

УДК 621.311.16

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ИНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ
ВБЛИЗИ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

И.В. Белицын

Рассмотрены составляющие индуктивных помех. Приведена упрощенная схема замещения линии электропередачи. Предложена методика расчета наведенного напряжения с учетом влияния искажения формы кривой напряжения.

Ключевые слова: методика расчета; линия электропередачи; наведенное напряжение.

**THE INDUCTIVE INTERFERENCE NEAR POWER
LINES ESTIMATING METHOD**

I. V. Belitsyn

The article considers the components of inductive interference. The simple equivalent circuit of a transmission line is given. The method of calculating the induced voltage into account the influence of the distortion of the voltage waveform is given.

Keywords: method of calculation; power transmission line; induced voltage.

Наведенное напряжение – это разность потенциалов между проводящими частями электроустановок (ВЛ или оборудования ПС) и точкой нулевого потенциала, возникающая в результате воздействия электрического и магнитного полей, создаваемых расположенными вблизи электроустановками, находящимися под напряжением.

На основе методов, изложенных в [1], следует уточнить типовую методику расчета наведенного напряжения [2]. Исходными данными для расчетов являются расстояния между осями трасс ВЛ на участках сближения, длина ВЛ, значения сопротивлений контуров заземления опор и подстанций, находящихся по концам линий и на границах участков, а также значения токов, которые могут притекать от влияющих ЛЭП. Для сетей произвольной топологии расчет значений наведенного напряжения на отключенной ЛЭП производится на основе упрощенной схемы замещения (рисунок 1), полученной на основе П-образной схемы замещения. В этом случае воздушная ЛЭП разделена на два участка с различными удельными наведенными ЭДС.

Для расчетной точки наведенного напряжения, определяемой координатой x (по длине ЛЭП), отсчитываемой от ее начала, удельное сопротивление линии “провод-земля” обозначим как Z , а дли-

ну линии как l . Тогда уравнение баланса для контурных ЭДС будут записаны в следующем виде:

$$\text{контур I} : \dot{U}_c(x) = \dot{E}'x - \dot{I} \cdot z \cdot x + \dot{U}_0;$$

$$\text{контур II} : \dot{U}_c(x) = -\dot{E}''(l-x) + \dot{I} \cdot z(l-x) + \dot{U}_1, \quad (1)$$

Преобразование выражения (1) к виду, отражающему зависимость наведенного напряжения $U_i(x)$ от координаты x (по длине ЛЭП), в общем виде выглядит как

$$U_i(x) = \frac{E_i' + E_i''}{l} x^2 - (E_i'' + E_i' - \frac{U_1 - U_0}{l})x + U_0, \quad (2)$$

где U_1 и U_0 – напряжение в начале и конце ЛЭП.

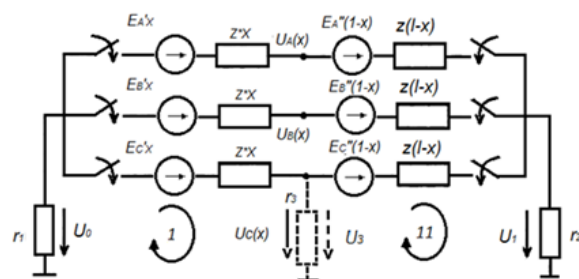


Рисунок 1 – Упрощенная схема замещения ЛЭП

В дальнейшем будем рассматривать случай при заземлении проводов отключаемой ВЛ на сопротивлении r_1 и r_2 , тогда

$$\dot{U}_0 = -\frac{\dot{E}'_3 x + \dot{E}''_3(l-x)}{r_1 + r_2 + z_3 l} r_1; \quad (3)$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{\dot{E}'_3 x + \dot{E}''_3(l-x)}{r_1 + r_2 + z_3 l} r_2, \quad (4)$$

где $\dot{E}'_3 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C)$; $z_3 = \frac{1}{3}Z$.

При приведении выражений (1)–(4) к типовой методике, на основе упрощенной схемы получим универсальную схему замещения (рисунок 2), значение наведенного напряжения определяется по формуле:

$$U_{НАВ} = \frac{E_1 \cdot Y_1 + E_2 \cdot Y_2}{\sqrt{(Y_1 + Y_2)^2 + Y_3^2}}, \quad (5)$$

где E_1 и E_2 – значения эквивалентных ЭДС; Y_3 – проводимость заземления на месте работ; Y_1 и Y_2 – проводимость участков “x” и “L-x” отключенной ВЛ.

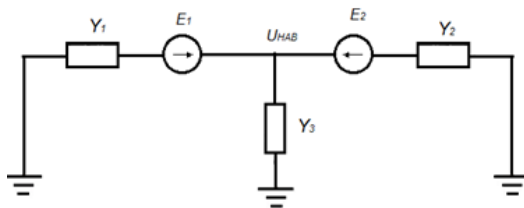


Рисунок 2 – Универсальная схема замещения ЛЭП

Физической основой наведенного напряжения является электростатическое и магнитное влияние. С практической точки зрения целесообразно учитывать только магнитное влияние, поскольку, как показано в [3], электростатическое влияние более чем в 50 раз менее интенсивно, чем магнитное при выполнении требований [2] по установке заземления на отключенной ВЛ. Известно [4], что магнитное влияние в большей степени определяется продольной составляющей вектора напряженности электрического поля от влияющих линий E_x , которая без учета токов смещения определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 E_x}{dy^2} + \frac{d^2 E_x}{dz^2} - k_3^2 E_x = 0, \quad (6)$$

где $k_3 = \sqrt{j\omega\mu_0\sigma_3}$ – волновое число земли; σ_3 – удельная проводимость грунта земли; ω – циклическая частота; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная.

Решение уравнения при принятии допущения о горизонтально расположенном проводнике влияющей и отключенной ВЛ, можно представить в виде [3]:

$$E_x = -j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} I \left[\ln \frac{(h+z)^2 + y^2}{(h-z)^2 + y^2} + 4 \int_0^\infty \frac{e^{-v(h+z)}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \right], \quad (7)$$

где I – значения тока, протекающего по проводнику влияющей ЛЭП; h – высота подвеса влияющего проводника ЛЭП над землей; z, y – координаты отключенного провода ВЛ.

Входящий в (7) интеграл выражают через интеграл Карсона [5]:

$$I_k = j \int_0^\infty \frac{e^{-v(h+z)}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \cos yv dv. \quad (8)$$

Зная E_x однозначно можно определить эквивалентную ЭДС, наводимую в проводнике отключенной ВЛ, при прохождении ее параллельно влияющей ВЛ:

$$E_i = E_x l; \quad (9)$$

где l – длина участка влияющего проводника, так и в случае сходящихся влияющей ВЛ и отключенной ВЛ:

$$E_i = ctg\alpha \int_{y_a}^{y_b} E_x dy; \quad (10)$$

где α – угол между влияющей и отключенной ВЛ; y_a, y_b – минимальное и максимальное расстояния между влияющей и отключенной ВЛ на сходящемся участке.

В [6] показано, что с погрешностью, не превышающей 5 %, интеграл Карсона (8) может быть представлен в виде

$$I_k = \frac{j}{4} \ln \frac{(h+z + \frac{2}{k_3})^2 + y^2}{(h+z)^2 + y^2} \quad (11)$$

После подстановки (7), (11) в (9), получим соотношение для определения ЭДС, создаваемого магнитным влиянием:

$$E_i = -j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(h+z)^2 + y^2}{(h-z)^2 + y^2} + \ln \frac{(h+z + \frac{2}{k_3})^2 + y^2}{(h+z)^2 + y^2} \right] \quad (12)$$

Для практических вычислений заменим z на высоту подвеса отключенной ВЛ $h_{ВЛ}$, и y на проекцию расстояния между проводником влияющей ЛЭП и отключенной ВЛ a_i . Кроме этого, необходимо учесть величину n -ой гармоники тока в проводнике влияющей ЛЭП, и общий коэффициент защитного действия (КЗД) при магнитном влиянии $E_{общ.м}$, определяемый как

$$E_{\text{общ.м}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{Ti}^{\alpha} S_{ni}^{\beta} l_i}{l_c}, \quad (13)$$

где N – число участков параллельного сближения; S_{Ti}^{α} и S_{ni}^{β} – величина КЗД соответственно для заземленных α тросов и β проводов на i -ом участке сближения.

Теоретические и экспериментальные исследования [6, 7] показали, что величина КЗД становится заметной при довольно близком расположении проводов, что имеет место, например, для линий связи. Для высоковольтных же ВЛ расстояние между проводами существенно больше, чем для линий связи, и величину КЗД можно принять равной единице.

В этом случае (12) примет вид

$$E_i = F(a_i) \cdot I_i \cdot l_i, \quad (14)$$

где

$$F(a_i) = \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(h+h_{\square})^2 + 0_i^2}{(h-h_{\square})^2 + 0_i^2} + \ln \frac{(h+h_{\square} + \frac{2}{k_3})^2 + 0_i^2}{(h+h_{\square})^2 + 0_i^2} \right].$$

В соответствии с (12) значения E_i определяют для всех фаз действующей ВЛ для данного участка сближения линий электропередач.

На следующем этапе определяется результирующее значение продольной ЭДС E_{jkimn} от одноименных фаз всех L действующих ВЛ:

$$E_{\text{общ.м}} = \sqrt{\sum_{i=1}^L E_{\text{jkimn}}}. \quad (15)$$

В дальнейшем находится результирующая ЭДС от всех фаз L действующих ВЛ на частоте n -ой гармоники:

$$E_{\text{jkn}} = \sum_{m=1}^3 E_{\text{jkmm}}. \quad (16)$$

В частном случае для симметричной системы векторов имеем:

$$E_{\text{jkn}} = E_{\text{jkAn}} + E_{\text{jkBn}} a^2 + E_{\text{jkCn}} a, \quad (17)$$

где $a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$ – комплексный множитель.

Вычислив отдельные составляющие E_{jkn} от действия всех доминирующих гармоник тока (N) в L действующих ВЛ, можно определить искомую величину ЭМН:

$$E_{\text{jk}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N E_{\text{jknn}}^2}, \quad (18)$$

В случае отсутствия данных гармонического состава тока, можно учитывать высшие гармоники введением в формулу (12) коэффициента формы, определяющего искажение формы кривой ЭДС:

$$E_i = K_{\phi} \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \left[\ln \frac{(h+z)^2 + y^2}{(h-z)^2 + y^2} + \ln \frac{(h+z + \frac{2}{k_3})^2 + y^2}{(h+z)^2 + y^2} \right] I_i l_i, \quad (19)$$

где K_{ϕ} – коэффициент, учитывающий искажение формы кривой ЭДС:

$$K_{\phi} = \sqrt{1 + \sum_{v=1}^{\infty} \frac{E_v^2}{E_1^2}}. \quad (20)$$

Результаты расчетов и реальных измерений наведенного напряжения выявили существенное влияние на его величину отдельных показателей качества электроэнергии. Установлено, что наибольшее влияние на значения наведенного напряжения оказывают несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений трехфазной ВЛ. Так в [5] показано, что если коэффициент несимметрии составляет 3–6 %, то результирующее значение наведенного напряжения в 1,2–1,5 раза превышает его величину для случаев, когда токи высших гармоник симметричны.

Однако в отдельных случаях следует ожидать существенного увеличения наведенного напряжения за счет несимметрии токов и напряжений как основной гармоники, так и гармоник высшего порядка. Данные многочисленных экспериментальных исследований [7] свидетельствуют о том, что в электрических сетях величина коэффициента несимметрии K_{2U} в отдельных случаях может достигать 10 % и более.

Значения эквивалентных ЭДС E_1 и E_2 :

$$E_1 = \sum_{i=1}^n F(a_{1i}) \cdot I_i \cdot l_{1i}, \quad (21)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^m F(a_{2i}) \cdot I_i \cdot l_{2i}, \quad (22)$$

где $F(a)$ – значение расчетной функции; a_{1i} и a_{2i} , m – расстояние между отключенной и i -ой ЛЭП, оказывающей электромагнитное влияние на участке “ x ” или “ $L-x$ ”; l_{1i} и l_{2i} , км – длина участков влияющих ЛЭП, которые наводят напряжение в первом и втором контурах; I_i , кА – значения тока, протекающего по i -ой влияющей ЛЭП; n и m – число линий, оказывающих электромагнитное влияние на отключенную ВЛ на участках “ x ” и “ $L-x$ ”.

Проводимость участков “ x ” и “ $L-x$ ” отключенной ВЛ определяется по выражениям:

$$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{R_{3\text{ЛС-1}}^2 + (g \cdot x)^2}}, Y_2 = \frac{1}{\sqrt{R_{3\text{ЛС-2}}^2 + (g(L-x))^2}}, \quad (23)$$

где $R_{зПС-1}$ и $R_{зПС-2}$, Ом – сопротивления заземляющих устройств ПС-1 и ПС-2.

Проводимость заземления на месте работ определяется по формуле:

$$Y_3 = \frac{1}{R_3}, \quad (24)$$

где R_3 , Ом – сопротивление заземляющего устройства на рабочем месте.

g , Ом/км – коэффициент, учитывающий удельное сопротивление отключенной ВЛ (таблица1).

Таблица 1 – Значения проводимости отключенной линии

Номинальное напряжение отключенной ВЛ, кВ	Значение коэффициента g
10–35	0,563
110	0,535
220	0,493
330	0,434
500	0,402
750	0,377

Сравнение значения наведенного напряжения, рассчитанного по типовой методике, со значением, рассчитанным по предлагаемой методике, показывает, что при учете всех топологических особенностей ЛЭП, значение наведенного напряжения является заниженным на 14,5 %.

Литература

1. *Белицын И.В.* Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования / И.В. Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров // Изв. Томск. политехн. ун-та. 2008. Т. 312. № 4. Энергетика. С. 61–65.
2. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. М.: ОАО ФСК, 2008. 27 с.
3. *Курбацкий В.Г.* Расчет и измерение уровней наведенных напряжений и разработка мероприятий по обеспечению безопасных условий производства работ на ВЛ 35-500кВ / В.Г. Курбацкий, В.Н. Яременко // Отчет по научно-исследовательской работе. Братск: БрИИ, 1990. 96 с.
4. *Цицикян Г.Н.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Н. Цицикян. СПб.: Элмор, 2007. 184 с.
5. *Перельман Л.С.* Таблицы интегралов Карсона для использования в расчетах волновых процессов в линиях с учетом земли / Л.С. Перельман // Известия НИИ постоянного тока. 1965. № 11. С. 342–360.
6. The complex ground return plane. A simplified model for homogeneous and multi-layer earth return / A. Deri [et al.] // IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. 1981.
7. *Курбацкий В.Г.* Влияние тяговых нагрузок на качество электроэнергии в распределительных сетях / В.Г. Курбацкий // Промышленная энергетика. 1991. № 4. С. 44–47.