ J_1(Z_{T1} - Z_{T1T2}^M) + J_2(Z_{T1} + R_{3y1} + R_{3y2} + R_3) = \dot{E}_k. \end{cases} \quad (19)$$

Определив контурные токи J₁ и J₂, найдем искомые токи в грозозащитном тросе T₁ и проводнике T₂:

$$\dot{I}_{T1} = J_1 + J_2, \dot{I}_{T2} = J_1, \dot{I}_3 = J_2. \quad (20)$$

ГОДОГРАФЫ ВЕКТОРА ИНДУКЦИИ \vec{B}_K МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТОЧКЕ К (0;23) ЗА ПЕРИОД ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ ДЛЯ ВАРИАНТОВ ФАЗИРОВКИ ЦЕПЕЙ: 1 — $A_1 B_1 C_1 (A_2 B_2 C_2)$; 2 — $B_1 C_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$; 3 — $C_1 B_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$

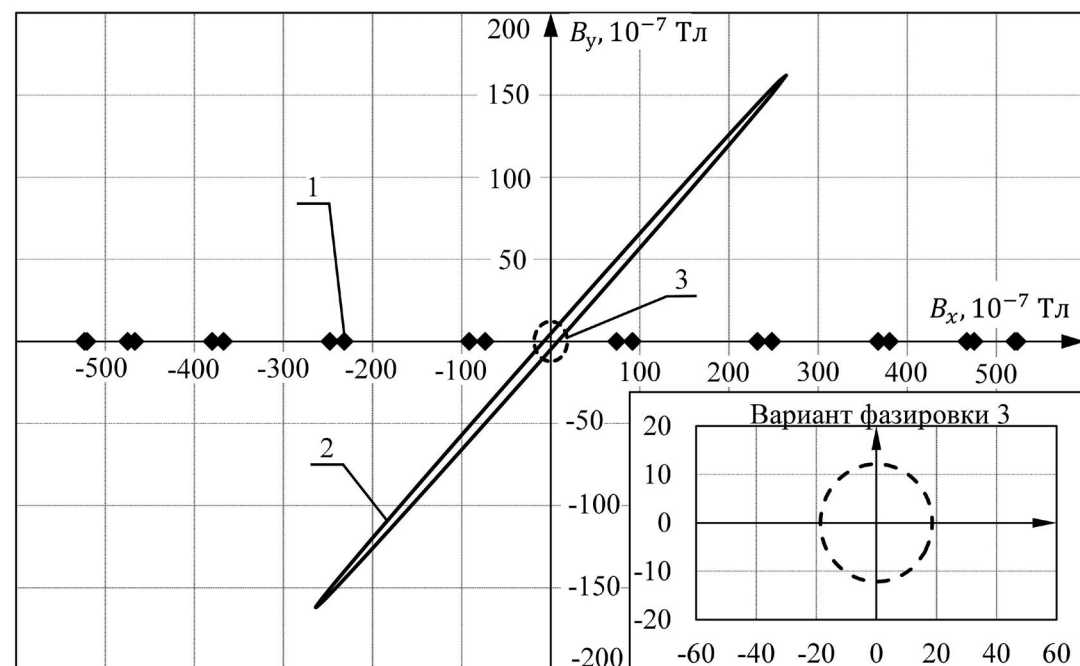


Рис. 9.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выполним пример расчета параметров вектора индукции магнитного поля в некоторой точке контура T_1-T_2 двухцепной ВЛ 220 кВ с опорами типа П220-2,4-9,3 [24], приведенной на рис. 7, с тремя вариантами фазировки двух цепей: $A_1 B_1 C_1 (A_2 B_2 C_2)$; $B_1 C_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$; $C_1 B_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$.

В расчете примем следующие допущения: отсутствие провиса проводников фаз, грозозащитного троса T_1 и проводника T_2 между промежуточными опорами ВЛ 220 кВ; грозозащитный трос T_1 и проводник T_2 расположены на осевой линии опоры, совпадающей с осью OY . За начало координат (точку (0;0)) примем точку пересечения осевой линии опоры ВЛ 220 кВ с горизонтальной поверхностью земли (осью OX). Обозначим координаты расположения проводников фаз, грозозащитного троса T_1 и проводника T_2 относительно начала координат:

- цепь 1: $A_1 (-3,9;29,5)$, $B_1 (-7,3;23)$, $C_1 (-4,5;16,2)$;
- цепь 2: $A_2 (3,9;29,5)$, $B_2 (7,3;23)$, $C_2 (4,5;16,2)$;
- грозозащитный трос T_1 : (0;36,3);
- дополнительный проводник T_2 : (0;0).

Электрическая нагрузка каждой цепи ВЛ 220 кВ принята симметричной с действующим значением тока 700 А.

Результаты расчетов действующих значений составляющей результирующего вектора индукции магнитного поля двухцепной ВЛ 220 кВ на отрезке оси ординат [0;40] приведены на рис. 8. Кривая распределения составляющей вектора индукции магнитного поля двухцепной ВЛ 220 кВ зависит от варианта фазировки цепей, имеет выраженные максимумы и минимумы на отрезке [0;40] оси OY . Для рассмотренных вариантов фазировки цепей ВЛ 220 кВ максимальные значения составляющей B_x находятся на отрезке [17;28]: для варианта $A_1 B_1 C_1 (A_2 B_2 C_2)$ (кривая 1, рис. 8) достигает $549 \cdot 10^{-7}$ Тл; для $B_1 C_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$ (кривая 2, рис. 8) B_x достигает $274 \cdot 10^{-7}$ Тл; для $C_1 B_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$ (кривая 3, рис. 8) B_x достигает $204 \cdot 10^{-7}$ Тл.

Для рассмотренных вариантов фазировки цепей ВЛ 220 кВ определены значения составляющих \dot{B}_x , \dot{B}_y результирующего вектора индукции магнитного поля в точке К (0;23):

$$A_1 B_1 C_1 (A_2 B_2 C_2) \quad \dot{B}_x = \dot{B}_x e^{j\varphi_x} = 528 e^{-j28^\circ}, \quad \dot{B}_y = \dot{B}_y e^{j\varphi_y} = 0.$$

$$B_1 C_1 A_1 (A_2 B_2 C_2) \quad \dot{B}_x = 264 e^{-j88^\circ}, \quad \dot{B}_y = 162 e^{-j86^\circ}.$$

$$C_1 B_1 A_1 (A_2 B_2 C_2) \quad \dot{B}_x = 18 e^{j60^\circ}, \quad \dot{B}_y = 12 e^{-j30^\circ}.$$

Также стоит отметить, что при фазировке $C_1 B_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$ начальные фазные углы составляющих \dot{B}_x , \dot{B}_y , имеют постоянные значения $\varphi_x = 60^\circ$, $\varphi_y = -30^\circ$ для всех точек, принадлежащих отрезку [0;40].

Результаты расчетов действующих значений составляющих B_x , B_y вектора индукции магнитного поля ВЛ 220 кВ в точке К (0;23) за период промышленной частоты приведены в таблице 1 и на рис. 9.

Анализ результатов расчета показал:

- значения составляющих \dot{B}_x , \dot{B}_y вектора индукции магнитного поля двухцепной ВЛ 220 кВ на плоскости XOY зависят от времени, варианта фазировки цепей, величин фазных токов каждой цепи и координат точек подвеса фазных проводников;
- при фазировке цепей $B_1 C_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$ и $C_1 B_1 A_1 (A_2 B_2 C_2)$ ВЛ 220 кВ вектор индукции магнитного поля в точке К (0;23) имеет эллиптическую поляризацию (кривая 2 и 3, рис. 8);
- при фазировке цепей $A_1 B_1 C_1 (A_2 B_2 C_2)$ ВЛ 220 кВ вектор индукции магнитного поля в точке К (0;23) имеет линейную поляризацию (линия 1, рис. 8) и наибольшие значения по сравнению с другими вариантами фазировки.

Разработанная методика расчета параметров результирующего вектора индукции магнитного поля двухцепной ВЛ 110–220 кВ для оценки величины наведенного тока может быть использована для предотвращения гололедообразования на грозозащитном тросе в рабочем режиме ВЛ.

Авторы благодарны рецензенту, д.т.н. А.Ю. Токарскому, который внимательно прочитал рукопись и высказал ценные замечания по улучшению статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кадомская К.П., Степанов И.М. Анализ интенсивности электромагнитного поля, инициируемого воздушными линиями высокого напряжения. // Электричество. 2009. № 3. — С. 24–30.
2. Кадомская К.П., Степанов И.М. Влияние конструкций воздушных линий высокого напряжения на интенсивности магнитных полей по их трассам. // Третья Российская с международным участием научно-практическая конференция «Линии электропередачи 2008: проектирование, строительство, опыт эксплуатации и научно-технический прогресс». — Новосибирск, 2008. — С. 81–90.
3. Лебедев В.Д., Кутумов Ю.Д. Математическое моделирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения для разработки устройств релейной защиты на волновом принципе. // Вестник ИГЭУ. 2020. № 2. — С. 40–50.
4. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей. — М.: Маршрут, 2006. — 992 с.
5. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах. / И.И. Левченко, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев, Е.И. Сацук. Учеб. пособие / Юж.-Пос. гос. техн. ун-т. — Новочеркасск: ЮРГТУ, 2006. — 494 с.
6. Khrennikov A.Yu., Kuvshinov A.A., Shkuropat I.A. Providing Reliable Operation of Electric Networks // Nova science publishers. — New York, 2019. — P. 308. ISBN: 978-1-53615-422-1. URL: <https://novapublishers.com/shop/providing-reliable-operation-of-electric-networks/> (дата обращения 03.04.2023).
7. Шовкопляс С.С. Способ предотвращения гололедообразования на грозозащитных тросах воздушной линии электропередачи сверхвысокого напряжения наведенными токами без вывода ее из работы. // Энергетик. 2018. № 8. — С. 13–20.
8. Кротков Е.А., Безменова Н.В., Щобак А.А. Учет провисания проводов в полете ВЛ 220 кВ при определении тока, наведенного в грозозащитном тросе магнитными полями токов фаз. // Вестник СамГТУ. Серия Технические науки. 2022. Том 30. № 1. — С. 106–117.
9. Кац Р.А., Перельман Л.С. Расчет электрического поля трехфазной линии электропередачи. // Электричество. 1978. № 1. — С. 16–19.
10. Deno D.W. Transmission line fields. — IEEE Trans. — PAS, 1976. Vol. 95. No 5. — P. 1600–1611.
11. Белицын И.В., Котырло Т.В., Макаров А.В. Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования. // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312. № 4. — С. 61–65.
12. Мисриханов М.Ш., Рубцова Н.Б., Токарский А.Ю. Обеспечение электромагнитной безопасности электросетевых объектов. — М.: Наука, 2010. — 868 с.
13. Абдурахманов А.М., Зимин К.А., Рубцова Н.Б., Рябенко В.Н., Токарский А.Ю. Магнитные поля воздушных и кабельных линий электропередачи: нормирование, расчет, проектирование. // Безопасность в техносфере. 2014. № 2. — С. 52–63.
14. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Определение электромагнитных полей, создаваемых воздушными линиями электропередачи. // Вестник ИрГТУ. 2016. № 1. — С. 75–84.
15. Токарский А.Ю. Экранирование электрических и магнитных полей высоковольтных воздушных линий электропередачи. // Медицина труда и промышленная экология. 2004. № 4 — С. 38–40.
16. Мисриханов М.Ш., Токарский А.Ю. Ограничение уровня напряженности электрического поля ВЛ 500 кВ с помощью тросовых экранов. // Энергетик. 2004. № 10 — С. 13–15.
17. Степанов И.М. Исследование электромагнитных полей в электроустановках высокого напряжения и разработка мер по снижению их интенсивности: дис. канд. техн. наук. — Новосибирск, 2009. — 149 с.
18. Демирьян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Т. 3. Теория электромагнитного поля. — СПб.: Питер, 2003. — 377 с.
19. Привалов И.И. Аналитическая геометрия: учебник для вузов. — Москва: Издательство Юрайт, 2016. — 233 с.
20. Carson J.R. Wave propagation in overhead wires with ground return, The Bell System Technical Journal. Vol. 5. No. 4, Oct. 1926. — P. 539–554.
21. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. — М.: Энергия, 1973. — 272 с.
22. Токарский А.Ю., Рубцова Н.Б. Распределение напряжения вдоль отключенной и заземленной линии, наведенного магнитным полем параллельной линии. // Безопасность в техносфере. 2015. № 4 — С. 32–38.
23. Демирьян К.С., Нейман Л.Р., Коровкин Н.В., Чечурин В.Л. Теоретические основы электротехники: в 3-х т. Учебник для вузов. Т. 1. — СПб.: Питер, 2003. — 463 с.
24. СТО 56947007–29.240.55.255–2018. Стальные решетчатые опоры новой унификации ВЛ 220 кВ. Указания по применению опор новой унификации при проектировании ВЛ 220 кВ. — Филиал АО «НТЦ ФСК ЕЭС» — СибНИИЭ, 2018. — 323 с.