

## УТОЧНЕНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПОТЕРИ МОЩНОСТИ В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

**Айдарова А.Р.**

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Рассматриваются вопросы компьютерного моделирования при исследовании влияния качества электроэнергии на величину потерь в элементах распределительной сети в переходном режиме, а также предложены дополнительные факторы, которые могут повлиять на снижение потери мощности в высоковольтных воздушных линиях электропередачи.

### TO THE QUESTION ON FACTORS AFFECTING APPARENT POWER LOSSES AT OVERHEAD LINES

**Prepared by Aidarova A.R.**

Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov

This paper includes computer modeling issues in research of the influence to apparent power quality on the magnitude of the losses in the elements of the distribution network in the transient mode, as well as suggested additional factors that may affect to apparent power losses in high-voltage overhead lines.

**Введение.** Необходимость экономии топливно-энергетических ресурсов, и их бережного расходования осознана всеми странами как с развитой, так и с переходной экономикой, а развитие ключевых отраслей экономики невозможно без опережающего роста производства электрической энергии. Однако, в процессе передачи электрической энергии по электрическим сетям неизбежны потери электрической энергии, которые приводят к дополнительному сжиганию топлива на электростанциях и снижению пропускной способности сети.

Поэтому, несмотря на то, что основные факторы, определяющие потери в электрических сетях, хорошо известны и исследованы, необходимы тщательные анализы всех составляющих потерь и причин их появления.

#### **Постановка задачи**

**1.** Использование новых многофункциональных средств моделирования и измерения параметров электрических режимов позволит уточнить и глубже исследовать влияние **дополнительных факторов** на нагрузочные потери, которыми ранее при анализе пренебрегали.

К числу дополнительных и мало исследованных факторов относится низкое качество электроэнергии (КЭ) и, в первую очередь, хаотические составляющие токов и напряжений, а также их несинусоидальность и несимметричность. Это связано с увеличением количества и повышением установленной мощности электроприемников с нелинейным и несимметричным характером нагрузок. Основная доля искажающей нагрузки приходится на крупные промышленные предприятия. При этом следует отметить и увеличение доли бытовой нагрузки, имеющей в своем составе нелинейные и несимметричные ЭП.

**2.** Определение потерь электроэнергии на корону (ПК) значительно сложнее и представляет собой самостоятельную проблему.

В отличие от нагрузочных потерь, ПК имеют другую природу и определяются особенностями функционирования воздушной изоляции линий электропередачи. Потери мощности от короны на проводах ВЛ могут достигать значительных величин и зависят от уровня рабочего напряжения сети, сечения проводов и конструкции фазы, но, главным образом, от погодных условий. Потери на корону при тумане и изморози возрастают в десятки раз по сравнению с потерями при хорошей погоде.

Экспериментальные исследования, проведенные в высокогорной экспериментальной станции ТЮЗ-Ашу (КР на высоте 3050 м над уровнем моря) показали, что значения обобщенных для различных сечений проводов потерь мощности на корону в хорошую погоду в 2(3) раза ниже потерь, рассчитанных по методике для высокогорных ЛЭП. Потери мощности от короны, измеренные в условиях сухого снега и дождя на этой высоте, также существенно ниже потерь, рассчитанных. Таким образом, возникает необходимость проведения исследований с целью **уточнения влияющих факторов** и методики расчета потерь мощности и энергии на корону, в особенности применительно к высокогорным ЛЭП.

#### **Результаты исследования №1**

Поставленная в работе первая задача, по уточнению **дополнительных влияющих факторов** на нагрузочные потери мощности, решалась на основе математического (компьютерного) моделирования. Это связано с тем, что часто проведение реального эксперимента или невозможно, или требует слишком больших экономических затрат, кроме того несомненным достоинством компьютерных экспериментов является возможность учитывать сколь угодно большое количество факторов, обеспечивая тем самым полный контроль влияния всех входных параметров на результат, что не всегда возможно в реальном эксперименте.

Рассмотрим, как изменяются потери в элементах электрической сети в переходном режиме, когда трехфазный источник напряжения работает на несимметричную нагрузку. Эту задачу можно решить, используя возможности Simulink (S) и SimPowerSystems (SPS). При этом мы можем не только моделировать работу системы во временной области, но выполнять различные виды анализа таких систем.

На рис.1 показана схема с использованием трехфазного источника напряжения, подключаемого к несимметричной трехфазной нагрузке, на рис.2 а, b, c, d - результаты моделирования. Токи в нагрузке измерены с помощью Multimeter, а для исследования потерь электроэнергии в нагрузках каждой фазы в переходном режиме использована SPS – модель.

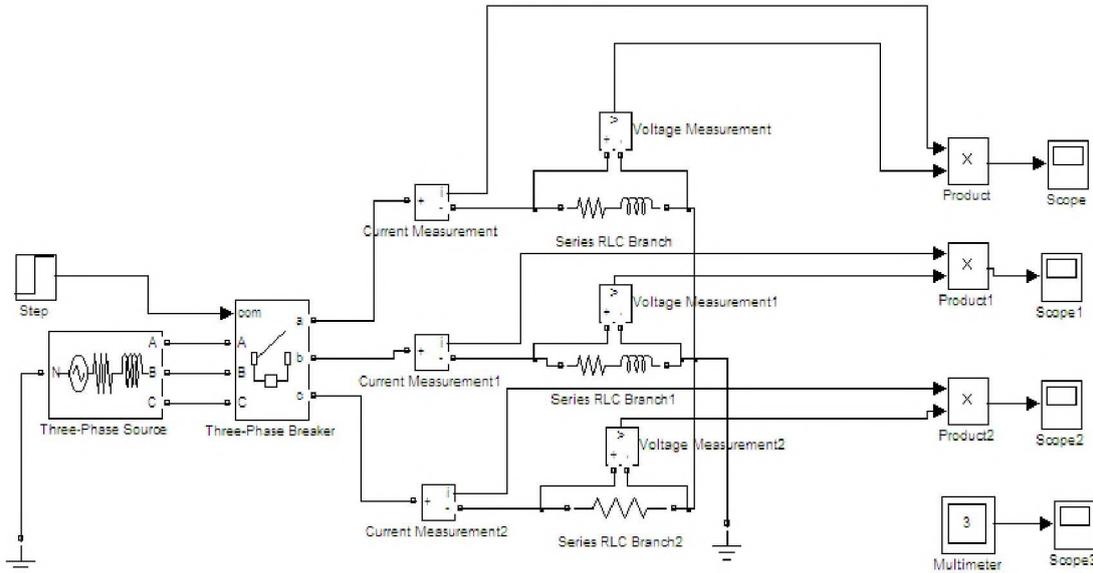


Рис. 1. Работа трехфазного источника напряжения на несимметричную нагрузку

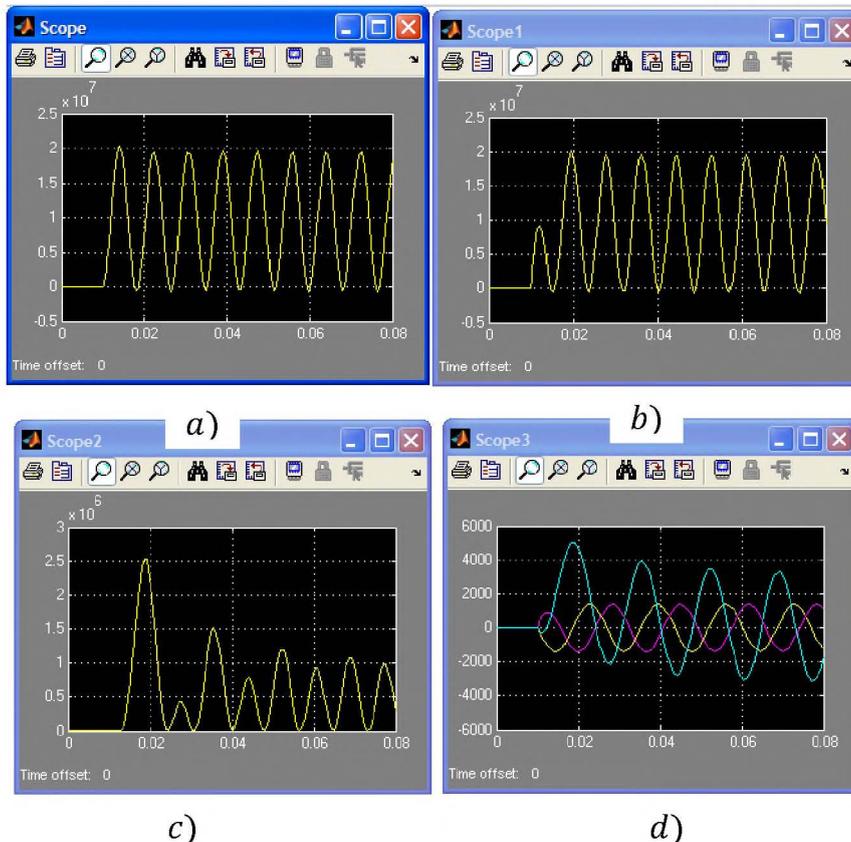


Рис. 2. Результаты моделирования: а, b, с – графики изменения потерь электрической энергии в соответствующих фазах; d– графики изменения токов в фазах А, В, С

В работе предлагается компьютерная модель (с использованием программного комплекса LABVIEW) для исследования передачи энергии переменным током (рис.3) от источника напряжением  $u = u_s + u_c$ , через сопротивление  $z_l$  обоих проводов линии к переменному сопротивлению  $z_n$  нагрузки, где  $u_s = U_m \sin(\omega t + \psi)$ , а  $u_c$  –стохастическая составляющая приложенного напряжения. Исследование проводится с целью изучения влияния стохастических процессов на потери энергии в линии передач электрической сети (рис. 3).

**Рой задачи.**

Сначала рассмотрим решение поставленной задачи для случая, когда сигнал (напряжение  $u$ ) не содержит стохастическую составляющую, т.е.  $u_c = 0$ .

Обозначим комплексные сопротивления провода линии и нагрузки через,  $Z_l = r_l + jx_l$  и  $Z_n = r_n + jx_n$ . Найдем полную мощность на зажимах нагрузки:

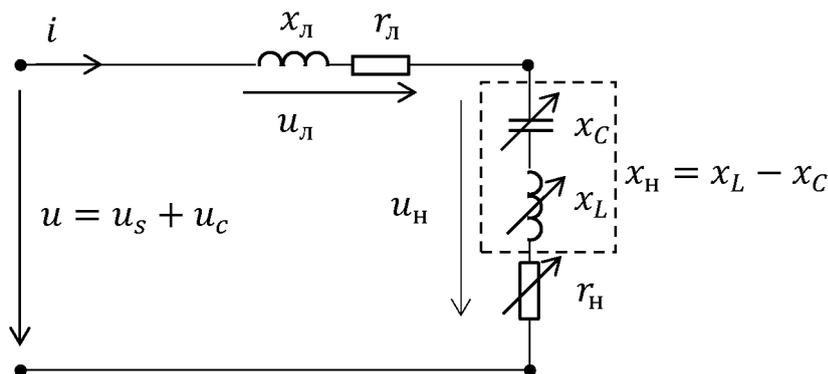


Рис.3. Передача энергии от источника напряжением  $u$  к нагрузке

$$S = z_n I^2 = \frac{z_n U^2}{|Z_l + Z_n|^2} = \frac{z_n U^2}{|Z_l (1 + \frac{z_n}{z_l})|^2} = \frac{z_n U^2}{|Z_l|^2 |1 + \frac{z_n}{z_l}|^2} = \frac{z_n U^2}{z_l^2 |1 + \frac{z_n}{z_l}|^2} = \left(\frac{U}{z_l}\right)^2 \frac{z_n}{|1 + \frac{z_n}{z_l} e^{j(\varphi_n - \varphi_l)}|^2} = \left(\frac{U}{z_l}\right)^2 \frac{z_n}{1 + 2 \frac{z_n}{z_l} \cos(\varphi_n - \varphi_l) + \left(\frac{z_n}{z_l}\right)^2}. \tag{1}$$

Используя (1) и уравнение  $S = z_n I^2$  определим  $I^2$ :

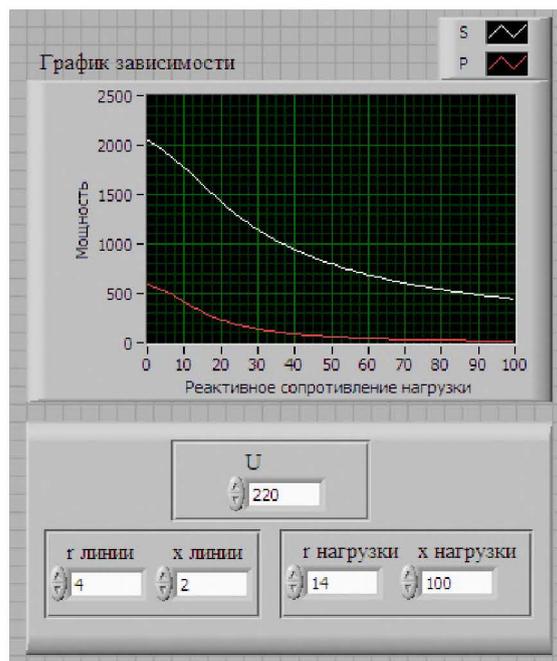
$$I^2 = \left(\frac{U}{z_l}\right)^2 \frac{1}{1 + 2 \frac{z_n}{z_l} \cos(\varphi_n - \varphi_l) + \left(\frac{z_n}{z_l}\right)^2}.$$

Следовательно, активная мощность, которая теряется в проводах линии равна

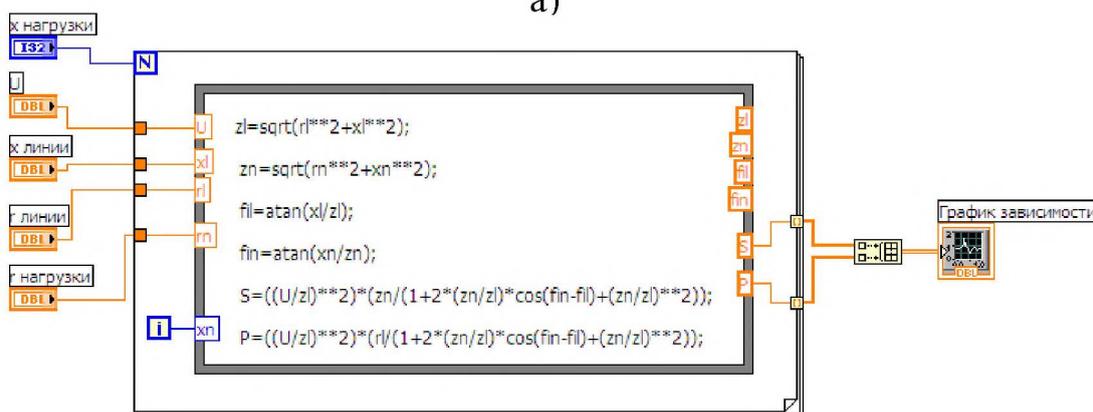
$$P = r_l I^2 = \left(\frac{U}{z_l}\right)^2 \frac{r_l}{1 + 2 \frac{z_n}{z_l} \cos(\varphi_n - \varphi_l) + \left(\frac{z_n}{z_l}\right)^2},$$

где  $z_l = \sqrt{r_l^2 + x_l^2}$ ,  $z_n = \sqrt{r_n^2 + x_n^2}$ ,  $\varphi_l = \arctg \frac{x_l}{r_l}$  и  $\varphi_n = \arctg \frac{x_n}{r_n}$ .

Компьютерная модель для исследования потерь мощности в проводах линии передачи построенная в среде программирования LABVIEW для идеального сигнала, приведена на рис.4.



а)



б)

Рис.4. Передняя панель – а) б) – блок - диаграмма программы.

Однако реальный сигнал в реальной электрической сети существенно отличается от идеального. Отличия объединяются наличием различных помех, таких как: отклонение напряжения, колебания напряжения, несинусоидальность напряжения, несимметрия трехфазной системы напряжения, отклонения частоты.

Предполагается, что несинусоидальность напряжения в рассматриваемой сети возникает за счет наложения на идеальную синусоиду напряжения стохастической составляющей, которая возникает в сетях с нелинейными элементами, с такими как: вентиляльные преобразователи, силовое электрооборудование с тиристорным управлением, дуговые и индукционные электропечи, люминесцентные лампы, установки дуговой и контактной сварки, преобразователи частоты, бытовая техника (компьютеры, телевизоры и др.).

Рассмотрим компьютерную модель (виртуальный прибор) для исследования влияния несинусоидальности на потери энергии в сети.

Внешний вид разработанного виртуального прибора с результатами его работы представлен на рис. 5, а его функциональная схема на рис.6.

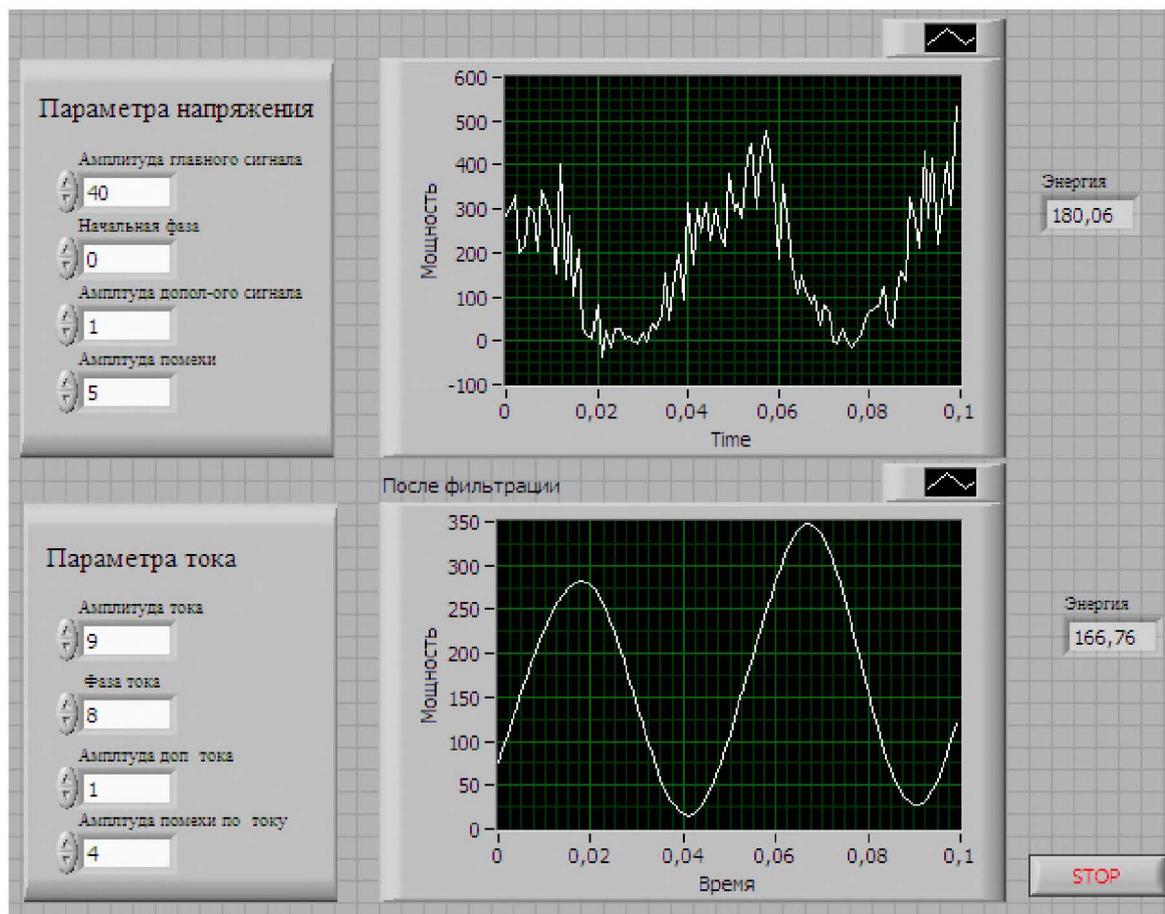


Рис.5. Передняя панель модели

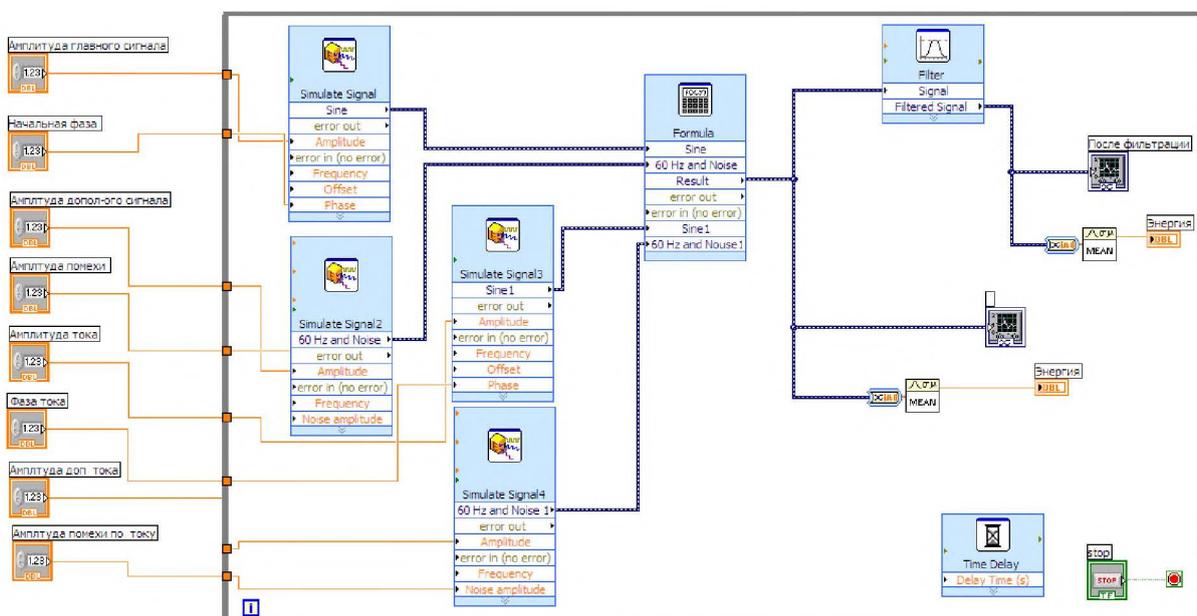


Рис.6. Функциональная схема модели

### Результаты исследования №2

Любые неровности на проводах приводит к местному увеличению напряженности электрического поля и, как следствие, к возникновению местной короны в отдельных точках провода, которые обуславливают возникновению радиопомех и ПК, характеристики которых зависят главным образом от напряженности электрического поля на проводе, его диаметра, состояния поверхности, метеорологических условий и подвержены значительным разбросам.

Анализ научных публикаций посвященных оценке влияний погодных условий на ПК, показал, что они в основном связаны с возникающими на поверхности проводов неровностями из-за атмосферных отложений (капли дождя, роса, снег, изморозь, гололед, иней).

По нашему мнению, влияние погодных условий на ПК связано еще и другими дополнительными причинами. Например, в соответствующих расчетных аналитических выражениях, с помощью которых оцениваются ПК, содержится величина  $\epsilon_0$ , которую в одних публикациях называют диэлектрической проницаемостью воздуха, а в других электрическая постоянная равная  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м, характеризует электрические свойства вакуума :

- для ВЛ с одиночными проводами напряженность  $E$  электрического поля на поверхности провода определяется по формуле

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (2)$$

где  $q$  – линейная плотность заряда на проводе, К/м;

$r_0$ – радиус одиночного провода, см ( $10^{-2}$  м);

$\epsilon_0$  – Диэлектрическая проницаемость воздуха:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^9} \text{ Ф/м.}$$

в расщепленном проводе средняя напряженность  $E$  поля на поверхности провода определяется по формуле

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 n r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (3)$$

где  $r_0$ –радиус составляющих расщепленного провода, см ( $10^{-2}$  м).

Максимальная напряженность, которая возникает в точках А (рис.7), определяется по формуле

$$E_M = \kappa_n E \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)} \quad (4)$$

где  $\kappa_n$  – коэффициент неравномерности распределения заряда по поверхности составляющего провода.

$$\kappa_n = 1 + (n - 1) \frac{r_0}{r_p} = 1 + \beta \frac{r_0}{a}, \quad (5)$$

где  $r_p$  – радиус расщепления;  $a$ – шаг расщепления расщепленного провода, см ( $10^{-2}$  м).

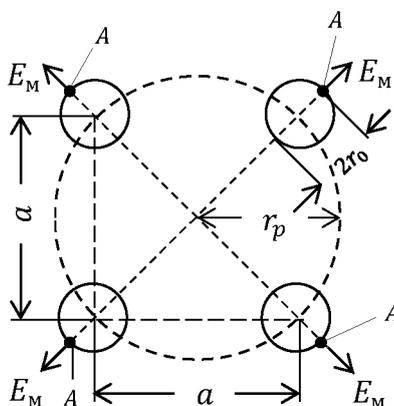


Рис.7. Расщепленный провод ( $n = 4$ )

Значение  $\beta$ , в зависимости от числа составляющих проводов в расщепленном проводе, определяется по формуле

$$\beta = 2(n - 1) \sin \frac{\pi}{n} \quad (6)$$

Если подходить строго, то выше отмеченные неточности устраняются, если в выражениях, вместо  $\epsilon_0$  подставлять  $\epsilon_a = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ , где  $\epsilon_a$  и  $\epsilon_0$  соответственно абсолютная и относительная диэлектрические проницаемости вещества, в нашем случае воздуха. Т.к. для газа  $\epsilon_r \approx 1$ , то для воздуха, в хороших погодных условиях, можно считать  $\epsilon_a \approx \epsilon_0$ . Но во время дождя или снегопада, особенно при ливневых дождях или снежной метели, пространство между проводами воздушной линии электропередачи и землей можно считать заполненным композиционным диэлектриком (КД). КД в одном случае смесь воздуха и капелек воды во время дождя, а в другом случае смесь воздуха и снежинок. В этом случае  $\epsilon_r > 1$  и его значение можно оценить формулой Лихтенекера:

$$lg \epsilon_{cm} = y_1 lg \epsilon_1 + y_2 lg \epsilon_2,$$

где  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  – диэлектрические проницаемости компонентов (для воды  $\epsilon_r = 81$ ),  $y_1$ ,  $y_2$  – объемные содержание компонентов. Значения  $y_1$  и  $y_2$  зависят от интенсивности осадков, их можно оценить путем экспериментального измерения.

Другим дополнительным фактором, который может повлиять на ПК, является физический процесс.

Во время низовых метелей крупные кристаллы льда заряжаются отрицательно, а более мелкая снежная пыль – положительно. Свежевыпавший снег во всех случаях обнаруживает более значительную электризацию, чем слежавшийся. При взвихривании снежной пыли в воздухе может возникать объемный заряд до 1-8 кулон м<sup>3</sup>. Особенно сильные электрические поля (до 100 в/см) наблюдаются во время снежных метелей в полярных и высокогорных областях. Сталкиваясь с проводами линий телефонной или телеграфной связи, снежинки из метельных потоков передают им свой заряд. При хорошей изоляции от земли может накопиться такой большой заряд, что в прилегающем воздухе возникнет коронный разряд.

#### Список литературы

1. Фурсанов М.И. Определение и анализ потерь электроэнергии в электрических сетях энергосистем. — Мн.: УВИЦ при УП «Белэнергосбережение», 2005.
2. Шамонов Р. Г. Разработка методики оценки влияния качества электроэнергии на потери мощности и энергии в электрических сетях. Научная библиотека диссертаций и авторефератов. <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-metodiki-otsenki-vliyaniya-achestva-elektroenergii-na-poteri-moshchnosti-i-energii>
3. Беляева Л.А., Булатов Б. Г. Оценка потерь электроэнергии на корону по данным телеметрии // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2007. № 20(92). С. 43–45.
4. Егиазарян Л.В., Сафарян В.С., Караханян Л.О, Арутюнян А.С. К вопросу уточнения расчета потерь мощности на корону в высокогорных воздушных линиях электропередачи // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 2010. Т. LXIII, 1- С. 63-69.
5. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750кВ и постоянного тока 800-1500 кВ.- М.: СЦНТИ ОРГРЭС, 1975.
6. Дикамбаев Ш.Б., Костюшко В.А., Ордоков И.О., Емельянов Н.П. Исследование потерь мощности на корону на высокогорных линиях электропередачи переменного тока // Сб. “Исследования и испытания в электропередачах 750-1150 кВ”.–М.: Энергоатомиздат,1991.- С. 131-141.
7. Айдарова А.Р. Компьютерное моделирование при решении прикладных задач электроэнергетики // Изв. Вузов КР, - 2014. №1. С. 31-35.
8. Айдарова А.Р. Компьютерная модель для исследования влияния стохастических факторов на потери энергии в электрических сетях // Поиск, серия естеств. и техн. наук. Науч. жур.-прилож. международного журнала «Высшая школа Казахстана» РК. 2014. №2. С. 71-76.
9. Атабеков Г.И. Теоретические основы электротехники, ч. I, Линейные электрические цепи, изд. 4-е, М., «Энергия», 1970, 592 с. с илл.
10. Сапунов, М. Вопросы качества электроэнергии / Новости электротехники.– 2001.– №4. С.8-10.
11. Костюшко В.А. Анализ расчетных и экспериментальных оценок потерь мощности на корону на воздушных линиях электропередачи переменного тока. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011. – 84 с.: ил.[Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик», Вып. 6 (150)].
12. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учеб.для вузов / И.М. Бортник и др.; под общ. ред. И.П. Верещагина. – 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 704 с.: с ил.
13. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1986. – 263 с.: ил.
14. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: «Энергия», 1973. 328 с. с ил.
15. Мосин О.В. Диэлектрические свойства воды и льда. [http://www.o8ode.ru/article/kric/Dielectric\\_properties\\_of\\_water\\_and\\_ice](http://www.o8ode.ru/article/kric/Dielectric_properties_of_water_and_ice)