

## РАСЧЕТ НАВЕДЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА АНТЕННЫЙ БЛОК ПРИБОРА ЗАЩИТЫ КРАНА ОТ ПРИБЛИЖЕНИЯ К ЛЭП

Валентин Алексеевич ПОТАПОВ, канд. техн. наук,  
генеральный директор,

Виталий Андреевич РОЩИН, инженер  
ЗАО Инженерно-технический центр «КРОС»,  
г. Ивантеевка, Московская обл.

Сергей Дмитриевич ИВАНОВ, канд. техн. наук, доцент  
Московский государственный технический университет  
им. Н.Э. Баумана

Описана приближенная расчетная модель определения напряжения, наведенного от ЛЭП на антенный блок (АБ) прибора защиты самоходных стреловых кранов от опасного сближения с проводами ЛЭП. Введены и обоснованы допущения в этой модели для практического технического применения при разработке и проектировании антенн приборов безопасности. По результатам выполненных натуральных полевых экспериментов с АБ различных форм при различных погодных условиях и различных условиях городской застройки проведено сравнение расчетной зависимости наведенного напряжения на АБ от расстояния до ближайшего провода ЛЭП и такой же зависимости, полученной экспериментальным путем. Результаты экспериментов подтвердили применимость полученной расчетной модели для определения наведенного напряжения на АБ приборов безопасности.

**Ключевые слова:** прибор безопасности, антенный блок, приближение к проводам ЛЭП, защита крана, расчет наведенного напряжения.

При производстве строительно-монтажных, погрузочно-разгрузочных и других работ стреловыми самоходными кранами, подъемниками (вышками) вблизи линии электропередачи (ЛЭП) несчастные случаи происходят вследствие поражения людей электрическим током даже тогда, когда выдвижные и грузовые части подъемного сооружения не касаются проводов ЛЭП, а находятся на недопустимо близком расстоянии от нее (0,5-1,2 м) или когда работающий человек находится на определенном расстоянии от ЛЭП и попадает под шаговое напряжение. Это ставит работы вблизи ЛЭП в ряд самых опасных работ, выполняемых с помощью подъемных сооружений, и требует наличия в них приборов защиты от опасного приближения к ЛЭП.

Применяемые в настоящее время приборы осуществляют контроль напряженности электрического поля вблизи

проводника переменного тока, которым является провод ЛЭП. Чувствительным элементом прибора служит антенна в виде замкнутого металлического контура, размещаемая на оголовке стрелы грузоподъемного крана. Форма и размер антенн, входящих в состав антенных блоков (АБ), значительно различаются, при этом оказывая влияние на уровень наводимой в антенне ЭДС (чувствительность АБ). Поэтому каждый прибор подлежит калибровке на стенде-имитаторе ЛЭП для установления порогов срабатывания, обеспечивающих остановку крана на безопасном расстоянии от проводов ЛЭП различного напряжения [1]. Но такая калибровка не учитывает ряд особенностей работы в городской застройке, на ограниченном пространстве возле опор ЛЭП и метеоусловий – дождя, снега, мороза, что подтверждается опытом эксплуатации самоходных стреловых кранов.

Для повышения эффективности работы антенн приборов защиты необходима разработка теоретической модели расчета наведенного напряжения на АБ прибора, учитывающей особенности практического применения кранов.

В общем случае решение о прекращении движения крана, приводящего к попаданию выдвижных частей крана (стрелы) и грузовых частей в опасную зону ЛЭП, (остановке крана) принимается по достижении наведенной в АБ ЭДС определенного порогового значения. Это значение соответствует напряженности электрического поля на границе эквипотенциальной зоны (рис. 1), в которой запрещено нахождение выдвижных и грузовых частей стрелового крана.

В рамках теоретической модели предполагается первоначальное определение матрицы распределенных зарядов

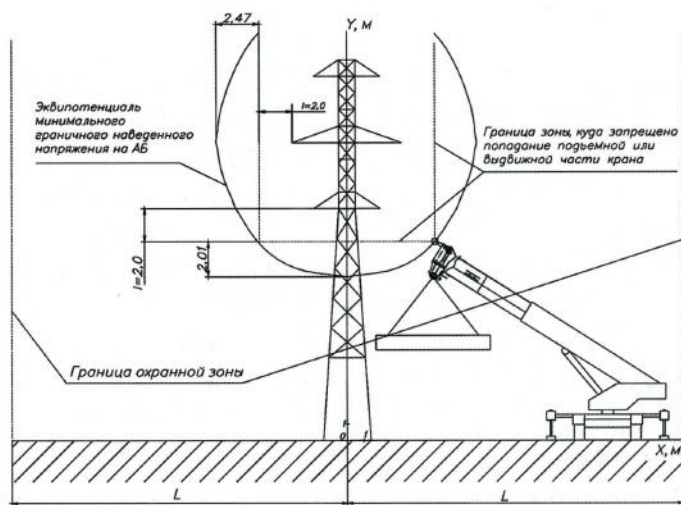


Рис. 1. Схема расположения охранной зоны и зоны, в которой запрещено нахождение выдвижных и подъемных частей крана

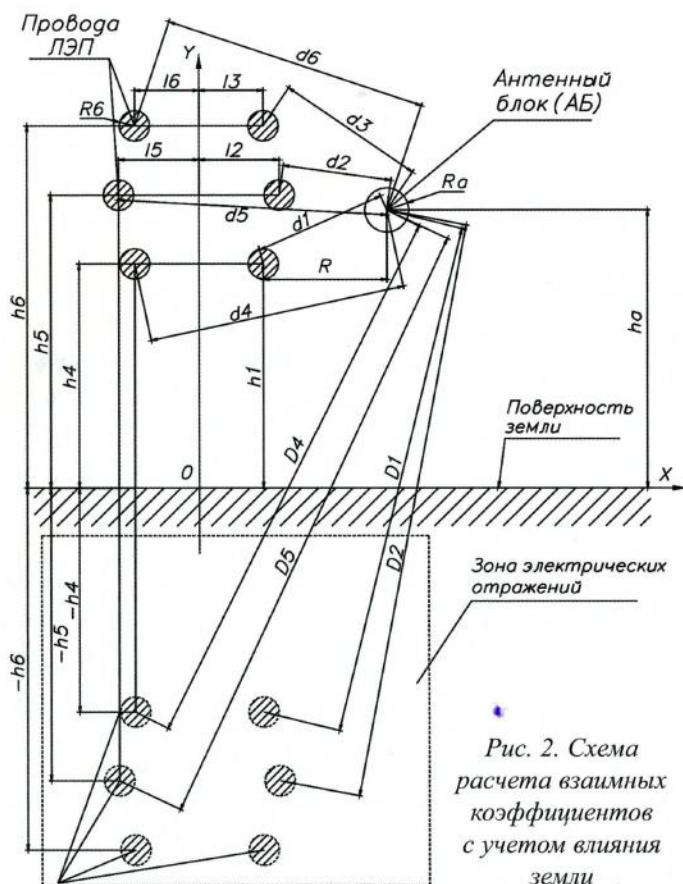


Рис. 2. Схема расчета взаимных коэффициентов с учетом влияния земли

на проводах ЛЭП  $[q_i]$  через решение уравнений Максвелла в матричной форме с использованием матриц собственных потенциальных коэффициентов  $[a_{ij}]$  и фазных напряжений  $[\dot{U}_{\phi i}]$  линий ЛЭП. Применение данной системы уравнений допустимо в связи с тем, что электромагнитное поле промышленной частоты (50 Гц) можно считать квазистатическим. Определение собственных и взаимных потенциальных коэффициентов производится с учетом влияния земли (использование метода отражений) [2].

В качестве основного теоретического метода расчета электрической составляющей  $U_{\text{нав.теор.}}$  электромагнитного поля ЛЭП напряжением  $U_{\text{ном.}}$  является построение матрицы потенциальных собственных взаимных коэффициентов для определения зарядов  $Q_i$  на  $x$  проводах, а затем переход к определению разности потенциалов  $\Delta\phi$  между совокупностью проводов ЛЭП и АБ, которое и соответствует  $U_{\text{нав.теор.}}$

Для расчета зарядов на фазных проводах влияющей линии рассматривают матрицу потенциальных коэффициентов в зависимости от фазного напряжения  $[\dot{U}_{\phi i}]$  [2]. Амплитудное фазное напряжение выражается как:

$$U_{\phi} = \sqrt{2/3} U_{\text{ном}} \quad (1)$$

Напряжения системы в комплексном виде на фазах А, В и С для шести проводов составляют:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{\phi A1} &= U_{\phi 1} & \dot{U}_{\phi B1} &= \dot{U}_{\phi A1} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} & \dot{U}_{\phi C1} &= \dot{U}_{\phi A1} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \\ \dot{U}_{\phi A2} &= U_{\phi 2} & \dot{U}_{\phi B2} &= \dot{U}_{\phi A2} \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} & \dot{U}_{\phi C2} &= \dot{U}_{\phi A2} \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} \end{aligned} \quad (2)$$

или в матричном виде

$$\dot{U}_{\phi} = [\dot{U}_{\phi A1} \ \dot{U}_{\phi B1} \ \dot{U}_{\phi C1} \ \dot{U}_{\phi A2} \ \dot{U}_{\phi B2} \ \dot{U}_{\phi C2}] \quad (3)$$

Из уравнений Максвелла, записанных в матричной форме, имеем  $[\dot{U}_{\phi}] = [a]$  и  $[q] = [c] \cdot [\dot{U}_{\phi}]$ , где  $[a]$  и  $[c]$  – соответственно матрицы взаимных потенциальных коэффициентов и взаимных емкостей шести проводов,  $[\dot{U}_{\phi}]$  – матрица фазных напряжений на шести проводах, определяемая по формулам (2 и 3). Матрицы  $[a]$  и  $[c]$  имеют вид  $[6 \times 6]$  для шести проводов двухцепной линии ЛЭП [2].

Совокупность проводов и сферического антенного блока с радиусом  $r_a$  с учетом влияния земли можно представить в виде схемы, приведенной на рис. 2.

Собственный потенциальный коэффициент проводов в общем виде определяется по формуле:

$$a_{ii} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 S_i} \int_{S_i} \left( \frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) dS_i, \quad (4)$$

где  $S_i$  – площадь поверхности  $i$ -го провода,  $r_+$  – расстояние между элементарными площадками провода и его центром,  $r_-$  – расстояние между элементарной площадкой провода зеркального относительно земли отображения центра  $i$ -провода.

При допущении, что радиус провода гораздо меньше длины пролета ЛЭП и высоты подвеса проводов ( $r_i \ll r_i \ll h_i$ ) собственные потенциальные коэффициенты проводов  $a_{ii}$  при интегрировании по формуле (4) принимают вид,

$$a_{ii} = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i},$$

где  $h_i = h_{iГ} - l_2 - f_{np}$  – средняя высота провода над землей,  $r_i$  – радиус  $i$ -го провода линии ЛЭП,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м электрическая постоянная;  $i$  – номер провода ЛЭП;  $h_{iГ}$  – расстояние от земли до точки крепления гирлянды изоляторов к траверсе;  $l_2$  – длина гирлянды изоляторов;  $f_{np}$  – стреловес провода.

В общем случае провода  $i$  в сечении, перпендикулярном направлению ЛЭП, и провода  $j$  можно рассматривать совокупность точек, и тогда согласно методу средних потенциалов [3] взаимный потенциальный коэффициент между проводами  $i$  и  $j$  имеет вид:

$$a_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon S_i S_j} \iint \left( \frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) dS_i dS_j,$$

где  $S_i$  и  $S_j$  – поверхности  $i$ -го провода и  $j$ -го провода,  $r_+$  – расстояние между элементарными площадками обеих проводов, а  $r_-$  – расстояние между элементарной площадкой провода и зеркального относительно земли отображения площадки  $i$ -го провода.

При допущении, что  $r_i \ll 1$  и  $r_i \ll h_i$  при интегрировании выражения (6) взаимные потенциальные коэффициенты принимают вид:

$$a_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon l_i l_j} \iint \left( \frac{1}{r_0} \right) dl_i dl_j \approx \frac{1}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}},$$

где  $D_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м проводом и зеркальным

бражением  $j$ -го провода, а  $d_{ij}$  – расстояние между проводами.

Расчет взаимных потенциальных коэффициентов связи проводов согласно формуле (6'):

$$a_{12} = a_{21} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{12}}{d_{12}}; a_{23} = a_{32} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{23}}{d_{23}}; \dots$$

$$a_{56} = a_{65} \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{56}}{d_{56}};$$

Таким образом, матрицы  $[a]$  и, соответственно,  $[c] = [a]^{-1}$ , а потом и  $[q] = [c] \cdot [\dot{U}_{\phi i}]$  полностью определены.

На втором этапе построения теоретической модели определяется наведенное напряжение  $\varphi$  на АБ путем векторного сложения произведений взаимных емкостей между проводами и АБ  $[c]$  и распределенных зарядов на проводах  $[q]$ .

Наведенное напряжение АБ определяется по формуле:

$$\Delta\varphi = u_A = \sum_{i=1}^6 a_{iA} q_i, \quad (7)$$

где  $u_A$  – напряжение на АБ,  $a_{iA}$  – взаимные потенциальные коэффициенты  $i$ -го провода линии ЛЭП и АБ,  $q_i$  – заряд  $i$ -го провода линии ЛЭП.

Так как расчет интеграла (6) для АБ произвольной формы в аналитическом виде невозможен, то в качестве допустимого для инженерного проектирования расчета взаимных потенциальных коэффициентов проводов и АБ применяем преобразованную формулу, аналогичную формуле (6) для двух проводящих шаров [4], рассматривая в рамках теоретической модели сферическую форму АБ:

$$a_{iA} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{C_{iA}}{c_{iA}}, \quad (8)$$

где коэффициенты имеют вид

$$C_{iA} = \frac{(D_{iA}^2 - r_A^2)}{(r_A \cdot D_{iA})} \quad c_{iA} = \frac{(d_{iA}^2 - r_A^2)}{(r_A \cdot d_{iA})},$$

$D_{iA}$  – расстояние между центром АБ и зеркальным относительно земли отражением  $i$ -го провода,  $d_{iA}$  – расстояние между центром АБ и центром  $i$ -го провода,  $r_A$  – радиус сферического АБ.

Рассчитав коэффициенты по формуле (8) и подставив в (7) определяем наведенное электростатическое напряжение  $u_A$  на АБ. В результате получена теоретическая расчетная зависимость наведенного напряжения на АБ  $U_{\text{нав.теор.}}$  от расстояния для линии ЛЭП П35-2+5 с напряжением  $U = 35$  кВ, высотой подвеса нижнего провода 14 м и величиной провеса основного провода, равной 1 м.

В расчетной модели форма АБ принимается сферической, а другие формы АБ приводятся к сферам [4]

$$R_s = \frac{1}{2} 0,42 \cdot \left\{ \frac{b_1 + b_2 + b_3}{3} + \sqrt{\frac{b_1 b_2 + b_2 b_3 + b_1 b_3}{3}} + \sqrt[3]{b_1 b_2 b_3} \right\}. \quad (9)$$

где  $b_1, b_2, b_3$  – линейные размеры АБ прямоугольной или иной формы.

В качестве подтверждения работоспособности и примени-

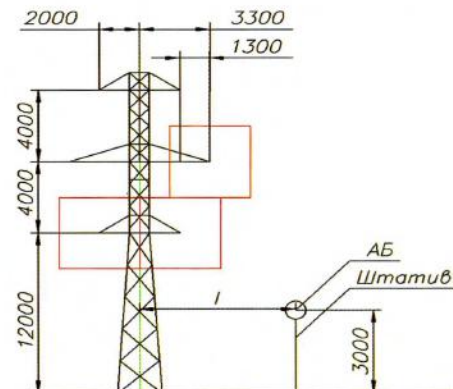


Рис. 3. Схема экспериментов по замеру наведенного напряжения на антенном блоке

$U = 35$  кВ, тип опоры ПС35-2



Рис. 4. Антенные блоки типов 1 (слева) и 2 (справа)

мости данной модели расчета наведенного на АБ напряжения проведены натурные замеры на двухцепной ЛЭП ПС 35-2 напряжением 35 кВ. Их целью было измерение наведенного на АБ напряжения  $U_{\text{нав.э}}$  в различных условиях для оценки достоверности теоретического расчета  $U_{\text{нав.теор.}}$  и соответствия изменения  $U_{\text{нав.экс.}}$  характеру теоретической кривой. Схема натурных экспериментов представлена на рис. 3.

Измерения выполнялись для двух типов АБ (рис. 4) при разных их положениях относительно линии ЛЭП: обращенными к ее проводам торцевой и боковой сторонами. Тип 1 представлен АБ прибора «Барьер-2000К» сферической формы  $R_A = 25$  мм, тип 2 – АБ в форме параллелепипеда с металлической антенной подобной формы с  $R_{\text{ант}} = 32$  мм. Оба антенных блока выпускаются ИТЦ «КРОС».

Натурные эксперименты проводились при различных погодных условиях (влажности, температуре, облачности, времени суток). Результаты серии экспериментов в виде зависимости наводимого на антенну напряжения от расстояния до ближайшего провода ЛЭП напряжением 35 кВ представлены на рис. 5.

При обработке результатов натурных экспериментов было проведено сравнение указанной выше теоретической зависимости наведенного напряжения от расстояния до ближайшего провода и восстановленной по экспериментальным данным функции от этого параметра. Обе зависимости показаны на рис. 6 и носят экспоненциальный характер.

Результаты натурных экспериментов позволяют сделать

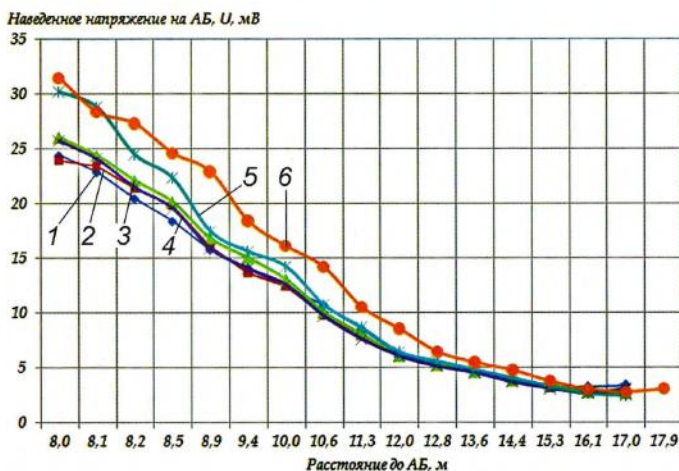


Рис. 5. Наведенное напряжение на антенных блоках различных типов в зависимости от расстояния до провода R: 1 – 06.09.16 г., АБ тип 1; 2 – 13.09.16 г., АБ тип 1; 3 – 2 – 13.09.16 г., АБ тип 2; 4 – 14.09.16 г., АБ тип 1; 5 – 14.09.16 г., АБ тип 2; 6 – 28.09.16 г., АБ тип 2

вывод об отсутствии значительного влияния формы и ориентации АБ. Величина наведенного напряжения на АБ в среднем больше на 18-20% у типа 2, чем у типа 1, что хорошо коррелируется с соотношением эквивалентных радиусов антенн и может быть описано как  $U_{a2}/U_{a1} = (0,65...0,7)R_{a2}/R_{a1}$ . Экспериментальные данные отображаются кривой, хорошо аппроксимируемой экспоненциальной функцией.

Таким образом, предлагаемая теоретическая модель может использоваться для расчета наведенного напряжения на антенны различной конструкции, применяемые в АБ. Модель позволит повысить точность определения порогов срабатывания приборов защиты стреловых кранов от опасного приближения к проводам ЛЭП.

## Литература

1. «Правила безопасности опасных производственных

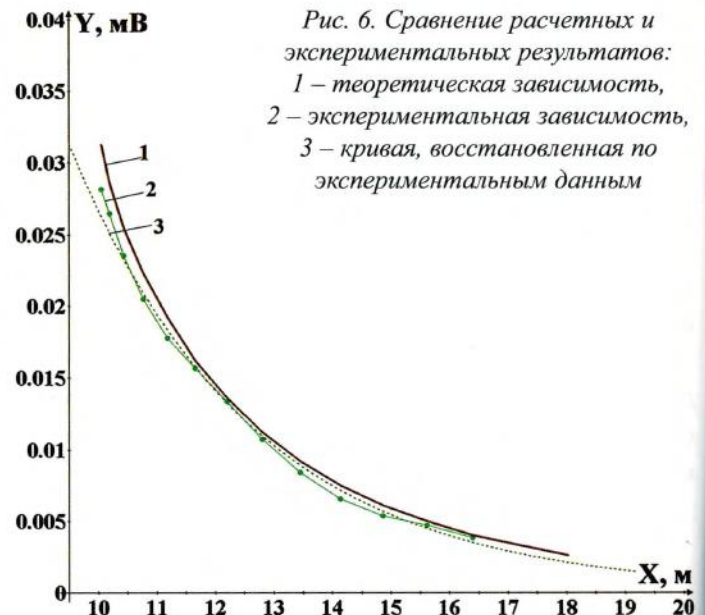


Рис. 6. Сравнение расчетных и экспериментальных результатов: 1 – теоретическая зависимость, 2 – экспериментальная зависимость, 3 – кривая, восстановленная по экспериментальным данным

объектов, на которых используются подъемные сооружения» ФНП № 352 от 12.11.2013 с изм. от 12.06.2016 Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору.

2. Нейман Л.Р. Демирчан К.С. Теоретические основы электротехники. – В 2 т. – Л.: Ленинградское отделение изд-ва «Энергия», 1967. – 411 с.

3. Гурвич И.С. Защита ЭВМ от внешних помех. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 224 с.

4. Саранин В.А. О взаимодействии двух электрических заряженных проводящих шаров // Успехи физических наук. – Т. 169. – № 4, апрель 1999 г. – С. 453-458.

V.A. Potapov. Tel. (phone) 910-476-78-72.

E-mail: potapov@itc-kros.ru

S.D. Ivanov. Tel. (phone) 499-263-68-40.

E-mail: rk4@mx.bmstu.ru



## МЕТОД РАСЧЕТА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАТЯЖЕНИЯ ГИБКОЙ ДЕФОРМИРУЕМОЙ НИТИ ПРИ ЕЁ ЧИСТО ПОПЕРЕЧНЫХ КОЛЕБАНИЯХ

Александр Владимирович БРЮКВИН, канд. техн. наук, доцент,

Ольга Юрьевна БРЮКВИНА, ст. преподаватель

Московский государственный технический университет им Н.Э. Баумана

Рассмотрены уравнения плоских поперечных колебаний гибкой деформируемой нити (троса, каната) в предположении её чисто поперечного движения, что позволяет сделать задачу определи-

мой, при этом заранее не делается никаких предположений о характере силы натяжения и её связи с удлинением элемента нити. Наличие двух неизвестных, поперечного перемещения и произвольной силы натяжения, позволяет определить не только хорошо изученное поперечное движение нити, но и характер изменения силы натяжения. Показано, что в этом случае натяжение не может быть описано законом Гука, хотя оно и пропорционально удлинению элемента нити. При малых