

УДК 621.311.16

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-101-114

## Методика оценки влияния индуктивных помех на отключенную линию электропередачи\*

И.В. БЕЛИЦЫН<sup>1</sup>, Д.В. ОРЛОВ<sup>2</sup>, В.В. ХРИПКОВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 656038, РФ, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, кафедра электроснабжения промышленных предприятий, кандидат педагогических наук, доцент. E-mail: b\_i\_w@mail.ru

<sup>2</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кафедра систем электроснабжения предприятий, магистрант. E-mail: 4eel@inbox.ru

<sup>3</sup> 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, кафедра систем электроснабжения предприятий, магистрант. E-mail: hripkov91@yandex.ru

В статье рассматриваются вопросы влияния индуктивных помех на отключенную линию электропередачи. Показан вклад электростатической и электромагнитной составляющих в значение наведенного напряжения. Приведена методика расчета электромагнитной составляющей наведенного напряжения, основанная на применении упрощенной схемы замещения линии электропередачи. Приведено выражение для расчета коэффициента взаимной индукции с помощью интеграла Карсона. При определении коэффициента взаимной индукции учитываются топологические особенности линии электропередачи. Для решения практических задач по расчету электромагнитных влияний от действующих высоковольтных линий электропередачи произведен анализ часто применяемых формул для определения коэффициента взаимной индукции. Представлен способ учета несинусоидальности тока при определении наведенного напряжения. Показаны зависимости параметра  $F(a)$  для отключенной линии 10...35 кВ от расстояния между осями ВЛ. Приведен пример расчета наведенного напряжения по предложенной методике и дано сравнение полученных результатов с типовыми значениями.

**Ключевые слова:** индуктивная помеха, наведенное напряжение, методика расчета, линия электропередачи, качество электрической энергии, интеграл Карсона, гармоники тока, несинусоидальность, коэффициент взаимной индукции, электрическая сеть, схема замещения

## ВВЕДЕНИЕ

Линия электропередачи (ЛЭП) создает в непосредственной близости от себя электромагнитное поле, влияющее на другие технические объекты, находящиеся над поверхностью земли. Такое воздействие согласно класси-

---

\* Статья получена 26 января 2018 г.

фикации МЭК является индуктивной помехой. Расчет индуктивных помех необходим для обеспечения надежного функционирования устройств релейной защиты и автоматики, передачи информации по каналам связи, обеспечения безопасности при проведении работ на оборудовании и электрических сетях, находящихся в зоне влияния воздушной линии электропередачи.

На проводах, тросах, металлоконструкциях отключенной (строящейся) воздушной ЛЭП от действующих вблизи нее соседних линий наводится напряжение  $U_n$ , которое складывается с напряжением самой линии. Такое напряжение называется наведенным. Появление наведенного напряжения связано с электростатическим и индукционным воздействием от воздушной линии, которая проходит в непосредственной близости от отключенной ЛЭП.

Нормативными документами, например [1], регламентируется комплекс защитных мероприятий, которые необходимы для обеспечения безопасности при проведении работ на воздушных ЛЭП. Отдельно отмечаются меры безопасности в случаях, когда заземление проводников не позволяет снизить значение наведенного потенциала на отключенной линии ниже 25 вольт.

Электромагнитное поле влияющей линии связано с ее напряжением, током, топологическими особенностями и качеством транспортируемой по ней электрической энергии, длиной участка сближения влияющей и отключенной линии. На каждом проводнике отключенной линии наводится потенциал, который определяется суммой двух составляющих – электростатического и электромагнитного взаимодействия.

Электростатическая составляющая наведенного напряжения связана с взаимодействием электрической составляющей электромагнитного поля. Ее значение зависит в первую очередь от напряжения на влияющей линии и коэффициента емкостной связи. Электростатическая составляющая наведенного напряжения может быть снижена до безопасного значения на всей линии путем ее заземления в любом месте.

Электромагнитная составляющая наведенного напряжения связана с воздействием магнитной составляющей электромагнитного поля влияющей линии на рассматриваемый проводник отключенной. В этом случае решающее значение имеют значение коэффициента индуктивной связи и ток, протекающий по проводникам влияющей линии.

## 1. МОДЕЛЬ РАСЧЕТА НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

На основе методов, изложенных в работах [2, 3], следует уточнить типовую методику расчета наведенного напряжения [4].

Для расчетов исходными данными служат длина ВЛ, расстояния между осями трасс воздушных линий электропередачи (ВЛ) на участках их сближения, сопротивление контура заземления отдельных опор и подстанций, расположенных на концах ВЛ и на границах участков, а также значения величины рабочих токов, протекающих во влияющих линиях электропередачи. Для электрических сетей, обладающих произвольной топологией, определение уровней наведенного напряжения на отключенной ВЛ производится согласно упрощенной схеме замещения (рис. 1), составленной на базе П-образной схемы замещения. При этом линия электропередачи разделяется на два участка, в которых создаются различные удельные наведенные ЭДС.

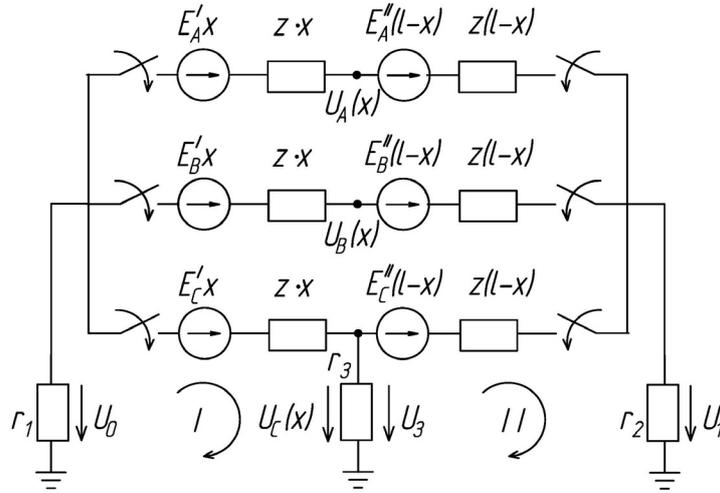


Рис. 1. Упрощенная схема замещения ЛЭП

Расчетную точку для определения наведенного напряжения задаем с помощью координаты  $x$  (по длине ВЛ), начало отсчета совмещено с ее началом, длину линии обозначим  $l$ , а удельное сопротивление системы «провод-земля» –  $Z$ . В этом случае уравнения баланса контурных ЭДС будут представлены в виде

$$\text{контур I: } \dot{U}_c(x) = \dot{E}'_i x - \dot{I} \cdot z x + \dot{U}_0, \tag{1}$$

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

Преобразовав выражение (1) к виду, характеризующему зависимость наведенного напряжения  $U_i(x)$  от координаты расчетной точки  $x$  (по длине ВЛ), получим ее в общем виде

$$U_i(x) = \frac{E'_i + E''_i}{l} x^2 - \left( E''_i + E'_i - \frac{U_1 - U_0}{l} \right) x + U_0, \tag{2}$$

где  $U_0$  и  $U_1$  – напряжение в конце и начале ВЛ

Далее рассмотрим случай, в котором отключенная ВЛ заземлена с обеих сторон, сопротивление заземлителя  $r_1$  и  $r_2$ , тогда

$$U_0 = -\frac{\dot{E}'_{\Sigma} x + \dot{E}''_{\Sigma}(l-x)}{r_1 + r_2 + z_3 l} r_1; \tag{3}$$

$$U_1 = -\frac{\dot{E}'_{\Sigma} x + \dot{E}''_{\Sigma}(l-x)}{r_1 + r_2 + z_3 l} r_2, \tag{4}$$

где  $\dot{E}_{\Sigma} = \frac{1}{3} \left( \dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C \right)$ ;  $z_3 = \frac{1}{3} Z$ .

Приведем выражения (1)–(4) к общей типовой методике, составленной для упрощенной схемы замещения ВЛ, получив универсальную схему замещения ВЛ (рис. 2), для нее наведенное напряжение определяется как

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

где  $E_1$  и  $E_2$  – значения эквивалентных ЭДС двух участков  $x$  и  $L-x$  ВЛ;  $Y_1$  и  $Y_2$  – проводимости тех же участков;  $Y_3$  – проводимость заземляющего устройства в расчетной точке.

Проводимости участков отключенной линии электропередачи определим с учетом сопротивления заземляющих устройств подстанций по выражениям

$$Y_1 = \frac{1}{\sqrt{R_{\text{ЗПС-1}}^2 + (g \cdot x)^2}}, \quad (6)$$

$$Y_2 = \frac{1}{\sqrt{R_{\text{ЗПС-2}}^2 + (g(L-x))^2}},$$

где  $R_{\text{ЗПС-1}}$  и  $R_{\text{ЗПС-2}}$  (Ом) – сопротивление заземляющего устройства на ПС-1 и ПС-2 соответственно.

Проводимость переносного заземления места проведения работы на отключенной ВЛ

$$Y_3 = \frac{1}{R_3}, \quad (7)$$

где  $R_3$  – сопротивление переносного заземления рабочего места;  $g$  – удельное сопротивление проводов отключенной ВЛ.

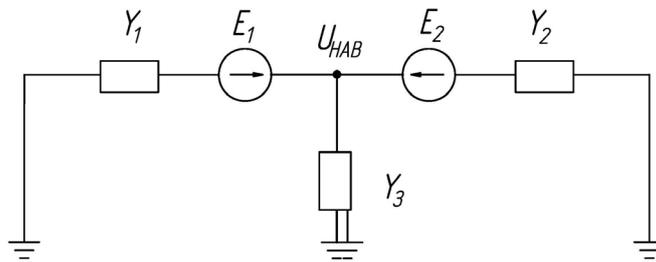


Рис. 2. Универсальная схема замещения ЛЭП

Как было показано выше, наведенное напряжение определяется электростатическим и магнитным влиянием на отключенную линию. Для практических расчетов достаточно учитывать лишь магнитное воздействие, поскольку в работе [5] показано, что электростатическое воздействие менее интенсивно (более чем в 50 раз), чем воздействие магнитного поля при выполнении

требований правил по охране труда при эксплуатации электроустановок [1] переносного заземления на отключенной линии. Как показано в работе [6], магнитное воздействие определяется в большей степени продольной составляющей напряженности электрического поля от влияющих линий  $E_x$ , которую без учета токов смещения можно определить из дифференциального уравнения

$$\frac{d^2 E_x}{dy^2} + \frac{d^2 E_x}{dz^2} - k_3^2 E_x = 0, \quad (8)$$

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

Решение дифференциального уравнения (8) в случае горизонтального расположения проводника влияющей и отключенной линии электропередачи представим в виде [6]

$$E_x = -j \frac{\omega\mu_0}{4\pi} I \left[ \ln \frac{(h+z)^2 + y^2}{(h-z)^2 + y^2} + 4 \int_0^\infty \frac{e^{-v(h+z)}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} dv \right], \quad (9)$$

где  $I$  – ток, протекающий по проводнику влияющей ВЛ;  $h$  – высота подвеса влияющего проводника ВЛ над землей;  $z, y$  – координаты отключенного провода ВЛ.

Интеграл, входящий в выражение (9), выразим через интеграл Карсона [7]:

$$I_k = j \left[ \int_0^\infty \frac{e^{-v(h+z)}}{v + \sqrt{v^2 + k_3^2}} \cos yv dv \right]. \quad (10)$$

После определения  $E_x$  рассчитываем эквивалентную ЭДС, появляющуюся в проводе отключенной ВЛ. Если отключенная ВЛ проходит параллельно влияющей ВЛ, тогда ее можно рассчитать как

$$E_i = E_x l, \quad (11)$$

где  $l$  – длина влияющего проводника на участке сближения.

В случае пересекающихся отключенной и влияющей ВЛ эквивалентная ЭДС зависит от угла между отключенной влияющей ВЛ

$$E_i = \operatorname{ctg} \alpha \int_{y_a}^{y_b} E_x dy, \quad (12)$$

где  $\alpha$  – угол между влияющей и отключенной ВЛ;  $y_a, y_b$  – минимальное и максимальное расстояния между отключенной и влияющей ВЛ на участке сближения.

В работе [8] показано, что интеграл Карсона (10) с погрешностью менее 5 % можно представить в виде

$$I_k = \frac{j}{4} \ln \frac{\left(h + z + \frac{2}{k_3}\right)^2 + y^2}{(h+z)^2 + y^2}. \quad (13)$$

После подстановки (9) и (13) в (11) получим выражение для определения эквивалентной ЭДС, создаваемой магнитным полем:

$$E_i = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \left[ \ln \frac{(h+z)^2 + y^2}{(h-z)^2 + y^2} + \ln \frac{\left(h + z + \frac{2}{k_3}\right)^2 + y^2}{(h+z)^2 + y^2} \right] I_i l_i. \quad (14)$$

Для удобства вычислений произведем замену координаты  $z$  на высоту подвеса проводника отключенной ВЛ  $h_{ВЛ}$  и координату  $y$  на проекцию расстояния между проводником отключенной влияющей ВЛ  $a_i$ .

$$E_i = -j \frac{\omega \mu_0}{4\pi} \left[ \ln \frac{(h+h_{ВЛ})^2 + a_i^2}{(h-h_{ВЛ})^2 + a_i^2} + \ln \frac{\left(h + h_{ВЛ} + \frac{2}{k_3}\right)^2 + a_i^2}{(h+h_{ВЛ})^2 + a_i^2} \right] I_i l_i. \quad (15)$$

Последнее выражение можно представить в общем виде для определения электромагнитной составляющей наведенного напряжения

$$E = -j \omega M I, \quad (16)$$

где  $M$  – коэффициент взаимной индуктивности (КВИ) между рабочим и отключенными проводами.

## 2. МЕТОДИКА УЧЕТА НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА

Рассмотрим варианты расположения отключенной (строящейся) ВЛ (рис. 3), когда токи и напряжения в действующих ВЛ (№ 1, № 3, № 4) несинусоидальны и несимметричны. Каждая действующая ВЛ наводит в проводах строящейся ВЛ № 2 продольные ЭДС. Поскольку токи действующих ВЛ не синусоидальны, то определить величину  $E_M$  в  $k$ -м проводе  $j$ -й отключенной (строящейся) ВЛ одновременно от всех действующих ВЛ невозможно. Необходимо прежде всего найти величину электромагнитной составляющей наведенного напряжения в  $k$ -м проводе ( $k = 1, 2, 3$ ) ВЛ № 2, подверженном влиянию отдельной  $n$ -й гармонической составляющей тока каждой фазы  $m$  ( $m = A, B, C$ )  $i$ -й действующей ВЛ ( $E_{jkimn}$ ):

$$E_{jkimn} = \omega n M_{jkimn} I_{ikn} I_c S_{\text{общ.м}}, \quad (17)$$

где  $M_{jkimn}$  – КВИ между  $m$ -м проводом  $i$ -й действующей ВЛ и  $k$ -м проводом  $j$ -й ВЛ, подверженной влиянию, на частоте  $n$ -й гармоники;  $I_{ikn}$  – величина  $n$ -й гармоники токов в фазе  $t$   $i$ -й действующей ВЛ;  $S_{\text{общ,м}}$  – общий коэффициент защитного действия (КЗД) при магнитном влиянии.

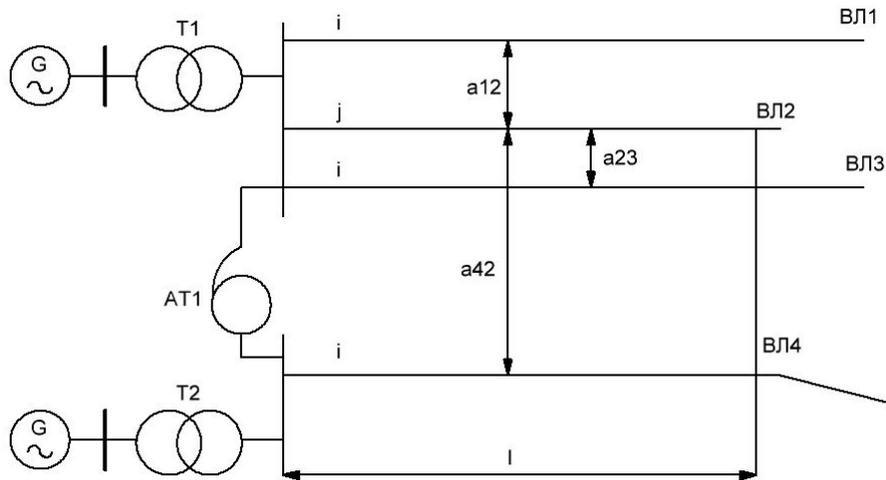


Рис. 3. Схема взаимного расположения действующих ( $i$ ) и отключенной ( $j$ ) ВЛ

Величина КВИ, вводящая в выражение (16), учитывает геометрию влияющего и подверженного влиянию проводов, физические параметры среды и частоту тока, влияющего на ВЛ. Для решения практических задач по расчету электромагнитных влияний от действующих высоковольтных ВЛ кроме выражения (15), по которому можно определить КВИ, существуют другие расчетные выражения, приведенные в таблице.

**Формулы для определения коэффициента взаимной индукции**

	Формула
1	$\left[ \left( 1 + 2 \ln \frac{10^4}{1,78 a_3 \sqrt{10 \pi \omega \gamma_3}} \right)^2 - j \frac{\pi}{2} \right] 10^{-4}$
2	$2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{\sqrt{a_3^2 + \left( b + c + 800 \sqrt{\frac{p}{f}} \right)^2}}{\sqrt{a_3^2 - (b - c)^2}}$
3	$10^{-4} \ln \frac{I \cdot 2 \cdot 10^4 \rho_3}{a_3^2}$
4	$2 \cdot 10^{-4} \ln \frac{I \cdot 13 \cdot \sqrt{\rho}}{d_{12}}$

Анализ выражений, представленных в таблице, выявил следующее.

При изменении геометрии влияющего и подверженного влиянию проводов зависимости формул позиций 1 и 2 дают практически идентичные результаты.

Позиции 3 и 4 не отражают зависимости величины КВИ от высоты подвеса провода, подверженного влиянию, и предназначены для расчетов в электрических сетях без наличия в них искажений и высших гармоник, т. е. не учитывают воздействие на КВИ частоты высших гармоник питающего тока.

Значение  $S_{\text{общ.м}}$  можно определить из следующего выражения:

$$E_{\text{общ.м}} = \frac{\sum_{i=1}^N S_{Ti}^{\alpha} S_{ni}^{\beta} l_i}{l_c}, \quad (18)$$

где  $N$  – количество участков сближения влияющей и отключенной ВЛ;  $S_{Ti}^{\alpha}$  и  $S_{ni}^{\beta}$  – величина коэффициента защитного действия для заземленных  $\alpha$  тросов и  $\beta$  проводов на  $i$ -м участке сближения.

Ранее проведенные исследования [9, 10] показали, что значение величины КЗД становится существенным при близком расположении проводов. Это актуально, например, для различных линий связи. В случае высоковольтной линий электропередачи расстояние между проводниками существенно превышает аналогичные расстояния в линиях связи, поэтому значение величины КЗД в дальнейших расчетах принято за единицу.

По выражению (17) определяют значения  $E_{jkimn}$  для всех фаз действующей линии на данном участке сближения ВЛ. Далее определяем результирующее значение продольной ЭДС  $E_{jkimn}$  от всех одноименных фаз  $L$  действующих линий:

$$E_{\text{общ.м}} = \sqrt{\sum_{i=1}^L E_{jkimn}^2}. \quad (19)$$

Далее определяем общую ЭДС от всех фаз  $L$  действующих линий для частоты  $n$ -й гармоники:

$$E_{jkn} = \sum_{m=1}^3 E_{jkmn}. \quad (20)$$

В случае симметричной системы

$$E_{jkn} = E_{jkAn} + E_{jkBn}a^2 + E_{jkCn}a, \quad (21)$$

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

Вычислив отдельные составляющие  $E_{jkn}$  от воздействия всех основных гармоник тока ( $N$ ) в действующих линиях, можно определить величину наведенного напряжения

$$E_{jk} = \sqrt{\sum_{n=1}^N E_{jkn}^2}. \quad (22)$$

Предложенная методика справедлива при электрически коротких линиях (понимаются линии такой длины, когда нет необходимости учитывать волновые процессы). Для основной гармоники эта длина не должна превышать 150...200 км. Для гармоники более высокого порядка эта длина еще меньше. В противном случае для длинных линий при параллельном сближении, составляющих несколько десятков и более километров, необходимо учитывать волновые процессы в ВЛ [10]. Для этого выражение (16) следует умножить на коэффициент  $K$ , равный

$$K = \frac{chY_n(1-x)}{chY_n l}, \quad (23)$$

где  $x$  – расстояние от начала параллельного сближения до расчетной точки;  $Y_n = \sqrt{z_{on}y_{on}}$  – коэффициент распределения электромагнитной волны на частоте  $n$ -й высшей гармоники.

Значения  $z_{on}$  и  $y_{on}$  определяются из следующей системы:

$$\begin{cases} z_{on} = r_{on} + j\omega n L_0, \\ y_{on} = g_0 + j\omega n C_0. \end{cases} \quad (24)$$

где  $g_0$ ,  $r_{on}$ ,  $C_0$ ,  $L_0$  – соответственно проводимость и активное сопротивление, емкость и индуктивность на единицу длины ВЛ («погонные» параметры линии) на частоте  $n$ -й гармоники.

Анализ результатов реальных измерений наведенного напряжения из литературных источников выявил, что на его значение существенно влияют показатели качества электрической энергии. Установлено, что наибольшее воздействие на величину наведенного напряжения оказывают несимметрия токов и напряжений и несинусоидальность трехфазной ВЛ. Так, в работе [6] продемонстрировано, что при коэффициенте несимметрии, равном 3...6 %, величина наведенного напряжения на 20...50 % превышает величину наведенного напряжения для случаев симметричных высших гармоник.

В отдельных случаях возможно существенное увеличение наведенного напряжения за счет несимметрии напряжений и токов как основной гармоники, так и гармоник более высокого порядка. Экспериментальные исследования [9] говорят о том, что в магистральных электрических сетях значение коэффициента несимметрии  $K_{2U}$  может достигать 10 % и более.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для практических расчетов наведенного напряжения согласно уравнению (5) определение эквивалентных ЭДС по выражениям (14)–(26) вызывает затруднение из-за большого объема вычислений.

Для облегчения расчетов эквивалентных ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  можно предложить выражения

$$E_1 = \sum_{i=1}^n F(a_{1i}) \cdot I_i \cdot l_{1i}; \quad (25)$$

$$E_2 = \sum_{i=1}^m F(a_{2i}) \cdot I_i \cdot l_{2i}, \quad (26)$$

где  $F(a)$  – значение расчетной функции;  $a_{1i}$  и  $a_{2i}$  – расстояния между отключенной и  $i$ -й влияющей ВЛ на участках  $x$  и  $L-x$ , м;  $l_{1i}$  и  $l_{2i}$  – длины участков влияющих ВЛ, наводящих напряжение, в первом и втором контурах, км;  $I_i$  – величина тока, протекающего по  $i$ -й влияющей ВЛ, кА;  $n$  и  $m$  – число линий, оказывающих магнитное влияние на отключенную ВЛ соответственно на участках  $x$  и  $L-x$ .

На рис. 4 и 5 приведены графики для определения  $F(a)$  в зависимости от расстояния между осями ВЛ различного напряжения.

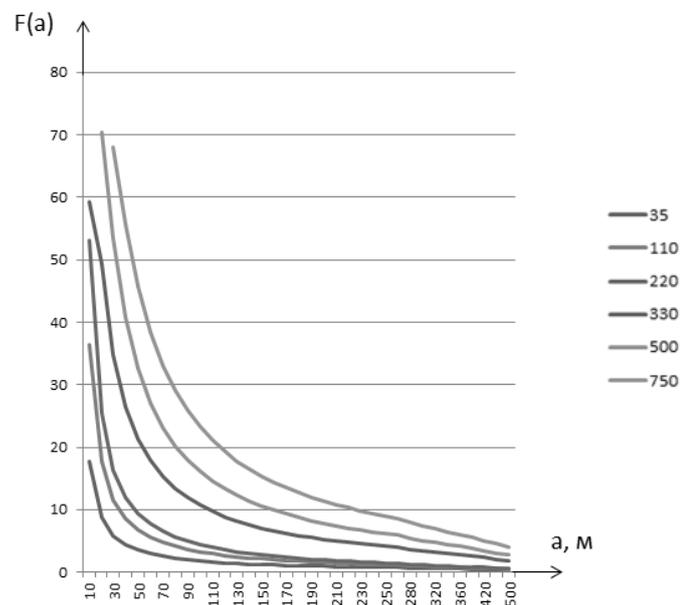


Рис. 4. Значение расчетной функции  $F(a)$  для отключенной линии напряжением 10...35 кВ при влиянии линий различных классов напряжений

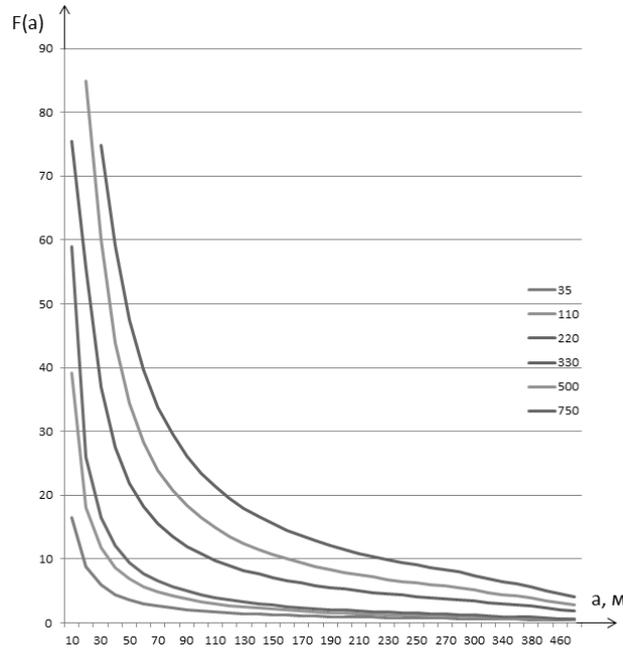


Рис. 5. Значение расчетной функции  $F(a)$  для отключенной линии напряжением 110 кВ при влиянии линий различных классов напряжений

Для сравнения значения наведенного напряжения, рассчитанного по типовой [4] и уточненной методике, был произведен его расчет для конкретной линии 10 кВ. Влияющие линии ВЛ 110 кВ 30-137 П/С «Заречная» – ОП «Быстрянский», ВЛ 110 кВ СБ – 138 П/С «Сростки» – П/С «Быстрянская» (рис. 6).

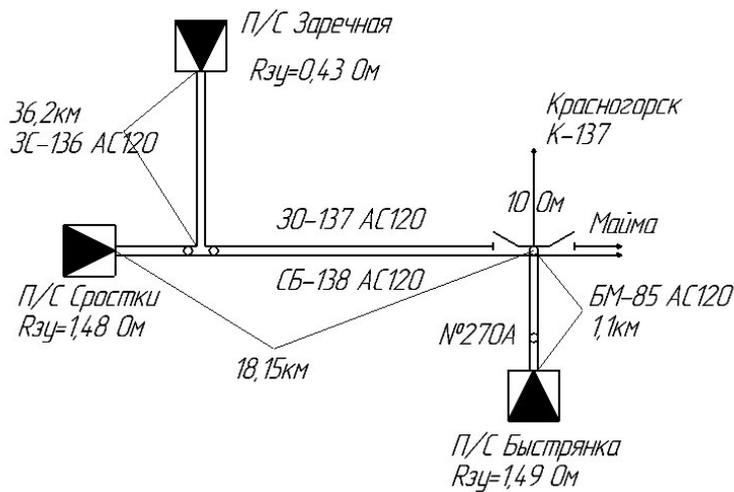


Рис. 6. Схема участка электрических сетей ВЛ П/С «Заречная» – ОП «Быстрянский», ВЛ П/С «Сростки» – П/С «Быстрянская»

Наведенное напряжение, рассчитанное по типовой методике, составило 23,2 В, а по уточненной методике – 26,6 В. Исходя из результатов расчетов можно сделать вывод, что неучет всех топологических особенностей ЛЭП занижает значение наведенного напряжения. Для конкретного расчетного примера это занижение составило 14,5 %.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В предлагаемой методике расчета влияния индуктивных помех на отключенную линию электропередачи, а именно электромагнитной составляющей наведенного напряжения, учтено влияние не только топологических особенностей линий электропередачи, но и показателей качества электрической энергии. Данный подход может быть применен для исследования электростатической составляющей наведенного напряжения в том случае, если сопротивление заземляющих устройств имеет большие значения. Результаты проводимых исследований показали, что без учета качества транспортируемой электрической энергии и конструктивного исполнения ВЛ значения рассчитанных наведенных напряжений на отключенных (строющихся) линиях являются заниженными.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок: утв. Приказом Минтруда России от 24.07.2013 г. № 328н. – М.: Норматика, 2017. – 96 с.
2. *Белицын И.В., Макаров А.В.* Влияние стрелы провеса провода воздушной линии электропередач на параметры ЭМП // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312, № 4: Энергетика. – С. 56–60.
3. *Belitsyn I.V., Khomutov S.O.* Method of quality improving of electric energy by changing the topology of wires connection on overhead power transmission lines // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – Vol. 12, N 3. – P. 376–381.
4. Методические указания по определению наведенного напряжения на отключенных воздушных линиях, находящихся вблизи действующих ВЛ. – М.: ОАО ФСК, 2008. – 27 с.
5. *Курбацкий В.Г.* Качество электроэнергии и электромагнитная совместимость в электрических сетях. – Братск: БрГТУ, 1999. – 220 с.
6. *Вагин Г.Я.* Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – М.: Академия, 2011. – 223 с.
7. *Глушко В.И.* К решению классической задачи магнитного влияния воздушных линий электропередачи на протяженные проводящие коммуникации // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2013. – № 2. – С. 5–10.
8. The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multilayer earth return / A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. – 1981. – Vol. 100 (8). – P. 3686–3693.
9. *Курбацкий В.Г.* Влияние тяговых нагрузок на качество электроэнергии в распределительных сетях // Промышленная энергетика. – 1991. – № 4. – С. 44–47.
10. *Арриллага Дж.* Гармоники в электрических системах. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

*Белицын Игорь Владимирович*, кандидат педагогических наук, доцент кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. Основное направление научных исследований – электромагнитная совместимость, электромагнитная обстановка на электроэнергетических объектах. Имеет более 100 публикаций, в том числе одну монографию. E-mail: b\_i\_w@mail.ru

*Орлов Дмитрий Викторович*, магистрант кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – диагностика электрооборудования, нечеткая логика, анализ иерархий. E-mail: 4eel@inbox.ru

*Хрипов Виктор Владимирович*, магистрант кафедры «Системы электроснабжения предприятий» Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование влияния высших гармонических составляющих переменного тока на потери активной мощности в электрических сетях. E-mail: hripkov91@yandex.ru

DOI: 10.17212/1814-1196-2018-2-101-114

### ***Method for assessing the effect of inductive interference on a disconnected power line\****

*I.V. BELITSYN<sup>1</sup>, D.V. ORLOV<sup>2</sup>, V.V. KHRIPKOV<sup>3</sup>*

<sup>1</sup> *Altai State Technical University, 46 Lenin Prospekt Barnaul, 656038, Russian Federation, PhD (Eng.), associate professor. E-mail: b\_i\_w@mail.ru*

<sup>2</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student. E-mail: 4eel@inbox.ru*

<sup>3</sup> *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marks Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, master student. E-mail: hripkov91@yandex.ru*

The article deals with the effects of induction interference on the disconnected power line. The contribution of the electrostatic and electromagnetic components to the induced voltage value is shown. An electromagnetic component of the induced voltage calculation procedure is described. It's based on the power line simplified equivalent circuit. A mutual inductance factor calculation expression using the Carson integral is proposed. The power line topological features are taken into account in determining the mutual inductance factor. To solve practical problems of calculating electromagnetic effects of a high-voltage power line an analysis of frequently used formulas for determining a mutual inductance factor is made. A method of accounting a non-sinusoidal current when determining an induced voltage is presented. The dependencies of the  $F(a)$  parameter for the 10-35 kV and 110 kV disconnected power line on the distance between the power line axes are given. An example of induced voltage calculation by the proposed method electromagnetic influences from high-voltage power line and a comparison of the results obtained with typical values is made.

**Keywords:** induction interference, induced voltage, calculation method, power line, electric energy quality, Carson integral, current harmonics, unbalance, mutual inductance factor, power grid, equivalent circuit

### **REFERENCES**

1. *Pravila po okhrane truda pri ekspluatatsii elektroustanovok* [Rules on labor protection during operation of electrical installations]. Moscow, Normatika Publ., 2017. 96 p.

---

\* Received 26 January 2018.

2. Belitsyn I.V., Makarov A.V. Vliyanie strely provesa provoda vozduzhnoi linii elektroperedach na parametry EMP [The influence of the arrows of sag of the wire overhead power lines in EMF settings]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2008, vol. 321, no. 4, pp. 56–60.

3. Belitsyn I.V., Khomutov S.O. Method of quality improving of electric energy by changing the topology of wires connection on overhead power transmission lines. *International Journal of Applied Engineering Research*, 2017, vol. 12, no. 3, pp. 376–381.

4. *Metodicheskie ukazaniya po opredeleniyu navedennogo napryazheniya na otklyuchennykh vozduzhnykh liniyakh, nakhodyashchikhsya vblizi deistvuyushchikh VL* [Methodical instructions by definition of the induced voltage on disconnected overhead lines near existing lines]. Moscow, FSK ES Publ., 2008. 27 p.

5. Kurbatskii V.G. *Kachestvo elektroenergii i elektromagnitnaya sovmestimost' v elektricheskikh setyakh* [Power quality and electromagnetic compatibility in electrical networks]. Bratsk, BrGTU Publ., 1999. 220 p.

6. Vagin G.Ya. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in power industry]. Moscow, Akademia Publ., 2011. 223 p.

7. Glushko V.I. K resheniyu klassicheskoi zadachi magnitnogo vliyaniya vozduzhnykh linii elektroperedachi na protyazhennye provodyashchie kommunikatsii [To the solution of the classical problem of the magnetic influence of overhead lines on the long conductive communication]. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob"edinenii SNG – Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2013, no. 2, pp. 5–10.

8. Deri A., Tevan G., Semlyen A., Castanheira A. The complex ground return plane a simplified model for homogeneous and multilayer earth return. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, vol. 100 (8), pp. 3686–3693.

9. Kurbatskii V.G. Vliyanie tyagovykh nagruzok na kachestvo elektroenergii v raspredelitel'nykh setyakh [The influence of traction loads on power quality in distribution networks]. *Promyshlennaya energetika – Industrial power engineering*, 1991, no. 4, pp. 44–47.

10. Arrillaga Dzh. *Garmoniki v elektricheskikh sistemakh* [Harmonics in electrical systems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 320 p.

Для цитирования:

Белицын И.В., Орлов Д.В., Хрипков В.В. Методика оценки влияния индуктивных помех на отключенную линию электропередачи // Научный вестник НГТУ. – 2018. – № 2 (71). – С. 101–114. – doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-101-114.

For citation:

Belitsyn I.V., Orlov D.V., Khripkov V.V. Metodika otsenki vliyaniya induktivnykh pomekh na otklyuchennuyu liniyu elektroperedachi [Method for assessing the effect of inductive interference on a disconnected power line]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 2 (71), pp. 101–114. doi: 10.17212/1814-1196-2018-2-101-114.