

УДК

Построение теоретической модели расчета наведенного от ЛЭП напряжения на антенный блок прибора безопасности стреловых кранов

В.А. Рошин¹, С.Д. Иванов¹, В.А. Потапов²

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²ЗАО ИТЦ «КРОС», Московская область, г. Ивантеевка, Россия

E-mail: aurasis@mail.ru

Поступила в редакцию 15.04.2017

Описывается теоретическая модель расчета наведенного напряжения на антенный блок прибора защиты кранов от опасного приближения к проводам ЛЭП. Обоснованы допущения в теоретической модели для практического применения в конструировании антенн приборов. Проведены натурные эксперименты с антеннами различных форм в различных погодных условиях. Проведено сравнение видов функций: полученной теоретической зависимости наведенного напряжения на АБ от расстояния до ближайшего провода и соответствующей ей экспериментальной зависимости.

Приведены результаты натурных экспериментов, подтверждающих применимость полученных расчетных зависимостей для определения наведенной ЭДС на антенны приборов безопасности

Ключевые слова: прибор безопасности, защита крана от приближения к проводам ЛЭП, расчет наведенной ЭДС.

Building a theoretical model for calculating the induced voltage on the transmission line to the antenna unit of the device security jib cranes

Vitaliy A. Rochshin¹, Sergey D. Ivanov¹, Valentin A. Potapov²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

²CJSC ITC «KROS», Moscow region, Ivanteevka, Russia

The theoretical model of the calculation of the induced voltage on the antenna unit of the device for protecting the cranes from the dangerous approach to the power line wires is described. The assumptions in the theoretical model for practical application in the design of antenna devices are substantiated. Natural experiments with antennas of various forms in different weather conditions were carried out. The types of functions are compared: the obtained theoretical dependence of the induced voltage on the AB from the distance to the nearest wire and the function restored from the experimental data from the same parameter.

The results of full-scale experiments confirming the applicability of the calculated dependences for determining the induced EMF on the antenna of safety devices

Keywords: safety device, protection of the crane from approaching to the power line wires, calculation of induced EMF.

© РОШИН Виталий Андреевич, студент 6 курса, кафедра «Подъемно-транспортные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана

© ИВАНОВ Сергей Дмитриевич, канд. техн. наук, доц., кафедра «Подъемно-транспортные системы», МГТУ им. Н.Э. Баумана

© ПОТАПОВ Валентин Алексеевич, канд. техн. наук, ген. директор ЗАО ИТЦ «КРОС»

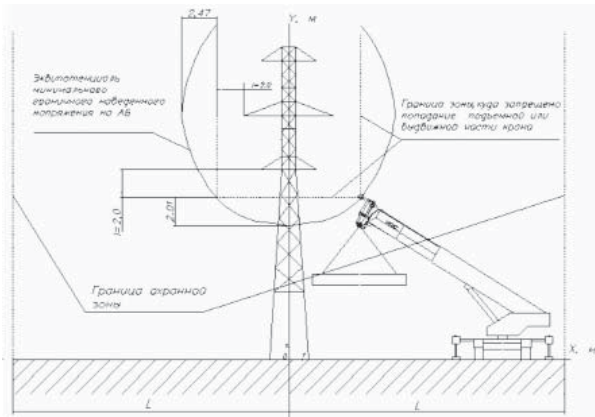


Рис. 1. Схема расположения охранной зоны и зоны, где запрещено нахождение выдвигаемых и подъемных частей крана

Современные приборы, применяющиеся для защиты стреловых кранов от опасного приближения к проводам ЛЭП, осуществляют контроль напряженности электрического поля вблизи проводника переменного тока, которым является провод ЛЭП. Чувствительным элементом прибора служит антенна, представляющая собой замкнутый металлический контур, размещаемая на оголовке стрелы грузоподъемного крана. Применяемые в настоящее время приборы значительно отличаются друг от друга формами и размерами антенн, входящих в состав их антенных блоков (АБ)

При этом очевидно, что формы и размер антенны влияют на уровень наводимого в ней ЭДС (чувствительность АБ). Поэтому каждый прибор подлежит калибровке на стенде – имитаторе ЛЭП с целью установления порогов срабатывания, обеспечивающих остановку крана на безопасном расстоянии от проводов [1] ЛЭП различного напряжения. Границы зон срабатывания приведены на рисунке 1

Однако при таком подходе калибровки приборов безопасности не учитывают ряд особенностей при работе в городской застройке, на ограниченном пространстве возле опор ЛЭП и метеоусловий – наличие осадков, влажности, температуры и др. Однако как показывает опыт эксплуатации эти факторы оказывают существенное влияние на корректную работу приборов. Поэтому для повышения защищенности стреловых кранов от опасного приближения к проводам ЛЭП и исключения поражения электротоком, необходима разработка теоретической модели расчета наведенного напряжения на АБ прибора защиты кранов, учитывающей особенности их практического применения.

В общем случае решение об остановке движения крана, приводящего к попаданию стрелы в опасную зону ЛЭП, принимается по достижении наведенным в АБ ЭДС уровня, соответствующего пороговому значению. Это значение соответствует уровню напряженности на границе (эквипотенциали) зоны, в которой запрещено нахождение выдвигаемых и грузовых частей крана.

В рамках теоретической модели предполагается первоначальное определение матрицы распределенных зарядов на проводах ЛЭП $[q]$ через решение уравнений Максвелла в матричной форме с использованием матрицы собственных потенциальных коэффициентов $[a_{ij}]$ и матрицы фазных напряжений $[\dot{U}_{\phi i}]$ линий ЛЭП. Применение данной системы уравнений является допустимым 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 , на x проводах, а затем переход к определению разности потенциалов $\Delta\phi$ между совокупностью системы 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 соответственно:

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

или в матричном виде:

$$\dot{U}_{\phi} = [\dot{U}_{\phi A1} \quad \dot{U}_{\phi B1} \quad \dot{U}_{\phi C1} \quad \dot{U}_{\phi A2} \quad \dot{U}_{\phi B2} \quad \dot{U}_{\phi C2}]. \quad (2')$$

Из уравнений Максвелла, записанных в матричной форме имеем:

$$[\dot{U}_{\phi}] = [q] = [c] \cdot [\dot{U}_{\phi}], \quad (2'')$$

где $[a]$ и $[c]$ – соответственно матрицы взаимных потенциальных коэффициентов и взаимных емкостей шести проводов; $[\dot{U}_{\phi i}]$ – матрица фазных напряжений на шести проводах, определяемая по формулам (2 и 2').

Матрицы $[a]$ и $[c]$ имеют вид $[6 \times 6]$ для шести проводов двухцепной линии ЛЭП [2].

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

Собственный потенциальный коэффициент проводов в общем виде определяется по формуле:

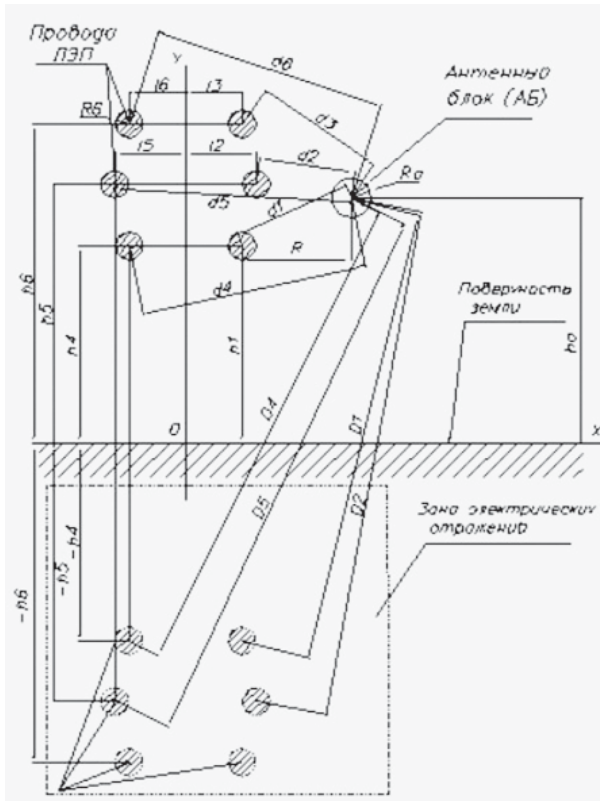


Рис. 2. Схема расчета взаимных коэффициентов с учетом влияния земли

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

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

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

$$a_{ii} = \frac{2}{4\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{r_i}, \quad (5)$$

где $h_i = h_{ic} - l_r - \Phi_{np}$ – 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_{ic} – расстояние от земли до точки крепления гирлянды изоляторов к траверсе; l_r – длина гирлянды изоляторов; Φ_{np} – стрела провеса провода.

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

$$a_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 S_i S_j} \iint \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) dS_i dS_j, \quad (6)$$

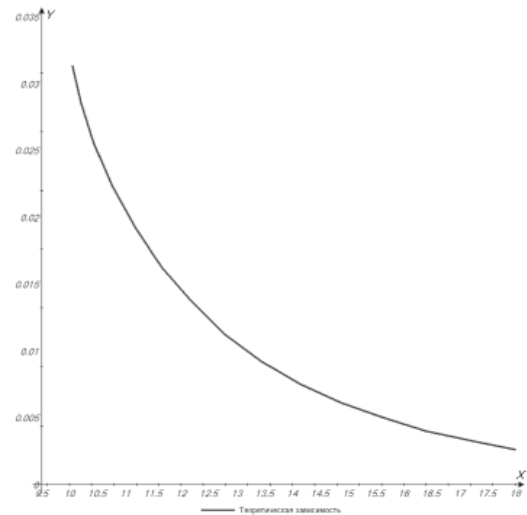


Рис. 3. Расчетная зависимость наведенного ЛЭП напряжения на АБ $U_{нав.теор.}$

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

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

$$a_{ij} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \iint \left(\frac{1}{r_{ij}} - \frac{1}{r_{ij}'} \right) dS_i dS_j \approx \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}}, \quad (6')$$

где D_{ij} – расстояние между i -м проводом и зеркальным отображением j -го провода; 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, матрица $[a]$ и, соответственно, матрица $[c] = [a]^{-1}$, а потом и $[q] = [c] \cdot [\vec{U}_\phi]$ полностью определены.

На втором этапе построения теоретической модели определяется наведенное напряжение ϕ 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:

$$\Delta\phi = u_{нав.теор.} = \sum_{i=1}^6 a_{iA} q_i, \quad (7)$$

где $u_{нав.теор.}$ – 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

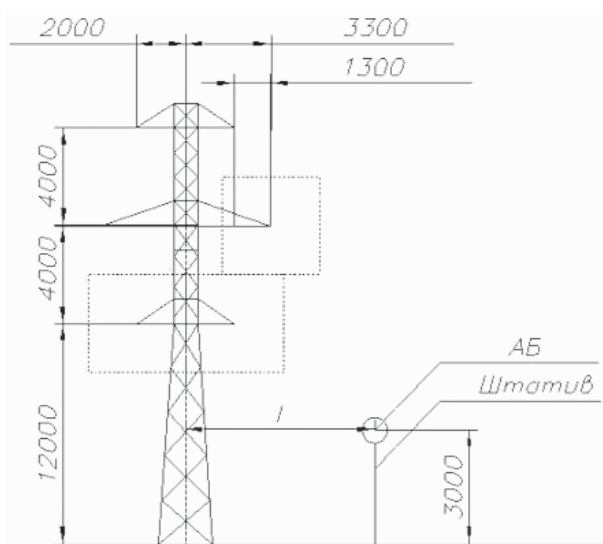


Рис. 4. Схема экспериментов по замеру наведенного напряжения на АБ

коэффициентов проводов и АБ применяем преобразованную формулу аналогичную формуле (6) для 2-х 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 потенциальные коэффициенты имеют вид $C_{iA} = \frac{(D_{iA}^2 - r_A^2)}{(r_A \cdot D_{iA})}$, $c_{iA} = \frac{(d_{iA}^2 - r_A^2)}{(r_A \cdot d_{iA})}$; 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 $u_{\text{нав.теор.}}$ на АБ

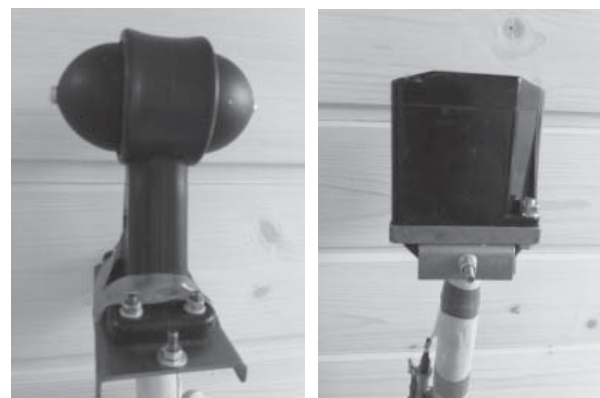
На рисунке 3 представлен график расчетного наведенного напряжения на АБ для линии ЛЭП П35-2+5 с напряжением $U=35$ кВ, высотой подвеса нижнего провода 14 м и величиной провиса основного провода, равной 1 м.

В расчетной модели форма АБ принимается сферической, а другие формы АБ приводятся к сферам эквивалентного радиуса, определяемого по формуле: [4].

$$R_3 = \frac{1}{2} \cdot 0,42 \cdot \left\{ \frac{b_1 + b_2 + b_3}{3} + \sqrt{\frac{b_1 b_2 + b_2 b_3 + b_1 b_3}{3}} + \sqrt[3]{b_1 b_2 b_3} \right\}, \quad (9)$$

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

В качестве подтверждения работоспособности и применимости данной модели расчета наведенного на АБ напряжения проведены натурные замеры на двухцепной ЛЭП ПС 35-2 напряжением 35 кВ. Целью натурных экспериментов по замеру наведенного на АБ напряжения $U_{\text{нав.э}}$ было измерение этого напряжения в различных условиях с целью оценки достоверности теоретического



1 2

Рис. 5. Антенный блоки различных модификаций приборов «Барьер 2000К»:

1 – Тип 1, 2 – Тип 2

расчета $U_{\text{нав.теор.}}$ и соответствия поведения $U_{\text{нав.эксп.}}$ характеру теоретической кривой.

Схема проведения натурных экспериментов представлена на рисунке 4.

В экспериментах проводились замеры для различных типов АБ. Тип 1 был представлен АБ прибора «Барьер-2000К» со сферической формой АБ с $R_a = 25$ мм. Тип 2 АБ был представлен АБ с формой параллелепипеда с металлической антенной подобной формы с $R_{a3} = 32$ мм. Оба антенных блока – производства ИТЦ «КРОС» (г. Ивантеевка Московской обл.). АБ типов 1 и 2 представлены на рисунке 5.

Замеры наведенного напряжения $U_{\text{нав.э}}$ производились при разных положениях АБ относительно линии ЛЭП (торцевой и боковой сторонами, обращенными к проводам ЛЭП). Натурные эксперименты по замеру наведенного на АБ напряжения проводились в различных погодных условиях (при различной влажности, температуре, облачности, в разное время суток). Результаты серии экспериментов в виде зависимости, наводимого на антенну напряжения, от расстояния до ближайшего провода ЛЭП, напряжением 35 кВ, представлена на рисунке 6.

При обработке результатов натурных экспериментов было проведено сравнение видов функций: полученной теоретической зависимости наведенного напряжения от расстояния до ближайшего провода и восстановленной по экспериментальным данным функции от такого же параметра. Обе зависимости носят экспоненциальный характер (рис.6).

По результатам натурных экспериментов можно прийти к следующим выводам:

- отсутствие влияния формы и ориентации АБ при данной геометрической форме АБ (тип 1 и тип 2). При проведение экспериментов с другими геометриями АБ (АБ тип 1 дополненный симметричными вытянутыми «усами с шайбами») разница от ориентации АБ по отношению к проводам ЛЭП появляется

- наведенное напряжение на АБ тип 2 в сред-

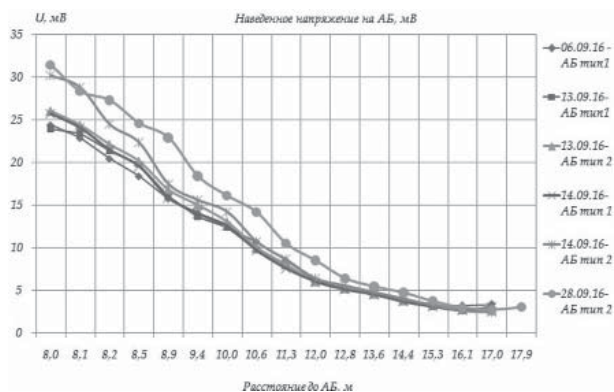


Рис. 6. Наведенное напряжение на АБ на различных типах АБ в зависимости от расстояния до провода R

нем больше наведенного напряжения на АБ блоке типа 1 на 18–20%, что хорошо коррелируется с соотношением эквивалентных радиусов антенны типа 2 к антенне типа 1 и может быть описано как $U_{a2}/U_{a1} = (0,65-0,7) R_{a2}/R_{a1}$;

– экспериментальные данные представляют собой кривую, хорошо аппроксимируемую экспоненциальной функцией.

Таким образом, предлагаемая теоретическая модель может использоваться для расчета наведенного напряжения $U_{\text{нав.теор.}}$ на антенны различной конструкции, применяемых в АБ. Данная модель позволит повысить точность определения порогов срабатывания приборов защиты стреловых кранов от опасного приближения к проводам ЛЭП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Правила безопасности опасных производственных 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., Ленинград, 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, 1999. Т. 169, № 4.

REFERENCES

1. «Pravila bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"yektov, na kotorykh ispol'zuyutsya pod"yemnyye

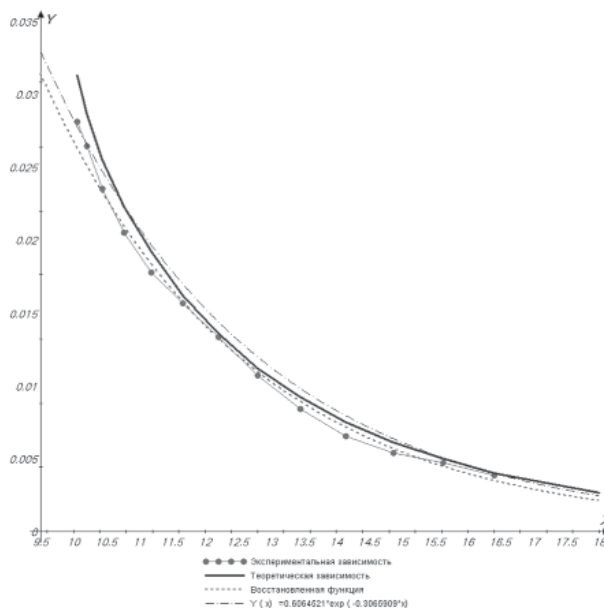


Рис. 7. Восстановленная кривая по результатам эксперимента и сравнение с теоретическими кривыми

sooruzheniya» FNP № 352 ot 12.11.2013 g. s izm. ot 12.06.2016. Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru. («Rules of safety of hazardous producing facilities that use lift facilities» FNP number 352 from 12.11.2013, the rev. from 12.06.2016. Rostekhnadzor).

2. **Neyman L.R. Demirchan K.S.** Teoreticheskiye osnovy elektrotekhniki v 2 t., Leningrad, Leningradskoye otdeleniye izd-va «Energiya», 1967. 411 s. (L.R. Neiman K.S. Demirchan Theory of Electrical Engineering 2 t., Leningrad, Leningrad branch of the publishing house «Energy», 1967. 411 p.).

3. **Gurvich I.S.** Zashchita EVM ot vneshnikh pomekh. 2-ye izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 1984. 224 s. (Gurvich J.S. Computer protection from external interference. 2 nd ed., Revised. and ext. M.: Energoatomizdat, 1984. 224 p.)

4. **Saranin V.A.** «O vzaimodeystvii dvukh elektricheskikh zaryazhennykh provodyashchikh sharov» // Uspekhi fizicheskikh nauk, 1999. T. 169. № 4. (V.A. Saranin «On the interaction of two electrically charged conducting balls» // Advances of Physical Sciences, 1999. Vol. 169, № 4).