МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
_____ Т.Ю. Ткачева
«_2_» _11_ 2026 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 13.03.02
Электроэнергетика и электротехника

Курск 2026

УДК 621.31

Составители: В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, В.О. Поданов.

Рецензент:
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроэнергетики и электротехники»
О.М. Ларин.

Электромагнитная совместимость: методические указания к практическим занятиям / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина, В.О. Поданов. – Курск, 2026. – 25 с.: – Библиогр.: с.25.

Содержат сведения по расчетам показателей электромагнитной совместимости в электроэнергетике. Приведены методы определения эффективности действия экранов, применяемых для обеспечения защиты от электромагнитных полей.

Предназначены для направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2.11.26. Формат 60x84 1/16.
Усл.печ.л. 1,45. Уч.–изд.л. 1,31. Тираж 100 экз. Заказ 751
Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г.Курск, ул.50 лет Октября, 94

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Цель работы: *ознакомление со способами описания и основными параметрами периодических помех, формулами для их расчета.*

Помехи можно представить и описать как во временной, так и в частотной области. Однако, обычно не так важно точное описание формы помехи, как ее точные параметры, от которых зависит ее мешающее воздействие. Для периодических помех такими являются: частота f и амплитуда X_{max}. Эти параметры определяют амплитуду напряжения помехи во вторичных контурах U_{max}.

Для непериодических помех важнейшими параметрами являются следующие: - скорость изменения Δx / Δt (скорость нарастания или спада). Данная величина определяет максимальное напряжение помехи Usmax, вызванной во вторичной цепи; - интервал времени Δt, в течение которого помеха x имеет максимальную скорость изменения амплитуды; этот интервал идентичен длительности действия напряжения помехи us во вторичной цепи;

- максимальное значение изменения амплитуды Δx , пропорциональное интегралу напряжения помехи вторичной цепи по времени (площади импульса помехи).

Для взаимосвязанного представления этих величин с точки зрения электромагнитной совместимости используют при периодических помехах амплитудный спектр, а для импульсных помех – т.н. спектр амплитудной плотности. Оба этих представления обеспечивают:

- оценку воздействия помехи на систему; - расчет воздействий, обусловленных заданной связью;

- выбор параметров средств подавления помех, например фильтров;

- определение граничных областей, например, максимального возможного или допустимого излучения помех или охарактеризовать границы помехоустойчивости; -получение представлений о воздействии при испытаниях согласно нормам

электромагнитной совместимости, т.е. о параметрах генераторов, применяемых при испытаниях.

Электромагнитные влияния могут рассматриваться как во временной, так и в частотной области. Однако поскольку передаточные свойства путей связи и средств помехоподавления удобнее представлять в частотной области, такое представление чаще всего предпочитают и для помех. Пересчет периодических процессов из временной области в частотную выполняют при помощи ряда Фурье, пересчет однократных импульсных процессов - при помощи интеграла Фурье.

Синусоидальные или косинусоидальные помехи (гармонические процессы) могут быть представлены как во временной, так и в частотной областях непосредственно. В частотной области помеха характеризуется угловой частотой ω и частотой колебаний $f = \omega/2\pi$. Несинусоидальные периодические функции - например, пи- лообразной или прямоугольной формы импульсы напряжения или тока выпрямителей которые, в некоторых случаях, возможно описать аналитически, - могут быть представлены в частотной области как26 бесконечная сумма синусоидальных и косинусоидальных колебаний, т. е. рядом Фурье.

Аналитически ряд Фурье любой функции времени может быть представлен в различных формах:

Так как синусоидальные колебания с соответствующим фазовым сдвигом могут быть представлены и как косинусоидальные, например sin(90±α) = cosα, вместо нормальной формы часто применяют амплитудно-фазовую форму.

Для системы функций (70) ряд Фурье может быть записан в виде

$$f(t) \approx \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nt + b_n \sin nt, \qquad (1)$$

где коэффициенты a_n и b_n рассчитываются по формулам:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t)dt, \qquad (2)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(t) \cos ntdt, \qquad (3)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(t)\sin ntdt. \qquad (4)$$

Функция $f(t)$ должна быть задана на отрезке $(-\pi, \pi]$.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами непериодических помех.
2. Изучить формулы для их расчета.
3. По заданным данным определить значения параметров непериодического сигнала помехи.
4. Повторить п.3 для других, заданных преподавателем непериодического сигналов помех.

Контрольные вопросы

1. Основные источники непериодических помех.
2. Основные способы определения параметров непериодических сигналов.
3. Можно ли представить непериодический сигнал сложением синусоидальных или косинусоидальных колебаний?
4. От какой периодической функции не сходится интеграл Фурье?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

СПОСОБЫ ОПИСАНИЯ И ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ НЕПЕРИОДИЧЕСКИХ ПОМЕХ

Цель работы: *ознакомление со способами описания и основными параметрами непериодических помех, формулами для их расчета .*

Краткие методические указания

Ряд Фурье допускает представление в частотной области только периодических функций времени. Однако часто имеют дело с непериодическими функциями, характерными, например, для коммутационных процессов, молнии или разрядов статического электричества и т. д.

Комплексный ряд Фурье для периодических функций (пределы интегрирования $-T/2$ и $+T/2$) определяется по следующей формуле:

$$u(t)_{пер} = \sum_{-\infty}^{+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}. \qquad (1)$$

Так как в линейчатом спектре ряда Фурье расстояние между спектральными линиями соответствует:

$$\Delta f = \Delta\omega/2\pi = f_1 = 1/T, \qquad (2)$$

можно также записать

$$u(t)_{пер} = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\infty}^{+\infty} \left[\Delta\omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}. \qquad (3)$$

При $T \to \infty$, т. е. при $\Delta f \to \infty$ конечное расстояние между спектральными линиями $\Delta\omega$ за знаком суммы переходит в бесконечно малое расстояние $d\omega$, дискретная переменная $n\Delta\omega$ – в непрерывную переменную ω, а сумма – в интеграл. Откуда, получают интеграл Фурье для непериодической функции $u(t)_{непер}$:

$$u(t)_{непер} = \lim_{\substack{T\to\infty \\ \Delta f\to 0}} u(t)_{пер} = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t}dt\right)e^{j\omega t}d\omega, \qquad (4)$$

где $\dot{X}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)e^{-j\omega t}dt$ – преобразование Фурье, спектральная функция, или спектральная плотность $u(t)$.

Для непериодической функции $u(t)$ преобразование Фурье имеет вид

$$u(t) = \frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty} \dot{X}(\omega)e^{j\omega t}d\omega. \qquad (5)$$

Очевидно, непериодические процессы тоже могут быть представлены как наложение синусоидальных или косинусоидальных колебаний. Однако в отличие от периодических процессов здесь участвуют все частоты от – ∞ до + ∞ с амплитудами $\dot{X}(\omega)df$. Так как при однократных процессах содержащаяся в одном импульсе конечная энергия распределяется на бесконечное множество частот, то амплитуда отдельной спектральной составляющей должна быть бесконечно малой.

Чтобы избежать этой неопределенности, относят энергию импульса к частоте и получают таким образом спектральную плотность, предельное значение которой при $\Delta f \to 0$ остается конечным и как раз соответствует преобразованию Фурье. Преобразование Фурье абсолютно монохроматического синусоидального колебания обладает бесконечно большой плотностью распределения амплитуд гармоник, потому что энергия сигнала распределяется на единственную частоту с шириной линии Δf=0 (импульсы Дирака). Аналитически это выражается в том, что интеграл Фурье от функции синуса не сходится, что подтверждает соответствие анализа физическим процессам.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами непериодических помех.

2. Изучить формулы для их расчета.

3. По заданным данным определить значения параметров непериодического сигнала помехи.

4. Повторить п.3 для других, заданных преподавателем непериодического сигналов помех.

Контрольные вопросы

1. Основные источники непериодических помех.

2. Основные способы определения параметров непериодических сигналов.

3. Можно ли представить непериодический сигнал сложением синусоидальных или косинусоидальных колебаний?

4. От какой периодической функции не сходится интеграл Фурье?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛИНИИ НА УРОВНЕ ЗЕМЛИ

Цель работы: *ознакомление со основными факторами, определяющими напряженность электрического поля высоковольтных линий, формулами для расчета напряженности поля.*

Краткие методические указания

Важным показателем, определяющим степень влияния на биологические объекты, является напряженность электрического поля на уровне земли.

Рассмотрим расчет электрического поля линии, в которой высота подвеса проводов средней фазы может отличаться от высоты подвеса крайних фаз, принятой одинаковой. Принимаем, что три фазы линии передачи имеют один и тот же эквивалентный радиус $r_э$, с расстоянием между крайними фазами $2D$ и с высотой подвеса геометрических центров крайних фаз, равной H. Высота подвеса средней фазы с центром, расположенным на линии, делящей отрезок $2D$ на равные части, отличается от H на величину ΔH.

Заряды на единицу длины линии фаз обозначим через $\tau 1, \tau 2$ и $\tau 3$, а в зеркальных отображениях $-\tau 1$,$-\tau 2$ и $-\tau 3$, причем предполагается, что сумма зарядов всех фаз равна нулю.

Вертикальная компонента напряженности на уровне земли на расстояниях x, отсчитываемого от прямой линии, соединяющей оси с линейной плотностью зарядов $\tau 1$ и $-\tau 1$, равна:

$$-E_n = \frac{\tau_1}{\pi\varepsilon_0}\frac{H}{H^2+x^2} + \frac{\tau_2}{\pi\varepsilon_0}\frac{H+\Delta H}{(H+\Delta H)^2+(D+x)^2} + \frac{\tau_3}{\pi\varepsilon_0}\frac{H}{H^2+(2D+x)^2}. \quad (1)$$

Для использования формулы (1) надо выразить неизвестные плотности зарядов τ_1 и τ_3 через междуфазные напряжения u_{12} и u_{23}. Напряжения u_{12} и u_{23} определяются как линейные интегралы напряженности электрического поля вдоль путей, соединяющих

центры фаз 1,2 и 2,3. В результате интегрирования получается выражение для u_{12}:

$$u_{12}\pi\varepsilon_0 = \tau_1 \ln\frac{\sqrt{(\Delta H)^2 + D^2}\,2\sqrt{H(H+\Delta H)}}{r_э\sqrt{(2H+\Delta H)^2 + D^2}} + 0{,}5\tau_3 \ln\frac{\left[(\Delta H)^2 + D^2\right]2(H+\Delta H)\sqrt{H^2+D^2}}{Dr_э\left[(2H+\Delta H)^2 + D^2\right]}. \quad (2)$$

Обозначаем натуральный логарифм при τ_1 в (2) через F, а при τ_3 с учетом множителя 0,5 через G. Тогда с введенными обозначениями результат интегрирования для u_{23} запишется в виде:

$$- u_{23}\pi\varepsilon_0 = \tau_3 F + \tau_1 G\,. \quad (3)$$

Таким образом, для нахождения неизвестных τ_1 и τ_3 имеем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \tau_1 F + \tau_3 G = \pi\varepsilon_0 u_{12} \\ \tau_1 G + \tau_3 F = -\pi\varepsilon_0 u_{23} \end{cases} \quad (4)$$

Решив систему уравнений (4), получаем плотности зарядов τ_1 и τ_3, после чего по формуле (1) находим напряженность электрического поля.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами высоковольтных линий, влияющих на напряженность электрического поля.
2. Изучить формулы для расчета напряженности электрического поля .
3. По заданным данным определить значения напряженности электрического поля под проводами линии на уровне земли.
4. Повторить п.3 для других точек на уровне земли.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит влияние высоковольтных линий на окружающую среду.
2. Основные способы определения напряженности электрического поля.
3. От чего зависит напряженность электрического поля?
4. Какие допустимые значения напряженности электрического поля?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 4

ИНДУКТИРОВАННЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ОТ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

Цель работы: *ознакомление со основными факторами, определяющими значения индуктированных напряжений от воздушных линий, формулами для расчета допустимости влияния воздушных линий на линии связи* .

Краткие методические указания

При оценке индуктированных напряжений от воздушных линий (ВЛ) электропередач будем пользоваться следующим выражением для взаимного сопротивления прямолинейных проводов на единицу длины [Ом/км]:

$$Z_{m1} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{\sqrt{2}b_g}{\rho_1} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3}\frac{h_1 + h_н}{b_g}(1+j) - 0{,}0772\right], \qquad (1)$$

где h_1 и $h_н$ -высота расположения провода ВЛ и предполагаемой линии,

b_g - эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны в грунт, равная:

$$b_g = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\sigma_g}}\ , \qquad (2)$$

где ω - круговая частота;

μ_0 - магнитная постоянная;

σ_g - удельная проводимость грунта;

ρ_1 - расстояние от оси провода ВЛ до оси предполагаемой линии, равное:

$$\rho_1 = \sqrt{(h_1 - h_н)^2 + y_н^2}\ . \qquad (3)$$

Формулу (1) применяют в том случае, когда все расстояния значительно меньше b_g.

Если можно пренебречь высотой расположения над землей ($h_1 \approx h_н$), то расчетное выражение (1) упрощается:

$$Z_{m1} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{\sqrt{2}b_g}{y} - j\frac{\pi}{4} - 0{,}0772\right], \qquad (4)$$

где $y = y_н$.

При $h_1 = h_н = h$ и $y_н = y = r_{ins}$ из (1) получается собственное сопротивление провода с радиусом по изоляции, равным r_{ins} в виде

$$Z_e = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{\sqrt{2}b_g}{r_{ins}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} + \frac{2h}{b_g}(1+j) - 0{,}0772\right], \qquad (5)$$

из которого при $h = 0$ находится собственное сопротивление для частного случая расположения провода на уровне земли.

Если прямолинейный проводник с радиусом r_{ins} по изоляции располагается бы внутри грунта (земли) на расстоянии h от поверхности, то для определения в этом случае третий член в выражении (3) следует взять со знаком минус.

Таким образом, общее выражение для собственного сопротивления во всех трех случаях можно представить в виде:

$$Z_e = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{\sqrt{2}b_g}{r_{ins}} - j\frac{\pi}{4} \pm \frac{2}{3}\frac{2h}{b_g}(1+j) - 0{,}0772\right]. \qquad (6)$$

Требование по ограничению при токе короткого замыкания на землю $I = 4000$ А фактически означает, что продольная ЭДС в линии связи на длине 1 км не должна превосходить 12 В.

Нахождение допустимого расстояния между ВЛ и линиями связи (ЛС) при проведении изыскательных работ для трассы ВЛ с влияющим действующим значением тока несимметричного короткого замыкания до 4000 А вытекает из требования, чтобы взаимное сопротивление Z_m на участке сближения не превосходило 0,003 Ом/км.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами высоковольтных линий, влияющих на индуктированные напряжения.

2. Изучить формулы для расчета допустимости сближения линий связи и высоковольтных линий.

3. По заданным данным определить значения допустимости сближения линий связи и высоковольтных линий.

4. Повторить п.3 для других данных.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит влияние высоковольтных линий на линии связи.

2. Основные способы определения допустимости влияния высоковольтных линий на линии связи..

3. От чего зависит влияние высоковольтных линий на линии связи?

4. Какие допустимые значения сближения линий связи и высоковольтных линий?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 5

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ

Цель работы: *ознакомление со основными факторами, определяющими напряженность магнитного поля воздушных линий, формулами для расчета напряженности поля.*

Краткие методические указания

Расчет напряженности магнитных полей под воздушными линиями высокого напряжения можно производить, применяя два альтернативных метода: аналитический и численный.

Основное преимущество аналитического метода – его простота. Однако, на точность результатов расчета с помощью аналитического метода могут существенно влиять допущения, принятые при его разработке. В качестве альтернативы аналитическим методам выступают разнообразные численные методы расчета, в частности, получивший в последнее время широкое распространение метод конечных элементов.

При современном развитии вычислительной техники точность расчета магнитного поля методом конечных элементов очень высока. Главным же недостатком численных методов является их трудоемкость.

Для расчета магнитного поля под воздушными линиями высокого напряжения обычно принимают следующие допущения:

1) распределение тока в проводах принято асесимметричным, то есть не учитывается эффект близости за счет соседних фазных проводов и составляющих в расщепленной фазе;

2) не учитываются поперечные проводимости и смещения в земле.

При принятых допущениях, правомочность которых была достаточно убедительно доказана многочисленными исследованиями, напряженность магнитного поля, инициируемого током в i-м проводе, может быть определена с помощью простейшего выражения:

$$H = \frac{I_i}{2\pi\sqrt{(h_i - y)^2 + x_i^2}}, \qquad (1)$$

где h_i - высота подвеса провода над землей;

y и x_i - высота над землей и расстояние от оси линии точки наблюдения.

Составляющие напряженности магнитного поля по осям x и y определятся в свою очередь как:

$$H_{ix} = H_i \cos\varphi_i \,, \qquad (2)$$

$$H_{iy} = H_i \sin\varphi_i \,, \qquad (3)$$

$$\text{tg}\ \varphi_i = (h_i - y)/x_i \,. \qquad (4)$$

Для многопроводной ВЛ модуль напряженности магнитного поля в точке с координатами x и y можно найти следующим образом:

$$H\,(\text{x, y, t}) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{n} H_{ix}(t)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{n} H_{iy}(t)\right)^2} \,. \qquad (5)$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами высоковольтных линий, влияющих на напряженность магнитного поля.
2. Изучить формулы для расчета напряженности магнитного поля.
3. По заданным данным определить значения допустимости напряженности магнитного поля воздушных линий.
4. Повторить п.3 для других данных.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит влияние магнитного поля высоковольтных воздушных линий на окружающую среду.
2. Основные способы определения допустимости влияния магнитного поля высоковольтных воздушных линий на окружающую среду.
3. От чего зависит напряженность магнитного поля высоковольтных линий?
4. Какие допустимые значения напряженности магнитного поля высоковольтных линий?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 6

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ И ПОДВОДНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Цель работы: *ознакомление с основными факторами, определяющими электромагнитную совместимость подземных и подводных линий электропередачи с окружающей средой, формулами для расчета показателей совместимости.*

Краткие методические указания

В настоящее время находят широкое применение кабели с пластмассовой изоляцией, у которых отсутствует, броня и поверх экранов накладывается оболочка из поливинилхлоридного пластика. Разумеется, в таких кабелях имеются два источника тепла: жилы, по которым течет рабочий ток, и токи в экранах.

Если первый источник диктуется основным назначением кабеля, то второй, наоборот, ухудшает тепловой баланс кабеля и вызывает нагрев окружающей почвы. Последний процесс может привести, например, к снижению урожайности. Здесь наибольшее значение имеет ток в экранах, который в значительной степени зависит от конструкции кабеля.

Токи в экранах кабелей с пластмассовой изоляцией $I_{ЭА}$, $I_{ЭВ}$ и $I_{ЭС}$ вызывают потери $P_{доп}$, равные:

$$P_{доп} = P_{Э} = (I_{ЭА}^2 + I_{ЭВ}^2 + I_{ЭС}^2) \cdot R_{Э}, \qquad (1)$$

где $R_э$ – погонное активное сопротивление экрана.

По аналогичной формуле рассчитываются потери в токоведущих жилах кабеля $P_ж$.

В изоляции кабелей возникают потери $P_д$, определяемые по следующей формуле:

$$P_{д} = U_{ф}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot tg\delta, \qquad (2)$$

Где $U_ф$ – фазное напряжение кабельной линии;

ω – угловая частота;

C – емкость между жилой и экраном;

tgδ – тангенс угла диэлектрических потерь в диэлектрике между жилой и экраном.

Уравнение теплового баланса кабеля имеет следующий вид:

$$T_{ж} - T_{о} = P_{ж}(R_{из} + R_{об} + R_0) + P_{д}(R_{из}/2 + R_{об} + R_0) + P_{э}(R_{об} + R_0), \quad (3)$$

где $T_{ж}$ – температура жилы кабеля;

$T_{о}$ – температура окружающей среды;

$R_{из}$ – термическое сопротивление изоляции;

$R_{об}$ – термическое сопротивление оболочки;

$R_{о}$ – термическое сопротивление грунта.

Термическое сопротивление изоляции определяется как:

$$R_{из} = \frac{\rho_{из}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1}, \quad (4)$$

где $\rho_{из}$ – удельное термическое сопротивление изоляции, для полиэтилена $\rho_{из}$ = 3,5 К·м/Вт, для ПВХ-пластификата $\rho_{из}$ = 5,5 К·м/Вт,

r_2 – радиус экрана;

r_1 – радиус жилы кабеля.

Термическое сопротивление грунта определяется как:

$$R_{о} = \frac{\rho_{оз} \ln\left(\frac{d/r_4 + \sqrt{(d/r_4)^2 - 1}}{d/r_4 - \sqrt{(d/r_4)^2 - 1}} \right)}{2\pi}, \quad (5)$$

где d – расстояние от оси кабеля до поверхности земли;

r_4 – внешний радиус кабеля;

$\rho_{из}$ – удельное термическое сопротивление грунта.

Используя уравнение теплового баланса кабеля, можно решать прямую или обратную задачи:

1. При заданном токе в жиле и температуре окружающей среды T_0 определяем температуру жилы.

2. при заданной температуре $T_{ж}$ определяем T_0 и сравниваем ее с допустимой для района расположения кабельной линии (с точки зрения эскалации тепла и эрозии почвы) .

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами высоковольтных кабельных линий, прокладываемых под землей и под водой.

2. Изучить формулы для расчета теплового баланса высоковольтных кабельных линий, прокладываемых под землей и под водой.

3. По заданным данным определить значения допустимости эксплуатации высоковольтных кабельных линий, прокладываемых под землей и под водой.

4. Повторить п.3 для других данных.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит влияние высоковольтных кабельных линий на окружающую среду.

2. Основные способы определения допустимости влияния высоковольтных кабельных линий на окружающую среду.

3. От чего зависит температура жил высоковольтных кабельных линий?

4. Какие допустимые значения температуры жил высоковольтных кабельных линий?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7

ВЛИЯНИЕ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Цель работы: *ознакомление со основными факторами, определяющими напряженность магнитного поля воздушных линий, формулами для расчета напряженности поля.*

Краткие методические указания

Короной называется один из видов самостоятельного разряда в воздухе, возникающий на электродах малого радиуса при некотором значении напряженности электрического поля на них. Внешними проявлениями коронного разряда на проводах ВЛ являются характерное потрескивание и свечение в отдельных местах на поверхности проводов. Корона на проводах является основным источником радиопомех на ВЛ высокого и сверхвысокого напряжений и помех высокочастотным каналам связи. Корона приводит также к дополнительным потерям электроэнергии на ВЛ.

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. Поэтому напряженность поля следует вычислять с погрешностью не более 1%.

Для ВЛ с одиночными проводами напряженность E электрического поля на поверхности провода определяется по формуле:

$$E = \frac{q \cdot 10^{-3}}{2\pi\varepsilon_0 r_0}, \qquad (1)$$

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

r_0 - радиус одиночного провода, см;

ε_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха.

Для трехфазной ВЛ переменного тока с одиночными (n = 1) и расщепленными проводами напряженность E электрического поля на поверхности провода определяется по формуле:

$$E = 0{,}0147\frac{Cк \cdot U}{nr_0}, \qquad (2)$$

где $C_к$ - рабочая емкость к-й фазы линии ВЛ, пФ/м;

ε_0 - диэлектрическая проницаемость воздуха.

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.

Уровень радиопомех от ВЛ зависит от величины максимальной напряженности поля на поверхности проводов, радиусов проводов, частоты, на которой производятся измерения радиопомех, и высоты ВЛ над уровнем моря.

Средний (по всем погодным условиям) уровень помех P_f в дБ от короны в полосе 1 кГц на частоте f в трактах с присоединением фаза-земля и фаза-фаза к нетранспонированным ВЛ 220-750 кВ с горизонтальным расположением проводов, с прохождением трассы ВЛ на высоте до 300 м над уровнем моря определяется по формуле:

$$P_f = A + \Gamma + 10\lg(1/(k_4 + \alpha_f)), \qquad (3)$$

$$\Gamma = -67 + 2{,}3E + 40\lg r_{пр}, \qquad (4)$$

где A - коэффициент, зависящий от схемы присоединения к ВЛ, определяется по справочным таблицам, дБм;

Г - генерация помех, дБм;

k_4 - коэффициент, значение которого определяется по справочным таблицам;

α_f - коэффициент затухания на частоте f.

Акустический шум возникает главным образом в плохую погоду, когда усиливается интенсивность коронирования проводов. Звуковой эффект при этом имеет две составляющие: 1) шипение, соответствующее частоте 100 Гц и кратным ей частотам; 2) широкополосный шум.

Первая составляющая обусловлена движением объемного заряда у проводов, что дважды за период создает волны звукового давления. Вторая генерируется стримерной короной.

Особенно интенсивный шум от короны возникает при сильном дожде, однако такой дождь сам создает шум, превышающий по громкости возможные акустические помехи от линии электропередачи. Поэтому более существенны помехи при моросящем дожде, в туман, при мокрых проводах после сильного дождя. Уровень громкости в этих случаях на 5 - 6 дБ ниже, чем в сильный дождь, но значительно превышает общий звуковой фон. Оценка акустического шума делается по условиям «влажных» проводов.

Для оценки уровня громкости A [дБ] при дожде может быть использована эмпирическая формула:

$$A = 16 + 1{,}14E_{max} + 9r + 15lg\ n - 10lg\ l\ , \qquad (5)$$

где r - радиус провода, см;

E_{max} - максимальная напряженность поля на поверхности проводов, кВ/см;

n - число проводов в расщепленной фазе;

l - расстояние от крайней фазы, м.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами высоковольтных линий, влияющих на индуктированные напряжения.
2. Изучить формулы для расчета допустимости сближения линий связи и высоковольтных линий.
3. По заданным данным определить значения допустимости сближения линий связи и высоковольтных линий.
4. Повторить п.3 для других данных.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит влияние высоковольтных линий на линии связи.
2. Основные способы определения допустимости влияния высоковольтных линий на линии связи..
3. От чего зависит влияние высоковольтных линий на линии связи?
4. Какие допустимые значения сближения линий связи и высоковольтных линий?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКРАНОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

Цель работы: *ознакомление со основными факторами, определяющими эффективность действия экранов, формулами для расчета поглощения электромагнитных полей в экранах* .

Краткие методические указания

Задача экранирования – ослабление электрических, магнитных и электромагнитных полей в тех областях пространства, где их появление может иметь нежелательные последствия. Для аппаратуры автоматики, обработки информации и связи актуальной задачей является экранирование ее электрических схем от внешних электромагнитных полей, возникающих при работе электроэнергетических установок, радиопередающих устройств или при грозовых разрядах.

Экран в простейшем виде представляет собой металлический лист, устанавливаемый между источником поля и защищаемым устройством. Электрическая компонента поля наводит на поверхности экрана заряды, поле которых компенсирует за экраном внешнее поле, а магнитная составляющая индуцирует в теле экрана токи, магнитное поле которых также направлено навстречу внешнему полю. На эффективность экранирования влияют: конфигурация и размеры экрана, его электропроводность и магнитная проницаемость, а также частота или скорость изменения поля.

Количественно эффективность экрана оценивается коэффициентом экранирования *S*. Это отношение амплитуды напряженности поля в определенной точке защищаемого пространства при наличии экрана к амплитуде этого поля в той же точке при отсутствии экрана.

Основной характеристикой среды, в которой распространяется электромагнитная волна, является волновое сопротивление среды:

$$Z_B = E/H\,, \qquad (1)$$

где E - напряженность электрического поля;

H - напряженность магнитного поля.

Для плоской электромагнитной волны, движущейся вдали от источника излучения, эту величину можно рассчитать по следующей формуле:

$$Z = \sqrt{j\omega\mu/(\sigma + j\omega\varepsilon)}, \qquad (2)$$

где ω – угловая частота поля;

μ и ε – магнитная и диэлектрическая проницаемости среды;

σ – удельная проводимость среды.

Для воздуха можно пренебречь проводимостью σ. Для металла экрана, наоборот, допустимо пренебречь членом $j\omega\varepsilon$, тогда:

$$Z = \sqrt{j\omega\mu/\sigma}. \qquad (3)$$

Отражение от первой поверхности плоского экрана, размеры которого велики по сравнению с длиной волны, дает затухание:

$$A_{\text{отр}} = 20\lg(Z_B/(4Z_{\text{э}})),$$

где $Z_{\text{э}}$ – сопротивление экрана.

Потери на поглощение в металле проводника при толщине экрана d дают затухание:

$$A_{погл} = 6{,}16d\sqrt{\omega\mu_{\text{э}}\sigma}, \qquad (4)$$

где $\mu_{\text{э}}$ – магнитная проницаемость металла экрана.

Потери на отражения внутри экрана (от его внутренних поверхностей) можно оценить по формуле

$$A_{внут} = 20\lg(1 - e^{(-2d/\delta)}), \qquad (5)$$

где δ – глубина проникновения, определяемая как расстояние, которое должна пройти электромагнитная волна в металле, чтобы ослабнуть в е раз. Она определяется как:

$$\delta = \sqrt{2/\omega\mu_0\sigma}. \qquad (6)$$

Суммарное затухание поля после прохождения сквозь экран определится суммированием затуханий от всех видов потерь:

$$A = A_{\text{отр}} + A_{\text{погл}} + A_{\text{внутр}}\,. \qquad (7)$$

Хотя электрические и магнитные поля отражаются от внешней и от внутренней поверхностей экрана по-разному, суммарный

эффект после прохождения сквозь экран одинаков для обоих полей. При этом наибольшее отражение имеет место для электрического поля на внешней, а для магнитного – на внутренней поверхности экрана.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с основными параметрами экранов, влияющих на их эффективность.
2. Изучить формулы для расчета поглощения электромагнитных волн в экранах.
3. По заданным данным определить значения поглощения электромагнитных волн в экранах.
4. Повторить п.3 для других данных.

Контрольные вопросы

1. Какова задача экранирования?
2. Чему равен коэффициент экранирования?
3. Чему равен коэффициент затухания поля?
4. Чему равно суммарное затухание поля после прохождения сквозь экран?
5. Как зависит эффективность экранирования от частоты внешнего электрического поля?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические указания по определению электромагнитной обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. Стандарт организации СО 34.35.311-2004, РАО “ЕЭС”, М., 2004.
2. Кадомская К. П., Кандаков С. А., Лавров Ю. А., Шевченко С.С. Электромагнитная совместимость воздушных, подземных и подводных линий электропередачи высокого напряжения с биосферой и окружающей средой. Учебное пособие. – Новосибирск.: Издательство НГТУ, 2007. - 150 с.
3. Электромагнитная совместимость электрооборудования электроэнергетики и транспорта [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.Н. Яковлев, В.И. Пантелеев, В.П. Суров; под общ. ред. В.Н. Яковлева. - М. : Издательский дом МЭИ, 2010. - 588 с.
4. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике [Электронный ресурс] : учебник для вузов / А.Ф. Дьяков, И.П. Кужекин, Б.К. Максимов, А.Г. Темников ; под ред. чл.-корр. РАН, докт. техн. наук, проф. А.Ф. Дьякова. - М. : Издательский дом МЭИ, 2016. - 455 с.