

УДК 621.311
DOI: 10.15827/0236-235X.140.737-747

Дата подачи статьи: 02.09.22, после доработки: 29.09.22
2022. Т. 35. № 4. С. 737–747

Программно-вычислительный комплекс моделирования эффектов от коронирования проводов воздушных линий переменного тока

А.Б. Баламетов¹, д.т.н., профессор, balametov.azniie@gmail.com
Э.Д. Халилов¹, к.т.н., зав. отделом, elmanxalilov2010@mail.ru
Т.М. Исаева², к.т.н., доцент

¹ Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, г. Баку, Ясамал, AZ1122, Азербайджан

² Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, AZ1010, Азербайджан

С развитием электрических сетей высоких и сверхвысоких напряжений и ультравысокого напряжения вопросы экологического влияния высоковольтных линий электропередачи приобретают актуальность. Возникла острая необходимость в разработке программного обеспечения для оценки (мониторинга) электромагнитной совместимости воздушных линий. Оно позволит оценить воздействие линий электропередачи переменного тока высокого напряжения на окружающую среду.

В статье рассмотрено математическое моделирование влияния проводов воздушной линии, электромагнитных помех, коронного разряда, радиопомех в проводах. Разработана программа расчета потерь мощности и энергии на корону в воздушных линиях сверхвысоких напряжений переменного тока. Для вычисления емкости фаз воздушных линий реализована методика определения рабочей емкости проводов при горизонтальном расположении проводов и двух заземленных тросах.

Разработано программное обеспечение электромагнитной совместимости, которое может быть использовано для принятия мероприятий, направленных на снижение электрического поля воздушных линий сверхвысокого напряжения.

На примере воздушных линий с напряжением 500 кВ представлены результаты комплексной системы моделирования потерь короны, напряжения электрического поля и потерь активной энергии из-за радиопомех.

Ключевые слова: программно-вычислительный комплекс, программное обеспечение, комплексная система моделирования, моделирование короны, потеря мощности, электромагнитная совместимость, электромагнитное воздействие.

Потери активной мощности, вызываемые коронированием проводов, для различных атмосферных факторов являются функцией 4–8-й степени от уровня напряжения *воздушной линии* (ВЛ). Получение характеристик удельных потерь активной мощности от напряжения для ВЛ разных классов напряжения 220–1150 кВ и конструктивного выполнения в виде аппроксимированных функций в аналитическом виде имеет важное значение при моделировании установившихся режимов и оптимизации электрических сетей *сверхвысоких напряжений* (СВН). В современных условиях в связи с ростом возможностей вычислительной техники повысился интерес к расчетам режимов ВЛ.

Вопросы экологического влияния высоковольтных линий электропередачи [1, 2] приобретают актуальность в связи с развитием электрических сетей высоких напряжений и СВН, а также *ультравысокого напряжения* (УВН).

Вредное действие магнитного поля на живые организмы проявляется только при очень высоких напряженностях порядка 150–200 А/м, возникающих на расстоянии до 1–1,5 м от проводов фаз ВЛ. Вредные последствия пребывания человека в сильном электрическом поле зависят от напряженности поля и от продолжительности его воздействия. В настоящее время отсутствует ПО для моделирования эффектов от коронирования проводов ВЛ переменного тока и оценки (мониторинга) электромагнитной совместимости.

Моделирование короны ВЛ переменного тока в установившихся режимах

Величина потерь мощности на корону, вызванная местными очагами разряда объемного заряда, перемещающегося в поле проводов линии, зависит от количества объемного заряда и,

следовательно, от числа и интенсивности источников разряда.

Теоретическая оценка потерь энергии, вызываемых местной короной, оказывается невозможной ввиду трудности оценки количества, формы и размеров источников разряда на поверхности провода. Поэтому действующие методики расчета потерь мощности на корону базируются на экспериментальных исследованиях местной короны, на реальных проводах линий и на действующих линиях электропередачи.

Наименьшие потери энергии на корону в линии имеют место при хорошей погоде. При дожде, мокром снеге, тумане потери увеличиваются на порядок. При изморози на проводах наблюдаются наибольшие потери, которые еще на порядок больше, чем при дожде.

В разное время для расчета потерь на корону были предложены несколько эмпирических и полуэмпирических формул [1–3]. Однако ни одна из них не выдержала проверки практикой, что привело к развитию чисто экспериментальных работ на опытных участках линий.

Методам расчета потерь на корону посвящено немало работ, например [3–5]. Для расчета потерь мощности проводов ВЛ СВН от короны наиболее широкое распространение получили действующие Руководящие указания [6], разработанные ВНИИЭ, НИИПТ, и методика ЭНИН. Эти методики базируются на экспериментальных данных, полученных на опытных и промышленных линиях, и обобщении характеристики короны на случай произвольной линии. Сопоставлению методик ВНИИЭ и ЭНИН посвящены работы [5, 7], в которых делается вывод, что для ВЛ с ростом емкости коронирующей системы методика ЭНИН приводит к большим значениям потерь.

Расчет потерь мощности на корону по обобщенным характеристикам

В соответствии с Руководящими указаниями потери мощности на корону определяются для каждой группы погоды по обобщенной характеристике и являются функцией отношения E/E_0 :

$$\Delta P_{ki}^* = \frac{\Delta P_{ki}}{nr_0^2} = f\left(\frac{E_{si}}{E_{0i}}\right), \quad (1)$$

где ΔP_{ki} – потери мощности на корону при i -й группе погоды; n – количество проводов в фазе расщепленного провода; r_0 – радиус составляющих расщепленного провода.

Обобщенные характеристики потерь на корону (1), полученные по результатам многолетних измерений для основных погодных условий: хорошая погода – ХП, сухой снег – СС, дождь – Д, изморозь – И, приведены в [5, 7].

Обобщенная характеристика для дождя относится к среднегодовой интенсивности дождя $I = 1$ мм/ч. Обобщенная характеристика потерь при любой другой интенсивности дождя определяется умножением значения ΔP_{kd} на отношение $k_d = \Delta P_{ki}/\Delta P_{ki=1}$.

Для более точного учета величины внутри зоны трассы линии необходимо делить на ряд участков путем проведения на профиле трассы горизонталей по высоте. Высота между горизонталями может быть равной примерно 200–500 м.

В Руководящих указаниях для учета влияния нагрева током нагрузки вводится понятие критической плотности тока $J_{кр}$, представляющей собой наименьшую плотность тока в проводах ВЛ, при которой, несмотря на выпадение осадков (изморози, инея, росы, дождя малой интенсивности и др.), потери на корону не превышают уровня потерь при хорошей погоде. $J_{кр}$ зависит от диаметра провода и от метеорологических условий.

При оценке потерь мощности на корону по упрощенному методу учитываются только четыре основные группы погодных условий; влияние нагрева проводов током нагрузки на потери мощности на корону при изморози, дожде, инее, росе, повышенной влажности и тумане не учитывается.

При более точной оценке потерь мощности на корону в соответствии с методикой уточняется влияние нагрева. В этом случае требуется дополнительная детализация погодных условий [6].

Под влиянием нагрева проводов током нагрузки продолжительность погодных условий и величина потерь на корону при дожде и изморози уменьшаются, а отложения на поверхности проводов в виде инея и капель воды при тумане, повышенной влажности воздуха и росе не образуются.

Наилучшее приближение к полученной расчетной зависимости обобщенных характеристик потерь на корону для всех групп погоды обеспечивается функцией [8]

$$\Delta P_{ki}^* = a_1 \exp\left[a_2 \left(\frac{E_s}{E_0} - 0.55\right) + a_3 \left(\frac{E_s}{E_0} - 0.55\right)^2\right]. \quad (2)$$

Значения коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 приведены в [7].

В соответствии с [5] средние удельные потери мощности на корону рассчитываются по выражению

$$\Delta P_{ki} = nr_0^2 (2\theta_{1i} + \eta_{2i}), \quad (3)$$

где $\theta_i = f(E_{3i}/E_{0i})$ определяется по обобщенным кривым для четырех основных погодных условий; θ_{1i} и θ_{2i} – значения обобщенных потерь на корону для группы погоды i на крайней и средней фазах ВЛ при горизонтальном расположении проводов.

В [6] все необходимые зависимости представлены в графическом виде, и поэтому их программная реализация затруднительна. Для выбора вида аппроксимирующей функции обобщенных характеристик потерь на корону были исследованы погрешности аппроксимации различными функциями.

Для реализации уточненной методики по учету интенсивности осадков, влияния нагрева проводов током нагрузки на потери на корону все зависимости, заданные графически, были аппроксимированы [7].

Программа позволяет при заданной конструкции ВЛ, марке провода, погодных условиях, плотности воздуха, негладкости провода, плотности тока, высоте над уровнем моря, температуре трассы ВЛ, диапазоне изменения напряжения получать статические характеристики потерь на корону вида (2) для основных десяти групп погоды и среднегодовые потери на корону, а также значения удельных потерь мощности и среднегодовые потери энергии на корону в табличном представлении.

Для вычисления емкости фаз ВЛ реализована методика определения рабочей емкости проводов при горизонтальном расположении проводов и двух заземленных трассах.

Для получения характеристик потерь мощности на корону реализован метод наименьших квадратов (МНК) с использованием метода квадратных корней для решения линейных алгебраических уравнений.

Характеристики удельных потерь мощности на корону по напряжению

Одной из особенностей ВЛ СВН являются значительные потери мощности на корону, которые при плохой погоде соизмеримы с нагрузочными потерями и поэтому их неучет приводит к неточности математической модели электроэнергетической системы. В настоящее время имеются различные программы расчета установившихся режимов и оптимизации

сложных электрических сетей. В большинстве из них потери на корону не учитываются, а в других учитываются либо приближенно, путем введения отбора мощности или активных шунтов по концам линий электропередачи, либо зависимостями потерь на корону от напряжения, либо обобщенными характеристиками потерь.

Для расчета потерь на корону от напряжения предложена зависимость вида

$$\Delta P_k = \Delta P_{k0} \left(\frac{U}{U_n} \right)^{\rho}, \quad (4)$$

где ΔP_{k0} – удельные потери на корону при напряжении U_n ; ρ – показатель степени.

Учет потерь на корону в программах ВНИИЭ проводится вводом в схему электрической сети фиктивных узлов с активной нагрузкой, имитирующей потери на корону. Зависимость удельных потерь на корону от напряжения учитывается полиномом до четвертой степени:

$$\begin{aligned} \Delta P_k = a_0 + a_1 \left(\frac{U}{U_n} \right) + a_2 \left(\frac{U}{U_n} \right)^2 + \\ + a_3 \left(\frac{U}{U_n} \right)^3 + a_4 \left(\frac{U}{U_n} \right)^4, \end{aligned} \quad (5)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты полинома.

Учет потерь мощности на корону в программах расчета режимов электрических сетей по обобщенным характеристикам сложен, более прост учет потерь на корону по удельным характеристикам в зависимости от напряжения.

Удельные характеристики потерь мощности на корону от напряжения в виде уравнения известны только для ограниченного числа ВЛ с конкретными конструктивными параметрами, марками проводов и классами напряжений [6, 7], поэтому определенный интерес представляет получение характеристик удельных потерь на корону в зависимости от напряжения для широкого класса ВЛ с учетом всех влияющих факторов.

На линиях высокого напряжения 110–1150 кВ напряженность поля на проводах при нормальном режиме работы линии может достигать 25–30 кВ/см. При достаточно большой напряженности поля у поверхности проводов происходит электрический пробой воздуха. Это явление называется коронным разрядом, или короной.

Проблемы ЭМС [6, 7] давно перестали быть только научными, они приобрели практическую значимость. Обеспечение ЭМС невоз-

можно без контроля выполнения предъявляемых требований, который осуществляется с помощью *средств измерения* (СИ).

При производстве работ вблизи ВЛ и подстанции персонал может подвергаться воздействию комплекса неблагоприятных факторов производственной среды: *электрических* и *магнитных полей* (ЭП и МП) промышленной частоты; связанных с ЭП токов смещения и импульсных токов, имеющих место в момент выравнивания потенциалов тела человека и токопроводящих предметов.

Существенное влияние на персонал могут оказывать коронные разряды, которые генерируют электромагнитное излучение широкополосного спектра частот, озон и окислы азота, слышимый треск и ультразвук.

Экологическое влияние ВЛ

Присутствие короны проявляется в основном тремя способами.

Визуальный коронный – фиолетового цвета свет, исходящий из областей электрического перенапряжения.

Спектр частот излучения, создающего радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частотах выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линии. Источниками помех в этом случае, помимо короны на проводах, служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему [8].

Акустический шум, влияющий на экологическую обстановку на трассе ВЛ СВН, является проявлением звукового эффекта интенсивной короны, особенно при дожде. В настоящее время в практике проектирования линий электропередачи установлен допустимый уровень акустических шумов в плохую погоду на расстоянии 100 м от проводов крайней фазы, соблюдение которого проверяется соответствующими расчетами еще на стадии проектирования. При превышении установленной нормы требуется корректировка параметров проводов фазы и их размещения в пространстве.

При проектировании подстанций СВН определяются маршруты обхода, виды оперативных переключений при производстве ремонтов и других работ; на моделях или по программе на ЭВМ рассчитываются напряженность электрического поля (E) в этих местах и возможная длительность работ.

При $E \leq 5$ кВ/м допускается пребывание в электрическом поле в течение полного рабочего дня.

При $5 < E \leq 20$ кВ/м время пребывания в электрическом поле вычисляется как

$$T_E = \frac{50}{E} - 2, \text{ ч.} \quad (6)$$

При $20 < E \leq 25$ кВ/м время пребывания в электрическом поле не более 10 мин.

При $E \geq 25$ кВ/м пребывание в электрическом поле без средств защиты не допускается.

Нормативная база на радиопомехи и акустические шумы

Радиопомехи возникают при короне на проводах, частичных разрядах и короне на изоляторах и деталях арматуры, искрениях в контактах линейной арматуры [6, 8–10].

Снижению радиопомех от ВЛ и улучшению электромагнитной обстановки вдоль трасс способствует нормирование уровней радиопомех от ВЛ.

В большинстве стран установлены национальные нормы на величины напряженности поля помех, создаваемых воздушными линиями электропередач и высоковольтным оборудованием [7–10].

ЭМС – это способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам.

Для устранения радиопомех в охранной зоне снижается допустимая напряженность на поверхности провода [8]. Коронный разряд на линиях электропередачи создает помехи радио- и телевизионному приему, а также акустический шум. Основная причина радиопомех и шума – стримерная корона на проводах. Наиболее благоприятные условия для возникновения стримерной короны складываются при атмосферных осадках, когда значительно снижается начальная напряженность поля, наиболее сильные радиопомехи и акустический шум возникают при коронировании линий СВН во время дождя и снега. В хорошую погоду помехи возрастают по мере загрязнения проводов. Для решения задач ЭМС ВЛ и радиоприемных устройств различного назначения важное значение имеют реальные уровни напряженности поля помех, создаваемых ВЛ.

Исходной величиной при разработке норм на радиопомехи является гарантированный

уровень защищенного полезного сигнала. В соответствии с международной практикой за минимальную напряженность поля радиосигнала, которую необходимо защищать от помех на частоте 1 МГц, принят уровень 60 дБ, а на частоте 0,5 МГц – 66 дБ.

Корона на проводах является основным источником радиопомех на ВЛ высокого и сверхвысокого напряжения и помех высокочастотным каналам связи. Осадки оказывают сильное влияние на уровень радиопомех и величину потерь на корону, поэтому необходимо иметь сведения о среднегодовой продолжительности следующих основных групп погоды, каждая из которых характеризуется своим средним уровнем потерь: первая группа – хорошая погода (ХП); вторая группа – сухой снег (СС), к которому относятся также снежная крупа, снежные зерна, ледяные иглы, метели, метели с выпадением снега (за исключением низовой метели и поземки, которые не достигают проводов); третья группа – дождь (Д), к которому следует также относить морось и мокрый снег, так как их влияние на потери на корону и на уровень радиопомех близко к влиянию дождя; четвертая группа – изморозь (ИЗ), в которую входят также гололед, замерзший снег и мокрый замерзший снег.

Схема взаимодействия модулей моделирования для оценки влияния коронирования проводов ВЛ на окружающую среду приведена на рисунке 1.

Расчет напряженности электрического поля на поверхности проводов

Основным фактором, определяющим потери на корону и радиопомехи на ВЛ, является отношение напряженности электрического поля на поверхности проводов к начальной напряженности короны. Небольшое изменение этого отношения приводит к существенному изменению потерь на корону и радиопомех. Для ВЛ с одиночными проводами напряженность электрического поля E на поверхности провода определяется по формуле

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (7)$$

где q – линейная плотность заряда на проводе, К/м; r_0 – радиус одиночного провода, см (10^{-2} м); ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха [6].

В расщепленном проводе напряженность поля распределена по поверхности составляю-

щих проводов неравномерно. При этом средняя напряженность E поля на поверхности провода определяется по формуле

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\epsilon_0 n r_0} \text{ кВ/см (} 10^5 \text{ В/м)}, \quad (8)$$

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

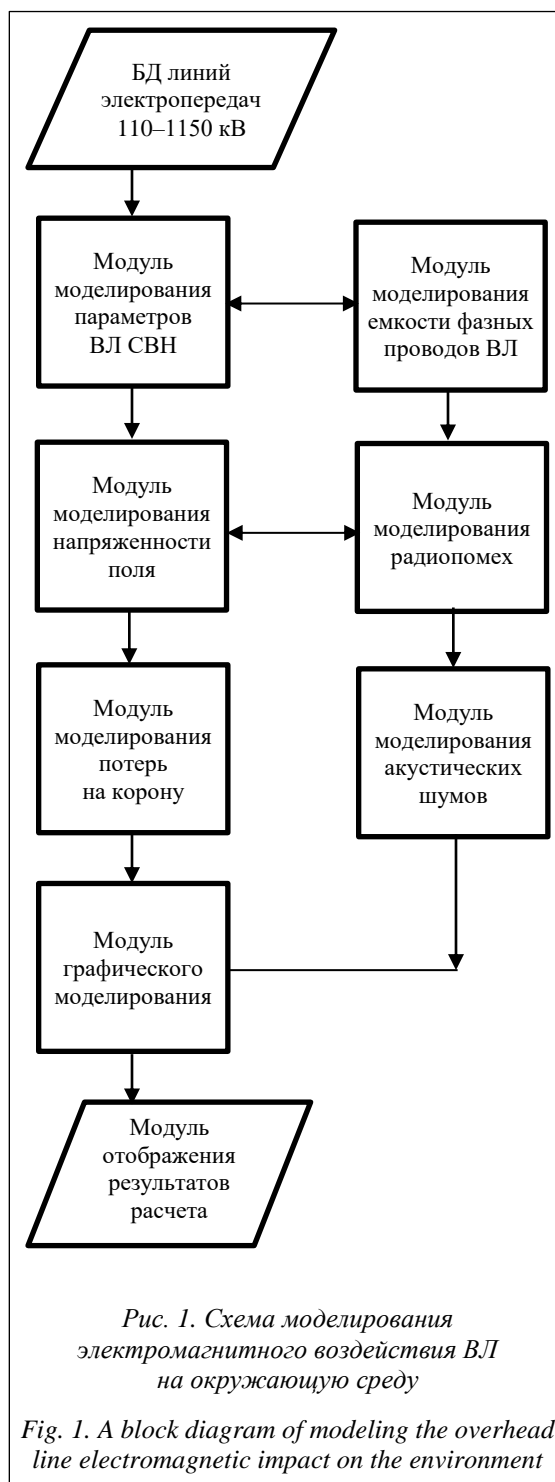


Рис. 1. Схема моделирования электромагнитного воздействия ВЛ на окружающую среду

Fig. 1. A block diagram of modeling the overhead line electromagnetic impact on the environment

Максимальная напряженность для расщепленного провода

$$E_M = k_H E \text{ кВ/см}, \quad (9)$$

где k_H – коэффициент неравномерности распределения заряда по поверхности составляющего провода;

$$k_H = 1 + (n-1) \frac{r_0}{r_p} = 1 + \beta \frac{r_0}{a}, \quad (10)$$

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

Значение β в зависимости от числа составляющих проводов в расщепленном проводе определяется по формуле

$$\beta = 2(n-1) \sin \frac{\pi}{n}. \quad (11)$$

Для расчета напряженностей поля на проводах используется рабочая емкость провода, которая определяется как отношение линейной плотности заряда провода к фазному напряжению ВЛ.

В разработанной программе расчета потерь мощности на корону реализованы алгоритмы вычисления емкости трехфазной ВЛ с произвольным расположением проводов с одним и двумя тросами.

Для трехфазной ВЛ переменного тока с одинаковыми ($n = 1$) и расщепленными проводами

$$E = 0,0147 \frac{C_k U}{nr_0}, \quad (12)$$

где C_k – рабочая емкость k -й фазы ВЛ, пФ/м (10^{-12} Ф/м); U – среднее за год эксплуатационное линейное напряжение вдоль ВЛ, кВ (10^3 В).

При расчетах мощности потерь на корону на расщепленных проводах используется эквивалентная напряженность электрического поля E_Δ , определяемая по формуле

$$E_\Delta = \frac{E + E_M}{2} = \frac{1 + \kappa_H}{2} E. \quad (13)$$

Для унификации расчетов мощности потерь на корону при всех группах погоды введена базисная величина начальной напряженности поля E_0 на поверхности проводов, соответствующая появлению общей короны в условиях хорошей погоды. Величина E_0 вычисляется по формуле

$$E_0 = 24,5m\delta \left(1 + \frac{0,613}{(r_0\delta)^{0,4}} \right), \quad (14)$$

где m – коэффициент негладкости провода; δ – относительная плотность воздуха; r_0 – радиус составляющих расщепленного провода или радиус одиночного провода, см.

Допускаемые уровни радиопомех

Радиопомехи на ВЛ могут возникать как от короны на проводах, так и вследствие частичных разрядов и короны на изоляторах, пробоя или перекрытия дефектных изоляторов, короны на линейной арматуре и распорках проводов расщепленной фазы, а также из-за искрения в плохих контактах линейной арматуры, распорках проводов и между изоляторами. Радиопомехи, создаваемые ВЛ в диапазоне частот от 0.15 до 30 МГц, нормируются на следующих расстояниях от проекции крайнего провода на землю: для ВЛ 110 и 220 кВ – 50 м, для ВЛ 330 кВ и выше – 100 м.

В нормах России приводится частотный спектр допускаемых величин напряженности поля радиопомех от ВЛ (рис. 2).

Зависимость радиопомех от максимальной напряженности электрического поля на поверхности проводов в хорошую погоду при $E_M = 23-30$ кВ/см имеет вид

$$E_n - E'_n = 2,3 \cdot 10^{-5} (E_M - E'_M) \text{ дБ}, \quad (15)$$

где E_n и E'_n – уровни радиопомех при максимальных напряжениях электрического поля на поверхности расщепленного провода соответственно E_M и E'_M , В/м.

Зависимость радиопомех от радиусов проводов (в случае расщепленной фазы от радиусов составляющих проводов) при $E_M = \text{const}$ имеет вид

$$E_n - E'_n = 40 \lg \frac{r_0}{r'_0} \text{ дБ}, \quad (16)$$

где E_n и E'_n – уровни радиопомех при радиусах проводов соответственно r_0 и r'_0 .

Зависимость радиопомех от частоты определяется выражением

$$\Delta_f E_n = 5 [1 - 2(\lg 10f)^2] \text{ дБ}, \quad (17)$$

где f – частота, МГц; $\Delta_f E_n$ – изменение уровня радиопомех относительно уровня радиопомех на частоте 0,5 МГц.

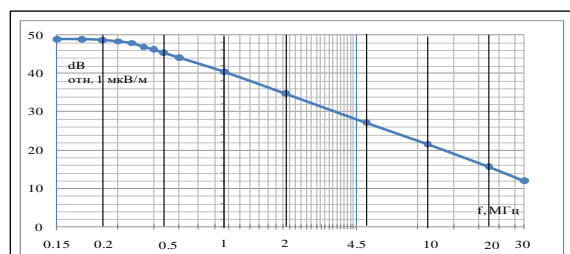


Рис. 2. Допускаемые величины напряженности поля радиопомех от частоты

Fig. 2. Permissible values of the field strength of radio interference from frequency

Уровень радиопомех уменьшается с удалением от ВЛ. На рисунке 3 приведены поперечные профили радиопомех для ВЛ 500.

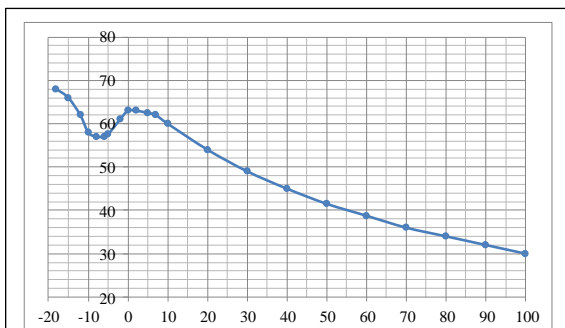


Рис. 3. Поперечные профили радиопомех от ВЛ 500 кВ с проводами 3*АСО-500/40

Fig. 3. Cross profiles of radio interference from 500 kV overhead lines with wires 3*ACO-500/40

Форма поперечного профиля радиопомех определяется из выражения

$$E_n - E'_n = 20 \lg \frac{R^k h^{k-1}}{R_1^k h_1^{k-1}} \text{ дБ}, \quad (18)$$

где E_n и E'_n — уровни радиопомех соответственно на расстояниях R и R_1 от ближайшего крайнего провода ВЛ при высотах подвески его в точках измерения h_1 и h_2 ; k — коэффициент поперечного затухания радиопомех, равный 1,6.

Для расчета распределения уровня радиопомех в течение года выделяются три группы погоды: хорошая погода, дождь и сухой снег. Уровни радиопомех с учетом принятых групп погоды распределяются по закону, близкому к нормальному, со стандартным отклонением σ , равным 4–6 дБ.

В дождь средние уровни радиопомех больше, чем в хорошую погоду, на 10 дБ, а при сухом снеге на 6 дБ. Процент времени в году B , в течение которого уровень радиопомех не превышает допустимой величины $E_n^{\text{доп}}$, определяется по формуле

$$B = 100 \left[\Psi_{\text{ХП}} \Phi^* \left(\frac{E_n^{\text{доп}} - \bar{E}_{\text{П}}^{\text{ХП}}}{\sigma_{\text{ХП}}} \right) + \Psi_{\text{Д}} \Phi^* \left(\frac{E_n^{\text{доп}} - \bar{E}_{\text{П}}^{\text{Д}}}{\sigma_{\text{Д}}} \right) + \Psi_{\text{С}} \Phi^* \left(\frac{E_n^{\text{доп}} - \bar{E}_{\text{П}}^{\text{С}}}{\sigma_{\text{С}}} \right) \right] \bar{E}_{\text{П}}^{\text{Д}} \%, \quad (19)$$

где $\Psi_{\text{ХП}}$, $\Psi_{\text{Д}}$, $\Psi_{\text{С}}$ — относительная продолжительность соответственно хорошей погоды, дождя

и снега в течение года; $\bar{E}_n^{\text{ХП}}$, $\bar{E}_n^{\text{Д}}$, $\bar{E}_n^{\text{С}}$ — средние значения уровней радиопомех на заданном нормируемом расстоянии соответственно в хорошую погоду, дождь и снег; $\sigma_{\text{ХП}}$, $\sigma_{\text{Д}}$, $\sigma_{\text{С}}$ — стандартные отклонения распределения уровней радиопомех соответственно в хорошую погоду, дождь и снег; Φ^* — нормальная функция распределения.

Определение уровней радиопомех от ВЛ производится в следующем порядке: за базисный уровень радиопомех $E_{\text{Пб}}$ принимается среднее значение уровней радиопомех на нормируемом расстоянии, определяемое для ВЛ 500 кВ ($E_{\text{Пб}} = 30$ дБ), максимальная напряженность поля на проводах ВЛ вычисляется согласно [6].

Расчет среднего уровня радиопомех в хорошую погоду на частоте 0,5 МГц на нормированном расстоянии 100 м от ВЛ производится по формуле (дБ)

$$\bar{E}_{\text{П}}^{\text{ХП}} = E_{\text{Пб}} + 2,3 \cdot 10^{-5} (E_{\text{М}} - E_{\text{Мб}}) + 40 \lg \frac{r_0}{r_{0б}} + \frac{H}{300},$$

где напряженность поля $E_{\text{М}}$ берется для средней фазы; величина B вычисляется по формуле (19), где для базисной частоты 0,5 МГц величина $E_n^{\text{доп}} = 45$ дБ;

$$\bar{E}_n^{\text{Д}} = \bar{E}_n^{\text{ХП}} + 10 \text{ дБ}; \quad \bar{E}_n^{\text{С}} = \bar{E}_n^{\text{ХП}} + 6 \text{ дБ}.$$

Величина σ принята равной 5 дБ. Для линий электропередачи с горизонтальным расположением проводов для районов с умеренным климатом расчет допустимых величин максимальной напряженности поля $E_{\text{доп}}$ на поверхности проводов ВЛ по условию допустимого уровня радиопомех производится по формулам:

– для ВЛ 330 и 500 кВ

$$E_{\text{доп}} = 31,1 - 17,4 \lg r_0 \text{ кВ/см } (10^5 \text{ В/м}); \quad (20)$$

– для ВЛ 750 кВ

$$E_{\text{доп}} = 32,2 - 17,4 \lg r_0 \text{ кВ/см } (10^5 \text{ В/м}). \quad (21)$$

Уровень распределенных помех $P_{\text{помф}}$ в любой полосе частот (Δf), отличных от 1 кГц, определяется по формуле

$$P_{\text{помф}} = P_{\text{пом}} + 10 \lg \Delta f \text{ дБ}. \quad (22)$$

Программная реализация расчета потерь мощности на корону по обобщенным характеристикам

Разработана интегрированная система получения характеристик удельных потерь на корону от напряжения на основе аппроксимированных зависимостей [11] методики обобщенных характеристик потерь на корону.

Данная методика реализована в виде программы для ПЭВМ. Программа позволяет при заданной конструкции ВЛ, марке провода, погодных условиях, плотности воздуха, при негладкости провода, плотности тока, высоте над уровнем моря, температуре трассы ВЛ, диапазоне изменения напряжения получить статические характеристики потерь на корону для основных десяти групп погоды и среднегодовые потери на корону, а также значения удельных потерь мощности на корону и среднегодовых потерь энергии на корону в табличном виде. Для вычисления емкости фаз ВЛ реализована методика определения рабочей емкости и напряженностей полей на расщепленных проводах и тросах при их произвольной конфигурации.

Для получения характеристик удельных потерь на корону реализован метод наименьших квадратов – МНК с использованием метода квадратных корней для решения линейных алгебраических уравнений. Для получения характеристик потерь от напряжения задаются диапазон и шаг изменения напряжения. Шаг напряжения и количество точек аппроксимации можно изменить в широких пределах.

По разработанной программе были получены характеристики удельных потерь на корону для равнинных ВЛ 220, 330, 500, 750 и 1150 кВ для средней полосы России и Западной Сибири при $T_{\text{нп}} = 6498$, $T_{\text{сс}} = 1061$, $T_{\text{д}} = 720$, $T_{\text{из}} = 481$ (см. таблицу).

Показатель степени удельных потерь на корону в зависимости от группы погодных условий находится в пределах 4–8. Меньшие значения показателя степени соответствуют погодным условиям с большими интенсивностями атмосферных осадков.

Программа расчета потерь мощности и энергии на корону в ВЛ СВН переменного тока

Данная программа позволяет: определить рабочие емкости фаз, начальные и эквивалентные напряженности электрического поля на проводах, обобщенные характеристики потерь на корону для ВЛ с произвольной конструкцией расщепленных фаз и тросов; получить удельные характеристики потерь на корону в зависимости от напряжения в табличном виде, в виде полинома до четвертой степени и степенной функции для 4 основных и 6 дополнительных групп погодных условий и среднегодовые потери для равнинных и горных ВЛ; определить дополнительную емкость, вызванную коронированием проводов, и допустимую по условиям радиопомех максимальную напряженность электрического поля.

На рисунке (см. <http://www.swsys.ru/uploaded/image/2022-4/2022-4-dop/19.jpg>) показана экранная форма представления данных для промежуточной опоры в разработанном ПО. Экранные формы вывода графиков удель-

Коэффициенты характеристик удельных потерь на корону ВЛ 210-500 кВ

The characteristic coefficients of specific losses to the corona of 210-500 kV overhead lines

Номинальное напряжение, кВ	Марка провода	Хорошая погода		Сухой снег		Дождь		Зернистая изморозь		Среднегодовые потери	
		ΔP_{k0}	ρ	ΔP_{k0}	ρ	ΔP_{k0}	ρ	ΔP_{k0}	ρ	ΔP_{k0}	ρ
330	АСО 600	2.31	7.46	8.38	7.57	24.51	5.19	65.62	4.54	8.36	5.66
	2×АСО 240/40	1.31	7.07	4.72	7.17	15.44	5.69	42.97	4.91	5.18	5.75
	2×АСО 300/40	1.01	6.65	3.64	6.74	12.8	6.14	37.46	5.22	4.3	5.85
	2×АСО 400/40	0.69	5.97	2.46	6.06	8.75	6.64	28.42	5.57	3.09	5.93
	2×АСО 500/40	0.55	5.54	1.94	5.92	6.49	6.84	22.91	5.69	2.43	5.91
500	3×АС 330/40	2.39	6.98	10.97	7.32	33.76	5.5	92.42	4.76	10.98	5.62
	3×АСО 400/40	1.73	6.44	7.73	6.76	26.74	6.11	77.91	5.2	8.7	5.78
	3×АСО 500/40	1.32	5.97	5.75	6.26	20.52	6.51	64.24	5.48	6.89	5.88
750	4×АСО 500/60	5.33	7.12	24.64	7.46	75.09	5.33	202.99	4.65	24.29	5.57
	4×АСО 600/60	3.96	6.64	17.91	6.96	61.51	5.92	175.06	5.07	19.79	5.73
	4×АСО 700/60	2.87	6.09	12.64	6.39	45.72	5.43	140.71	5.43	15.15	5.87
	5×АСО 240/40	3.45	7.05	15.83	7.39	49.3	5.43	134.07	4.71	15.91	5.59
	6×АСО 300/40	1.93	6.2	8.5	6.5	30.63	6.35	92.73	5.37	10.07	5.85

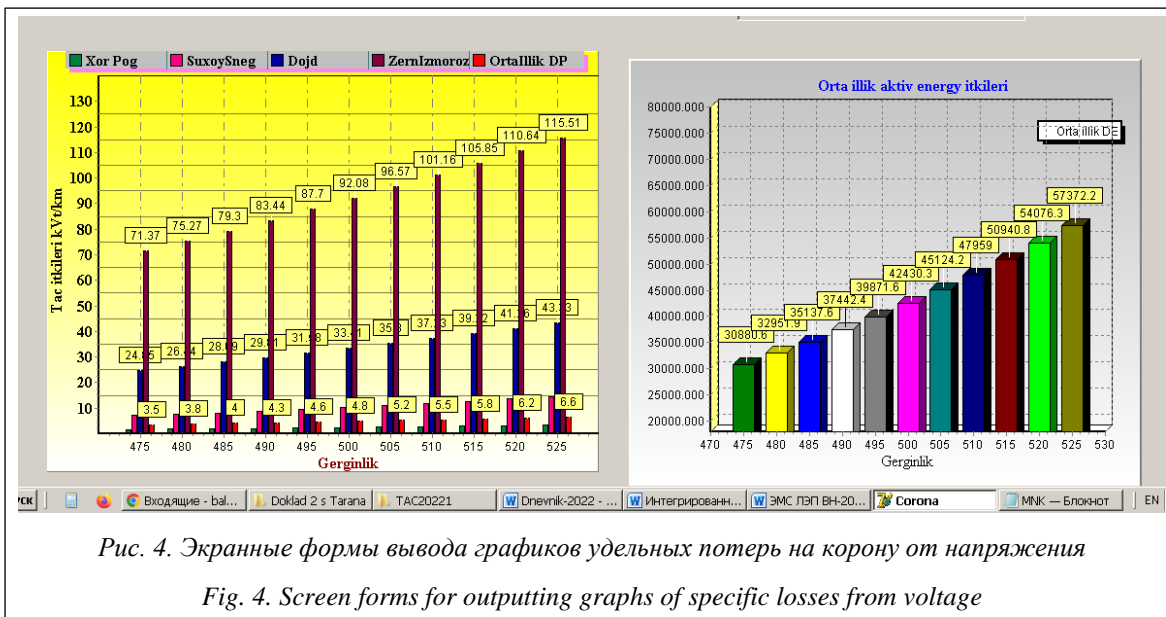


Рис. 4. Экранные формы вывода графиков удельных потерь на корону от напряжения

Fig. 4. Screen forms for outputting graphs of specific losses from voltage

ных потерь на корону от напряжения приведены на рисунке 4.

Форма вывода реактивного эффекта короны от напряжения выглядит следующим образом:

Р.КОР. В/м	ДС Пф/м	ДС в %
10.00	0.01	0.10
20.00	0.03	0.24
30.00	0.05	0.43
40.00	0.08	0.66
50.00	0.11	0.94
60.00	0.16	1.28
70.00	0.20	1.67
80.00	0.26	2.12
90.00	0.32	2.64
100.00	0.39	3.21
110.00	0.47	3.86
120.00	0.56	4.57
130.00	0.65	5.36

Разработана программа расчета потерь мощности и энергии на корону в ЭС с ВЛ СВН в среде программирования DELPHI за расчетный период (месяц, квартал, год).

Заключение

Разработан пакет ПО для оценки электромагнитной совместимости ВЛ при проектировании и анализе состояния действующих линий. Электромагнитная совместимость ВЛ оценивает воздействие высоковольтных линий электропередачи на окружающую среду в отношении радиопомех, акустических шумов, потерь на корону и электромагнитных полей.

Все специфические параметры электромагнитной совместимости ВЛ представлены в одном главном окне, которое содержит элемент управления с несколькими вкладками, обеспечивающий быстрый доступ к таким группам параметров, как радиопомехи, акустический шум, потери на корону, атмосферные условия и состояние поверхности проводника.

Программный комплекс может быть использован для принятия мероприятий, предназначенных для снижения электрического поля ВЛ СВН при проектировании и оценке воздействия действующих линий электропередач на окружающую среду.

Для учета потерь на корону по методике обобщенных характеристик Руководящих указаний в программах расчета режимов электрических сетей удобными являются аппроксимированные выражения графически заданных зависимостей.

Характеристики удельных потерь на корону от напряжения, получаемые по разработанной программе, могут быть использованы в существующих программах расчета электрических сетей без их существенного изменения.

Для аппроксимации характеристик потерь на корону в зависимости от напряжения могут быть использованы степенная функция и полином до четвертой степени. Использование степенной функции наглядно, и погрешность аппроксимации в наихудших случаях не превышает 10 %. Полином третьей степени дает большую точность, чем степенная функция, при применении полинома четвертой степени получается высокая точность.

Литература

1. Александров Г.Н., Ершевич В.В., Крылов С.В. и др. Проектирование линий электропередачи сверхвысокого напряжения. СПб: Энергоатомиздат, 1993. 560 с.
2. Попков В.И. Коронный разряд и линии сверхвысокого напряжения. Избранные труды. М.: Наука, 1990. 256 с.
3. Левитов В.И. Корона переменного тока. М.: Энергия, 1975. 280 с.
4. Александров Г.Н. Коронный разряд на линиях электропередач. М.; Л.: Энергия, 1964. 228 с.
5. Тамазов А.И. Потери на корону в высоковольтных воздушных линиях электропередачи. М.: Спутник+, 2016. 572 с.
6. Руководящие указания по учету потерь на корону и помех от короны при выборе проводов воздушных линий электропередачи переменного тока 330-750 кВ и постоянного тока 800-1500 кВ. М.: ОРГРЭС, 1975. 74 с. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d3b/4294817291.pdf> (дата обращения: 12.09.2022).
7. Баламетов А.Б. Коронирование проводов ВЛ СВН. Моделирование в установившихся режимах. Saarbrücken: LAP Publ., 2013. 310 с.
8. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П. и др. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. М.: Энергоатомиздат, 2003. 758 с.
9. IEEE Standard for safety levels for human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. In: IEEE Std C95.1-2019, 2019, 312 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679.
10. Kladas A., Diamantis A., Damatopoulou T., Dikaiakos C., Papaioannou G., Michos D. Over head transmission lines and high voltage substations electromagnetic field analysis and design considerations for minimizing external impacts. Proc. CIGRÉ Session, 2018, pp. 1–14.
11. Balametov A.B., Isayeva T.M. Monitoring system for electromagnetic compatibility of Power lines. *Ekonoenergetika*, 2022, no. 1, pp. 16–22.

Software & Systems
DOI: 10.15827/0236-235X.140.737-747

Received 02.09.22, Revised 29.09.22
2022, vol. 35, no. 4, pp. 737–747

A software computing suite for simulating effects from coronating wires of overhead AC lines

*A.B. Balametov*¹, *Dr.Sc. (Engineering), Professor, balametov.azniie@gmail.com*
*E.D. Khalilov*¹, *Ph.D. (Engineering), Head of Department, elmanxalilov2010@mail.ru*
*T.M. Isaeva*², *Ph.D. (Engineering), Associate Professor*

¹ *Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Power Engineering Institute, Baku, Az1012, Azerbaijan*

² *Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Az1010, Azerbaijan*

Abstract. Due to the development of electrical networks of high and extra-high voltage and ultra-high voltage, the issues of the environmental impact of high-voltage power lines are becoming relevant. There is an urgent need to develop software for assessing (monitoring) the electromagnetic compatibility of overhead lines. It will make it possible to assess the impact of high voltage AC transmission lines on the environment.

The paper considers mathematical modeling of the influence of overhead line wires, electromagnetic interference, corona discharge, radio interference in wires. It also describes a developed program for calculating power and energy losses due to corona in overhead lines of ultra-high AC voltage. To calculate the capacitance of overhead line phases, there is a method for determining the working capacitance of wires for a horizontal arrangement of wires and two grounded cables.

There is a developed electromagnetic compatibility software to use for taking measures aimed at reducing the electric field of extra-high voltage overhead lines.

The paper gives the example of overhead lines with 500 kV voltage, which presents the results of a complex system for modeling corona losses, electric field voltage and active energy losses due to radio interference.

Keywords: software computing suite, software, complex simulating system, corona simulation, power losses, electromagnetic compatibility, electromagnetic impact.

References

1. Aleksandrov G.N., Ershevich V.V., Krylov S.V. et al. *Design of Power Transmission Lines of Ultra-high Voltage*. St. Petersburg, 1993, 560 p. (in Russ.).
2. Popkov V.I. *Corona Discharge and Ultrahigh Voltage Lines. Selected Works*. Moscow, 1990, 256 p. (in Russ.).
3. Levitov V.I. *AC Crown*. Moscow, 1975, 280 p. (in Russ.).
4. Aleksandrov G.N. *Corona Discharge on Power Lines*. Moscow, 1964, 228 p. (in Russ.).
5. Tamazov A.I. *Corona Losses in High-voltage Overhead Power Lines*. Moscow, 2016, 572 p. (in Russ.).
6. *Guidelines for Accounting for Corona Losses and Interference from Corona when Choosing Wires for Overhead Power Lines of Alternating Current 330-750 kV and Direct Current 800-1500 kV*. Moscow, 1975, 74 p. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/d3b/4294817291.pdf> (accessed September 12, 2022) (in Russ.).
7. Balametov A.B. *Corona Wires VL SVN. Modeling in Steady State*. Saarbruken, LAP Publ., 2013, 310 p. (in Russ.).
8. Dyakov A.F., Maksimov B.K., Borisov R.K., Kuzhekin I.P. et al. *Electromagnetic Compatibility in the Electric Power Industry*. Moscow, 2003, 758 p. (in Russ.).
9. IEEE Standard for safety levels for human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz. In: *IEEE Std C95.1-2019*, 2019, 312 p. DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8859679.
10. Kladas A., Diamantis A., Damatopoulou T., Dikaiakos C., Papaioannou G., Michos D. Over head transmission lines and high voltage substations electromagnetic field analysis and design considerations for minimizing external impacts. *Proc. CIGRÉ Session*, 2018, pp. 1–14.
11. Balametov A.B., Isayeva T.M. Monitoring system for electromagnetic compatibility of Power lines. *Ekoenergetiks*, 2022, no. 1, pp. 16–22.

Для цитирования

Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М. Программно-вычислительный комплекс моделирования эффектов от коронирования проводов воздушных линий переменного тока // Программные продукты и системы. 2022. Т. 35. № 4. С. 737–747. DOI: 10.15827/0236-235X.140.737-747.

For citation

Balametov A.B., Khalilov E.D., Isaeva T.M. A software computing suite for simulating effects from coronating wires of overhead AC lines. *Software & Systems*, 2022, vol. 35, no. 4, pp. 737–747 (in Russ.). DOI: 10.15827/0236-235X.140.737-747.