

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Г.Н. Цицкиян

Электромагнитная совместимость в электроэнергетике

Учебное пособие

Санкт-Петербург

2006

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК621.311:621.391.8

Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: Учебное пособие. -СПб.: Изд-во СЗТУ,2006,-59с.

Учебное пособие разработано в соответствии с требованиями государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования. Учебное пособие предназначено для студентов 5 курса, изучающих дисциплину «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» по специальности 140211.65-электроснабжение и по направлению подготовки бакалавров 140200-«Электроэнергетика».

В учебном пособии изложены основные сведения по классификации электромагнитных помех, характерных для систем электроснабжения промышленных предприятий. Рассмотрены методы расчета электрических полей и индуктированных напряжений, создаваемых зарядами и токами высоковольтных линий электропередач. Даны примеры возникновения кондуктивных помех, воздействующих на линии связи. Подробно описан механизм возникновения колебательного изменения напряжения в точке общего присоединения при подключении емкостной нагрузки.

Рецензенты: А.Г. Микеров, д-р техн. наук, проф. кафедры САУ Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета;
А.Н. Горский, д-р техн. наук, проф. кафедры ТОЭ Петербургского государственного университета путей сообщения.

© Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2006

© Цицикян Г.Н., 2006

Введение

В настоящее время наблюдается значительное повышение интереса как к теоретическим, так и к практическим проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС). Это относится не только к радиоэлектронике и связи, где вопросам ЭМС всегда уделялось пристальное внимание, но и к электротехнике и электроэнергетике, включая вопросы электроснабжения, причем последние не только во взаимосвязи с ЭМС технических средств (ТС), но и с электромагнитной безопасностью человека и биоэкосистем (см. Электромагнитная безопасность человека./Ю.Г. Григорьев, В.С. Степанов, О.А. Григорьев, А.В. Меркулов: Справ.-информационное издание. Российский национальный комитет по защите от неионизирующего излучения 1999, Электромагнитная обстановка и оценка влияния ее на человека/ Дьяков А.Ф. и др.//Электричество 1997.-№5.-с.2-10).

Учитывая многообразие проблемы, затруднительно в небольшом учебном пособии отразить все вопросы, относящиеся к ЭМС, не сбиваясь на их фрагментарное изложение.

Данное учебное пособие содержит четыре главы. Первые две главы посвящены изложению наведенных напряжений от воздушных линий электропередачи с анализом обусловленных ими ряда эффектов. Эффекты, связанные с акустическим шумом и радиопомехами, здесь не затрагиваются. Относительно радиопомех, создаваемых воздушными линиями электропередачи, рекомендуем обратиться к методическим указаниям РД50-723-23 (СИСПР18-1). В третьей главе излагается часть требований стандартов, имеющих непосредственное отношение к ЭМС в электроснабжении. Дан пример расчета переходного процесса в сети, приводящий к кратковременному провалу напряжения. Четвертая глава посвящена изложению вопросов, связанных с молниевым разрядом и молниезащитой.

В представленном пособии нашли отражения публикации начиная с середины семидесятых годов как отечественных, так и иностранных авторов. Вместе с тем рекомендуем ознакомиться с учебными пособиями, освещающими проблематику ЭМС под несколько другим углом зрения. Отметим два пособия, вышедших в свет еще в середине девяностых годов: Электромагнитная совместимость и стойкость к мощным электромагнитным импульсам / В.Г. Болдырев и др. – М.: Изд-во МАИ, 1995 и Электроэнергетика. Электромагнитная совместимость. ч. 1/ Костенко М.В., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х.-Спб.: Изд-во СПбГТУ, 1997.

Разумеется, этими пособиями не исчерпывается учебная литература по данной проблеме.

Автор благодарит инженеров Наутова М.С. и Севастьянова А.А. за оказанную помощь при подготовке учебного пособия.

Глава 1

Электрическое поле высоковольтной линии на уровне земли.

1.1. Вывод основных расчетных соотношений.

В настоящее время проектирование воздушных линий (ВЛ) сверхвысокого и ультравысокого напряжений должно учитывать факторы, связанные с биологическим и физиологическим влиянием.

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

Ограничимся рассмотрением геометрии линии, в которой высота подвеса проводов средней фазы может отличаться от высоты подвеса крайних фаз, принятой одинаковой [1,2]. На рис.1.1 показаны три фазы линии передачи, имеющие один и тот же эквивалентный радиус r_3 , 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 . Здесь же показаны зеркальные отображения центров фаз в плоскости земли. Заряды на единицу длины линии фаз обозначены через τ_1, τ_2 и τ_3 , а в зеркальных отображениях $-\tau_1, -\tau_2$ и $-\tau_3$, причем предполагается, что сумма зарядов всех фаз равна нулю. Напряжения u_{12} и u_{23} определяются как линейные интегралы напряженности электрического поля вдоль путей, соединяющих центры фаз 1,2 и 2,3. Поэтому воспользуемся приемом, при котором интегрирование для u_{12} осуществляется сперва вдоль D , а затем вдоль ΔH так, как показано справа на рис.1.1, а для u_{23} - сперва вдоль ΔH , а затем вдоль D в соответствии с изображением слева на рис.1.1.

Вертикальная компонента напряженности на уровне земли на расстояниях x , отсчитываемого от прямой линии, соединяющей оси с линейной плотностью зарядов τ_1 и $-\tau_1$, равна

$$-E_n = \frac{\tau_1}{\pi\epsilon_0} \frac{H}{H^2 + x^2} + \frac{\tau_2}{\pi\epsilon_0} \frac{H + \Delta H}{(H + \Delta H)^2 + (D + x)^2} + \frac{\tau_3}{\pi\epsilon_0} \frac{H}{H^2 + (2D + x)^2} \quad (1.1)$$

Задача состоит в том, чтобы выразить неизвестные плотности зарядов τ_1 и τ_3 через междофазные напряжения u_{12} и u_{23} .

Оставляя промежуточные выкладки, имеем в результате интегрирования вдоль выделенного пути (рис.1.1) для u_{12}

$$u_{12}\pi\varepsilon_0 = \tau_1 \ln \frac{\sqrt{(\Delta H)^2 + D^2} 2\sqrt{H(H + \Delta H)}}{r_3 \sqrt{(2H + \Delta H)^2 + D^2}} + 0,5\tau_3 \ln \frac{[(\Delta H)^2 + D^2] 2(H + \Delta H)\sqrt{H^2 + D^2}}{Dr_3 [(2H + \Delta H)^2 + D^2]}. \quad (1.2)$$

Обозначим натуральный логарифм при τ_1 в (1.2) через F , а при τ_3 с учетом множителя 0,5 через G . Тогда с введенными обозначениями результат интегрирования вдоль пути (рис.1.1) для u_{23} запишется в виде

$$-u_{23}\pi\varepsilon_0 = \tau_3 F + \tau_1 G \quad (1.3)$$

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

$$\begin{cases} \tau_1 F + \tau_3 G = \pi\varepsilon_0 u_{12} \\ \tau_1 G + \tau_3 F = -\pi\varepsilon_0 u_{23} \end{cases} \quad (1.4)$$

Вид уравнения (1.3) вполне закономерен. Если изменить направление интегрирования для u_{23} на противоположное и заменить τ_1 на τ_3 (рис.1.1), то результат для $\pi\varepsilon_0 u_{23}$ не будет отличаться от левой части первого из уравнений (1.4). Из (1.4) находим τ_1 и τ_3 :

$$\tau_1 = \pi\varepsilon_0 \frac{u_{12}F + u_{23}G}{F^2 - G^2}, \quad (1.5)$$

$$\tau_3 = -\pi\varepsilon_0 \frac{u_{23}F + u_{12}G}{F^2 - G^2}, \quad (1.6)$$

$$F = \ln \frac{2[H(H + \Delta H)]^{1/2} [(\Delta H)^2 + D^2]^{1/2}}{r_3 [(2H + \Delta H)^2 + D^2]^{1/2}}, \quad (1.7)$$

$$G = 0,5 \ln \frac{2[(\Delta H)^2 + D^2] (H + \Delta H) (H^2 + D^2)^{1/2}}{Dr_3 [(2H + \Delta H)^2 + D^2]}, \quad (1.8)$$

причем G можно выразить через F , а именно:

$$G = F - Q, \quad (1.9)$$

$$Q = 0,5 \ln \frac{2DH}{r_3 (H^2 + D^2)^{1/2}}, \quad (1.10)$$

Для $\Delta H = 0$ (1.7) и (1.8) преобразовывается к виду

$$F_{\Delta H=0} = \ln \frac{2DH}{r_3 [(2H)^2 + D^2]^{1/2}}, \quad (1.11)$$

$$G_{\Delta H=0} = 0,5 \ln \frac{2DH (H^2 + D^2)^{1/2}}{r_3 [(2H)^2 + D^2]}, \quad (1.12)$$

а Q остается без изменения.

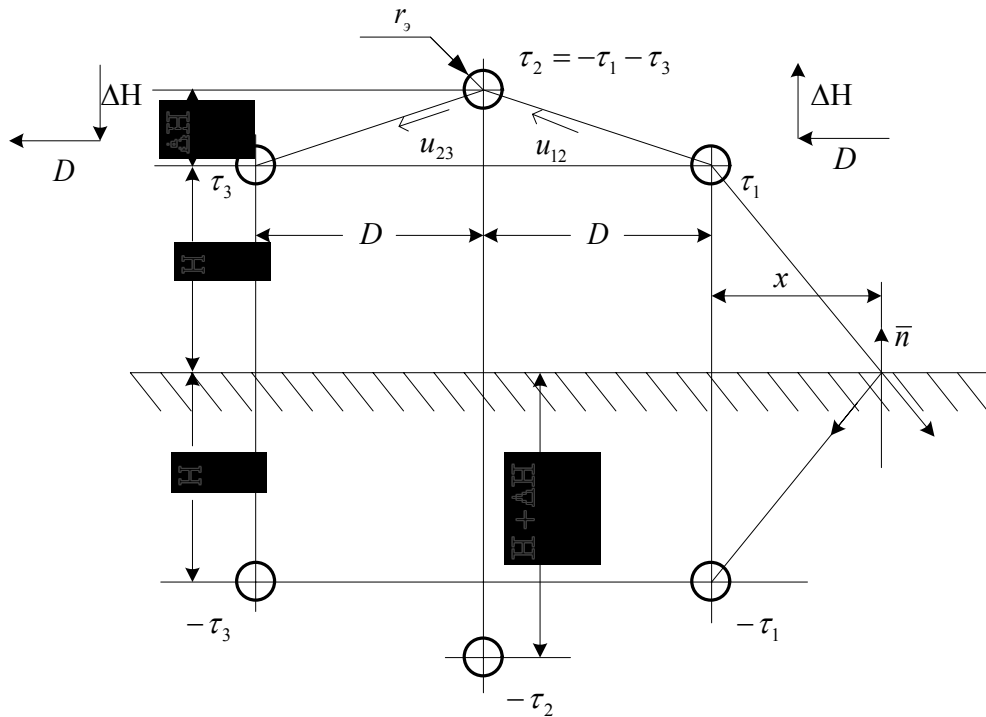


Рис. 1.1

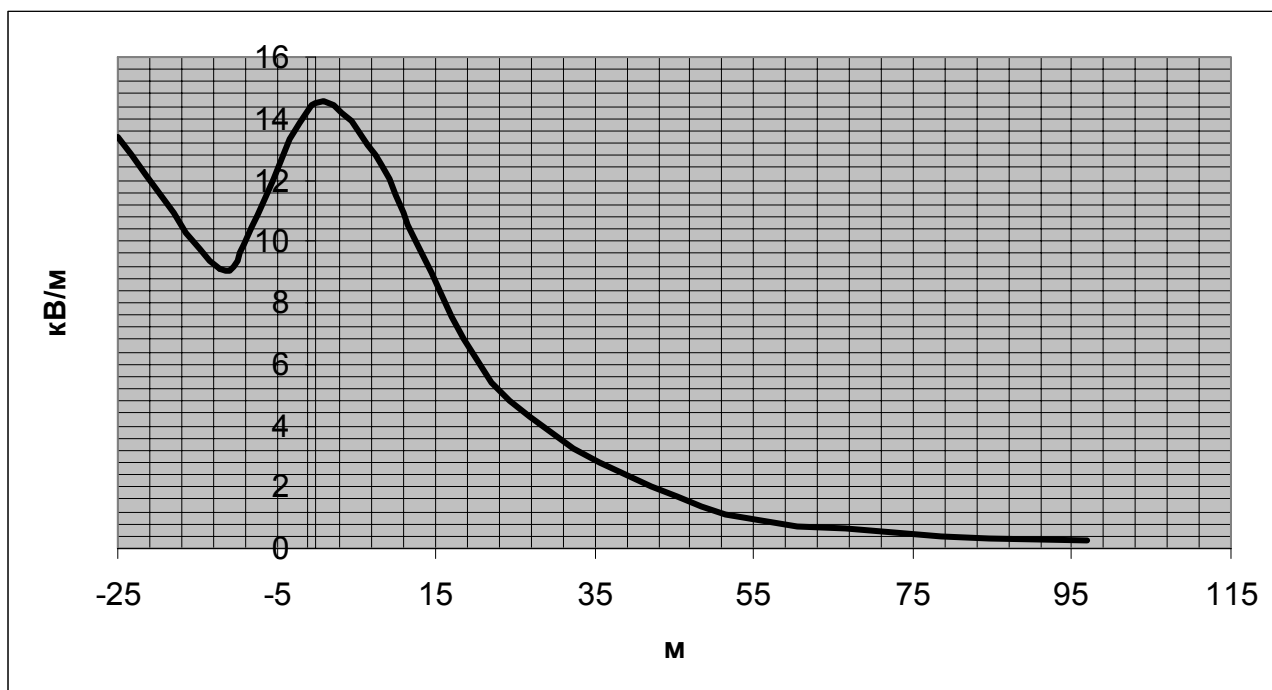


Рис. 1.2

Теперь следует воспользоваться уравнением (1.1), предварительно заменив τ_2 на $-(\tau_1 + \tau_3)$, сгруппировав члены с τ_1 и с τ_3 и подставив выражения (1.5) и (1.6) для τ_1 и τ_3 .

Можно показать, что

$$-E_n = \frac{u_{12}}{F^2 - G^2} [Fg_1(x) - Gg_2(x)] + \frac{u_{23}}{F^2 - G^2} [Gg_1(x) - Fg_2(x)], \quad (1.13)$$

где

$$g_1(x) = \frac{DH}{\left[(H + \Delta H)^2 + (D + x)^2 \right]} \frac{D + 2x + (H^2 + H\Delta H - x^2)\Delta H/DH}{H^2 + x^2} \quad (1.14)$$

и

$$g_2(x) = - \frac{DH}{\left[(H + \Delta H)^2 + (D + x)^2 \right]} \frac{3D + 2x + \left[(2D + x)^2 - H^2 - H\Delta H \right] \Delta H / DH}{H^2 + (2D + x)^2}. \quad (1.15)$$

Обозначая вторые дроби в выражениях для $g_1(x)$ и $g_2(x)$ соответственно через $g_3(x)$ и $g_4(x)$, а затем вводя обозначения

$$A_1(x) = Fg_3(x) + Gg_4(x), \quad (1.16)$$

$$B_1(x) = Gg_3(x) + Fg_4(x), \quad (1.17)$$

получим

$$-E_n = \frac{DH[A_1(x)u_{12} + B_1(x)u_{23}]}{(F^2 - G^2)[(H + \Delta H)^2 + (D + x)^2]}. \quad (1.18)$$

Полагая

$$u_{12} = \sqrt{2}U \sin \omega t, \quad u_{23} = \sqrt{2}U \sin(\omega t \pm 2\pi/3),$$

имеем для $-E_n(t)$ следующее выражение

$$-E_n(t) = \sqrt{2}U \frac{DH}{(F^2 - G^2)[(H + \Delta H)^2 + (D + x)^2]} \sqrt{A_1^2(x) - A_1(x)B_1(x) + B_1^2(x)} \sin(\omega t \pm \varphi)$$

где

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\frac{\sqrt{3}}{2} B_1(x)}{A_1(x) - \frac{1}{2} B_1(x)}.$$

Поэтому действующее значение $E_n(x)$ будет равно

$$E_n(x) = U \frac{DH}{(F^2 - G^2)[(H + \Delta H)^2 + (D + x)^2]} \sqrt{A_1^2(x) - A_1(x)B_1(x) + B_1^2(x)}, \quad (1.19)$$

где $A_1(x)$ и $B_1(x)$ определены выражениями (1.16) и (1.17), в которых $g_3(x)$ и $g_4(x)$ соответственно равны

$$g_3(x) = \frac{D + 2x + (H^2 + H\Delta H - x^2)\Delta H / DH}{H^2 + x^2}, \quad (1.20)$$

$$g_4(x) = \frac{3D + 2x + \left| (2D + x)^2 - H^2 - H\Delta H \right| \Delta H / DH}{H^2 + (2D + x)^2} \quad (1.21)$$

Безразмерные величины F и G , не зависящие ни от времени, ни от x , равны (1.7) и (1.8).

Из выражений (1.20) и (1.21) при $\Delta H = 0$ имеем

$$g_3(x)|_{\Delta H=0} = \frac{D + 2x}{H^2 + x^2}, \quad (1.22)$$

$$g_4(x)|_{\Delta H=0} = \frac{3D + 2x}{H^2 + (2D + x)^2} \quad (1.23)$$

Заметим, что (1.22) обращается в нуль при $x = -D/2$. В полученных выражениях диапазон изменения x содержится в интервале

$$-D \leq x < \infty,$$

и всюду предположено, что

$$r_s \ll \Delta H, H \text{ и } D.$$

Обратим внимание на то, что определение действующего значения напряженности при $x = -D$, т.е. под средней фазой, можно существенно упростить. В этом случае из (1.20) и (1.21) получаем

$$g_3(-D) = -g_4(-D) = -\frac{D + (D^2 - H^2 - H\Delta H)\Delta H / DH}{H^2 + D^2},$$

Тогда из (1.16), (1.17) и (1.19) находим

$$E_n(-D) = \sqrt{3}U \frac{D^2 H + (D^2 - H^2 - H\Delta H)\Delta H}{(H + \Delta H)^2 (H^2 + D^2) (F + G)}, \quad (1.24)$$

где F и G определяются по формулам (1.7-1.10).

Из (1.24) при $\Delta H = 0$ имеем

$$E_n(-D)|_{\Delta H=0} = \sqrt{3}UD^2 / H(D^2 + H^2)(F + G), \quad (1.25)$$

где F и G находятся по формулам (1.11) и (1.12).

В другой характерной точке $x = 0$

$$E_n(0) = U \frac{DH}{(F^2 - G^2)[(H + \Delta H)^2 + D^2]} \sqrt{A_1(0) - A_1(0)B_1(0) + B_1^2(0)},$$

причем входящие в $A_1(0)$ и в $B_1(0)$ g_3 и g_4 , берутся по формулам (1.20) и (1.21), но при $x = 0$.

При $\Delta H = 0$ действующее значение напряженности под крайней фазой равно

$$E_n(0) = U \frac{DH}{(F^2 - G^2)(H^2 + D^2)} \sqrt{A_1(0) - A_1(0)B_1(0) + B_1^2(0)} \Big|_{\Delta H=0}.$$

В этом выражении F и G определяются по формулам (1.11) и (1.12), а g_3 и g_4 - по формулам (1.22) и (1.23), если в них положить $x = 0$.

Здесь необходимо отметить, что r_s определяется в общем случае по выражению

$$r_s = \frac{r_p}{(r_p / nr_{II})^{1/n}},$$

где r_p - радиус окружности, проходящей через центры сечений проводов расщепленной фазы, расположенных в вершинах правильного n -угольника, r_n - радиус сечения проводов.

В отечественной практике считается оптимальным расщепление фазы на 2 провода с расстоянием между проводами 0,4 м - для линий 330 кВ, на 3 провода с расстоянием 0,4 м между проводами - для линий 500 кВ, на 4-5 проводов с расстоянием между проводами 0,4 - 0,6 м - для линий 750 кВ, на 8-10 проводов с расстоянием между проводами 0,4 м - для линий 1150 кВ.

Теперь произведем необходимые сравнения, используя графики поперечных профилей распределения напряженностей, опубликованных в работах [3-6]. Сравнение напряженностей по данным [3-6], полученным экспериментальным путем или с помощью специальных программ, и по приведенным формулам, сгруппировано в табл. 1.1-1.5.

Таблица 1.1

Сравнительные данные для напряженности электрического поля вблизи земли в кВ/м для ВЛ 735 кВ, $H_{min} = 13,5$ м, $D=15$ м, $r_s=0,22$ м (фазы расположены в одной плоскости)

Источник	Расположение x в метрах от крайней фазы								
	-15	-10	-5	0	5	10	15	25	35
[3]	8,0	7,4	7,6	10,4	9,8	7,4	4,6	2,2	1,2
Расчет	8,79	7,52	8,02	10,26	9,35	6,96	4,66	2,13	1,1

Таблица 1.2

Сравнение напряженностей электрического поля на уровне земли в кВ/м для ВЛ 750 кВ, $H=13$ м, $D=19,5$ м, $r_s \approx 0,187$ м.

Источник	Расположение x в метрах от крайней фазы						
	-19,5	-9,75	0	10,5	20,5	30,5	40,5
[4]	10,3	6,7	11,7	7,3	3,6	1,7	1,0
Расчет	10,7	6,84	11,55	7,11	3,13	1,53	0,85

Таблица 1.3

Сравнение напряженностей электрического поля на уровне земли в кВ/м для ВЛ 750 кВ с подъемом $\Delta H = 7$ м, $D=14$ м, $r_s \approx 0,187$ м.

Источник	Расположение x в метрах от крайней фазы				
	-14	0	16	26	36
[4]	3,0	10,9	4,3	1,9	1,0
Расчет	2,95	10,54	4,01	1,87	0,96

Таблица 1.4

Сравнение напряженностей электрического поля на уровне земли в кВ/м для ВЛ 765 кВ, $H=13,7$ м, $D=13,7$ м, $r_s \approx 0,27$ м.

Источник	Расположение x в метрах от крайней фазы					
	-13,7	-6,85	0	6,3	16,3	26,3
[5]	7,7	7,2	10,5	9,2	4,5	2,0
Расчет	8,81	7,76	10,6	9,4	4,46	2,07

Таблица 1.5

Распределение напряженности электрического поля ВЛ 1150 кВ с горизонтальным расположением фаз при $H=17,5$ м, $D=24,2$ м, $r_s \approx 0,43$ м.

Источник	Расстояние x от крайней фазы									
	-24,2	-12,1	-8,1	0	8,1	12,1	24,2	48,4	72,6	96,8
[6]	Практическое совпадение			15,2	Практическое совпадение					
Расчет	13,38	9,12	10,48	14,53	12,46	10,15	4,83	1,37	0,55	0,27

Кривая распределения напряженностей в соответствии с расчетным вариантом таблицы 1.5 приведена на (рис 1.2).

Сравнительный анализ данных табл. 1.1-1.5 говорит не в пользу заметной роли провисания проводов на величину напряженности электрического поля вблизи земли. Для данной точки пролета напряженность поля практически не зависит от расстояния до земли в середине пролета (H_{\min}), за исключением, конечно, середины пролета, и определяется высотой подвеса проводов в данном месте пролета.

Полезная информация по ограничению напряженности электрического поля вблизи земли, в том числе в связи с требованиями, относящимися к полосе отчуждения и к санитарно-защитной зоне, имеется в [5-7]. Санитарно-защитная зона, где запрещена жилая застройка, определена как территория вдоль трассы линии, на которой напряженность поля превышает 1 кВ/м [5]. Для Нью-Йорка была предложена такая же санитарная норма в 1 кВ/м [7]. Эффекты, связанные с побочным действием электрических полей на человека и животных, описаны в работе [8] и в аналитическом обзоре [9]. В обзоре [10] сгруппирована информация о нормировании напряженности электрического поля вблизи линии передачи в разных странах.

В [9] также показана графическая зависимость вертикальной компоненты напряженности электрического поля в середине пролета от смещения точки измерения в направлении, перпендикулярном оси для линии 765 кВ при расстоянии между фазами $D=13,7$ м, но с высотой линии $H=15$ м. При этом максимальная напряженность электрического поля под крайними фазами около 9 кВ/м из-за разницы в высоте линии оказалась меньше величины напряженности электрического поля в точке $x=0$ из таблицы 1.5, равной 10,5 кВ/м

Приведенные данные согласовываются с градацией по степени интенсивности электромагнитной помехи в части электрических полей, создаваемых ВЛ на расстоянии 1 м над поверхностью земли ($\leq 1, 10$ и 20 кВ/м), введенной ГОСТ Р 51317.2.5-2000(МЭК 6100-2-5-95) «Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств».

В заключение отметим, что общий путь определения зарядов линии передачи через напряжения состоит в установлении связи между ними с помощью потенциальных коэффициентов. Задачу можно рассматривать как плоскопараллельную, за исключением участков вблизи опор, когда задача становится трехмерной [11]. По отношению к участкам с провисанием проводов, условная высота проводов должна соответствовать их реальным значениям при определении поперечного профиля распределения напряженности для выбранных участков [11].

1.2 Соотношения между наведёнными токами и напряженностью электрического поля на уровне земли

При нахождении человека или транспортного средства (в дальнейшем объекта) вблизи или под высоковольтной линией в объекте наводятся токи, обусловленные проводимостью между ним и фазами линии передачи. На рис. 1.3 показаны трёхфазная линия передачи, для которой проводимости на землю обозначены как Y_A, Y_B, Y_C , между фазами как Y_{AB}, Y_{BC} и Y_{CA} , а проводимости фаза-объект и объекта относительно земли обозначены как Y_{A0}, Y_{B0}, Y_{C0} и Y_0 . Заметим, что указанные проводимости относятся к конечному участку линии передачи, ближайшему к месту нахождения объекта. Электрическое поле у объекта претерпевает локальное возмущение, однако это влияние на источник поля линии передачи не учитывается, так как оно пренебрежимо мало.

При определении напряжения U_0 объекта относительно земли можно воспользоваться методом эквивалентного генератора тока, рассматривая схему на рис.1.3 до объекта, то есть до зажимов с Y_0 как активный двухполюсник рис.1.4. С этой целью введем два встречно направленных источника тока $J_1 = J_2 = \mathcal{E}$, подключение которых никак не влияет на состояние системы. Разорвем второй источник тока и подберем первый так, чтобы совокупное действие его и источников внутри активного двухполюсника давало бы нулевое напряжение на Y_0 , а следовательно, и нулевой ток в Y_0 . Но нулевое напряжение между зажимами двухполюсника отвечает режиму короткого замыкания для двухполюсника, и тогда $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{K3}$. Вклад оставшегося источника тока 2 в напряжение U_0 при $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{K3}$ будет единственным ввиду того, что совокупное действие источников двухполюсника и источника тока уже было учтено путем соответствующего подбора и приведения обусловленного ими напряжения к нулю. Поэтому при определении вклада источника тока 2 следует исключить действие всех других источников, т.е. замкнуть все источники ЭДС внутри А и разорвать источник тока 1. Тогда, вводя обозначение Y_{BX} для входной проводимости пассивного двухполюсника, получаем

$$U_0(Y_{BX} + Y_0) = \mathcal{E}_{K3}, \quad (1.26)$$

где, как нетрудно видеть (рис 1.3),

$$Y_{BX} = Y_{A0} + Y_{B0} + Y_{C0}. \quad (1.27)$$

При $Y_0 \gg Y_{BX}$ имеем

$$U_{0Y_0} \cong I_{K3} \approx h E_0 Y_0, \quad (1.28)$$

где E_0 - напряженность неискаженного поля вблизи Земли в месте расположения объекта, h - эффективная высота объекта над Землей. Напряженность неискаженного поля линии передачи вычисляется по формулам предыдущего параграфа. Умножив и разделив выражение (1.2) на $j\omega\varepsilon_0$ имеем

$$I_{K3} = j\omega\varepsilon_0 E_0 \frac{hY_0}{j\omega\varepsilon_0} = j\omega\varepsilon_0 E_0 S_{\text{ЭКВ}}, \quad (1.29)$$

где $S_{\text{ЭКВ}}$ - эквивалентная площадь поверхности объекта, зависящая только от геометрических соотношений; её можно найти через I_{K3} при глухом заземлении объекта [12].

В предположении, что объект расположен на расстоянии x от крайней фазы ($-D \leq x < \infty$), в выражение (1.29) вместо E_0 подставляем $E(x)$, а зная ток I_{K3} определяем $S_{\text{ЭКВ}}$. В работе [12] были определены токи замыкания и эквивалентные площади для ряда объектов. Кривые для $S_{\text{ЭКВ}}$ в зависимости от площади параллельной земле грани прямоугольного объекта при разных отношениях средней высоты расположения объекта к его ширине даны в [12]. В этой же работе дан пример расчета тока замыкания и его экспериментальное подтверждение для транспортного средства (легкового автомобиля). Во всех случаях полагают, что автомобили хорошо изолированы от земли, исключая те, когда автомобили специально заземлены.

Для автомобиля, условно изображенного на рис. (1.5) с геометрическими размерами отдельных его частей при общей длине $A = 4,6$ м и ширине $B = 1,78$ м, рассчитывается средняя высота, площадь S и отношение средней высоты к ширине:

$$h_{CP} = \frac{1,73 \cdot 0,86 + 1,83 \cdot 1,37 + 1,04 \cdot 0,94}{4,6} = 1,08 \text{ м}, \quad S = 8,2 \text{ м}^2, \quad h_{CP} / B = 0,61.$$

Соответствующая зависимость в [12] для указанных значений дает отношение $\frac{S_{\text{ЭКВ}}}{S} = 3,25$, отсюда $S_{\text{ЭКВ}} = 26,5 \text{ м}^2$. Из чего следует, что для частоты $f = 50$ Гц

$$|I_{K3}| \cong 0,737 \cdot 10^{-4} \cdot |E|,$$

где напряженность следует подставлять в кВ/м. При невозмущенной напряженности поле в 9 кВ/м, ток к.з. составит $0,66 \cdot 10^{-3}$ А, а для частоты 60 Гц соответственно $\cong 0,8 \cdot 10^{-3}$ А. Измеренный ток оказался равным

$0,79 \cdot 10^{-3}$ А, т.е. расчет был подтвержден экспериментом.

Возвращаясь к формуле(1.28), выразим Y_0 через емкость объекта относительно земли и сопротивление утечки

$$Y_0 = j\omega C_0 + \frac{1}{R_0}.$$

Тогда определение тока $|I_{K3}|$ сводится к нахождению эффективной высоты объекта h , и наоборот, эффективную высоту можно найти, зная $|I_{K3}|$. В табл. 1 даны некоторые типовые значения емкостей ряда объектов [12]

Таблица 2.1

Типовые значения емкостей

Объект	Емкость, пФ
Человек	100
Человек со шлангом	150
Небольшой автомобиль	300
Самосвал	1000
Автоподъемник	1900
Большой автобус	2000
Железнодорожный вагон, грузовик с прицепом	1200

К важным эффектам, наблюдаемым в электрических полях с напряженностью более 3–5 кВ/м, относят возникновение искровых разрядов. Искровые разряды происходят, когда человек или животное в сильном электрическом поле касается хорошо изолированного от земли тела.

В случае прикосновения человека к автомобилю, расположенному под линией электропередачи считается, что весь поражающий ток проходит через человека [12]. Опыт подтверждено, что напряжение, появляющееся на объекте, изолированном от земли, может быть вычислено с помощью напряженности поля, существующей в отсутствие объекта.

Возникает вопрос, каким должно быть минимальное расстояние между объектом и высотой проводов, чтобы ток замыкания не превосходил некоторой величины, например 5 мА. При этом высота подвеса берется равной высоте в середине пролета (под наибольшей стрелой подвеса) плюс радиус расщепления.

В эксперименте, описанном [12], был выбран грузовик размером 2,1×2,1×7,5 м, параллельный проводам линий передачи и поднятый на высоту 105 см над землей. Для линии принималось треугольное расположение проводов. Значения воздушных промежутков, удовлетворяющих требованию, чтобы ток замыкания не превосходил 5 мА, представлены в табл. 2.2

Таблица 2.2

Требуемое значение воздушных промежутков

Напряжение линии, кВ	362	550	800	1200	1500
Размер промежутка, м	5,5	8,24	11,3	16,8	21,1

Необходимо также отметить, что для длинных транспортных средств, перпендикулярных трехфазной линии, эквивалентная площадь меньше, чем это может быть вычислено с учетом напряженности электрического поля, определенных в центре прямоугольного объекта. Для такого расположения следует принимать во внимание непостоянство напряженности при перемещении вдоль транспортного средства как по абсолютному значению, так и по фазе.

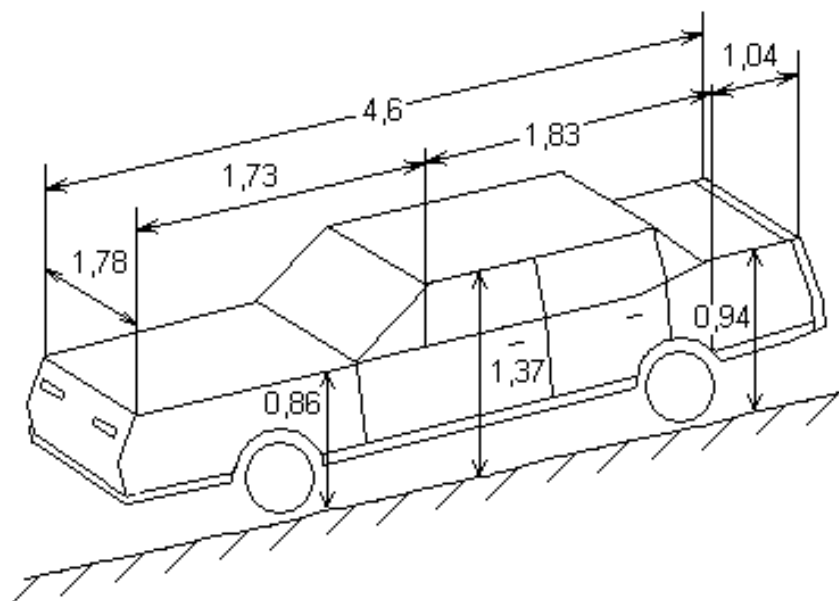


Рис. 1.5

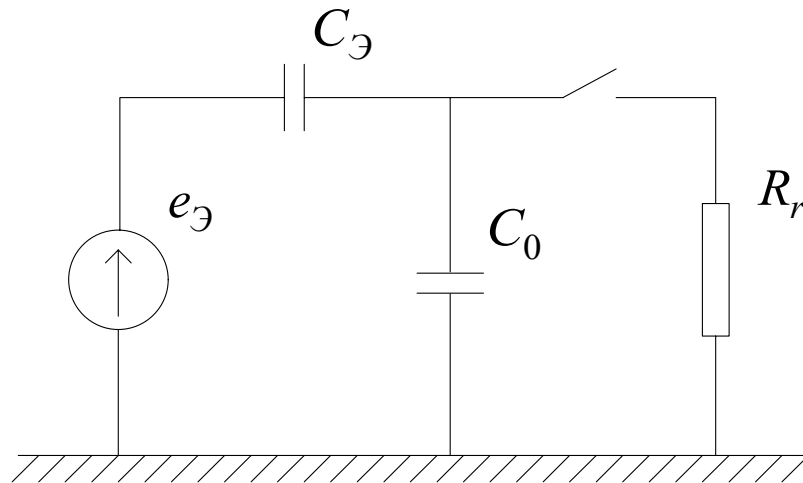


Рис. 1.6

Исследование искровых разрядов было продолжено в работах [13,14]. Расчет величины и длительности тока искрового разряда по рекомендациям [13,14] можно осуществить с помощью следующей упрощенной схемы (рис.1.6), где $e_э$ и $C_э$ - эквивалентная электродвижущая сила и емкость линии передачи относительно объекта, C_0 - емкость объекта относительно земли, R_r - сопротивление человека.

Аналогичная схема была представлена в [15].

Пусть в момент касания (момент замыкания контакта) электродвижущая сила равна e_m . Начальные значения напряжений на емкостях $C_э$ и C_0 соответственно равны

$$(1.30) \quad \left. \begin{aligned} U_э(0) &= e_m \frac{C_0}{C_э + C_0} \\ U_0(0) &= e_m \frac{C_э}{C_э + C_0} \end{aligned} \right\}$$

Для расчета тока разряда через тело человека рассмотрим схему с указанием контурных токов i_0 и i_r (рис.1.7).

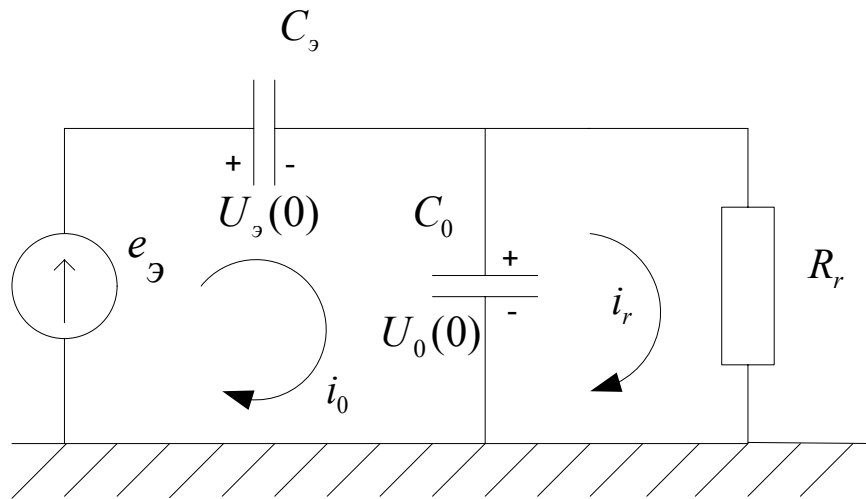


Рис.1.7

Переходя к операторной форме записи, имеем следующую систему уравнений относительно операторных изображений контурных токов:

$$(1.31) \quad \left. \begin{aligned} \left(\frac{1}{pC_0} + R_r\right)I_r(p) - \frac{1}{pC_0}I_0(p) &= \frac{U_0}{p} \\ \left(\frac{1}{pC_э} + \frac{1}{pC_0}\right)I_0(p) - \frac{1}{pC_0}I_r(p) &= e_э(p) - \frac{U_э(0)}{p} - \frac{U_0(0)}{p} = e_э(p) - \frac{e_m}{p} \end{aligned} \right\}$$

Исключая из системы контурный ток $I_0(p)$, найдем:

$$(1.32) \quad I_r(p) = C_э \frac{pe_э(p)}{1 + p(C_э + C_0)R_r}.$$

Операторное изображение $e_э(p)$ в общем случае имеет вид

$$e_э(p) = e_m \frac{p \sin \psi_e + \omega \cos \psi_e}{p^2 + \omega^2}$$

Полагая $\psi_e = \frac{\pi}{2}$ и подставляя $e_э(p)$ в (1.32), получим для тока через тело человека следующее выражение:

$$(1.33) \quad i_r(t) = \frac{C_э}{\tau} e_m (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1} \left[\exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) - \omega \tau \sin \omega t + (\omega \tau)^2 \cos \omega t \right],$$

где

$$\tau = (C_э + C_0)R_r, \quad \omega = 2\pi f$$

и

$$\frac{C_3}{(C_3 + C_0)R_r} e_m = \frac{U_0(0)}{R_r} = i_r(0) \quad (1.34)$$

Для вычисления начального значения тока разряда, постоянной τ и амплитуд периодических составляющих в формуле (1.34), воспользуемся данными из [14].

Подставим $R_r = 1000 \text{ Ом}$, $e_m = 1926 \text{ В}$, $C_0 = 470 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ и $C_3 = 670 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$.

Тогда найдем

$$i_r(0) = \frac{1926 \cdot 670}{1140 \cdot 1000} = 1,132 \text{ А}, \quad \tau = 1140 \cdot 10^{-12} \cdot 1000 = 1,14 \mu\text{с}$$

и

$$\omega\tau = 358 \cdot 10^{-6}$$

для частоты $f = 50 \text{ Гц}$.

Поэтому членом с $\omega\tau$, а тем более с $(\omega\tau)^2$ при оценке тока разряда как для частоты 50, так и 60 Гц можно пренебречь.

Отметим, что выбранному значению e_m в примере отвечала напряженность электрического поля от линии передачи ВЛ 500 кВ, равная 4,5 кВ/м.[14, Fig.6].

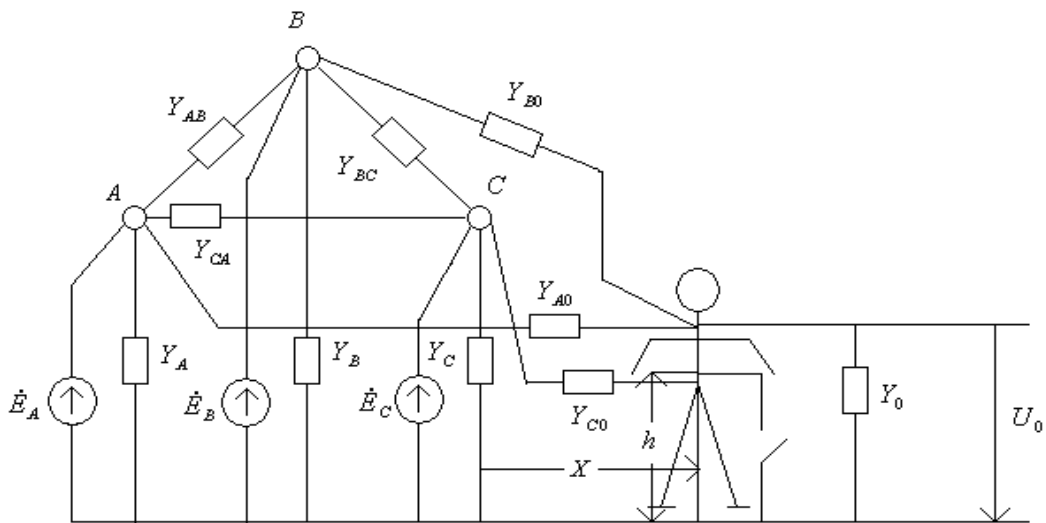


Рис.1.3

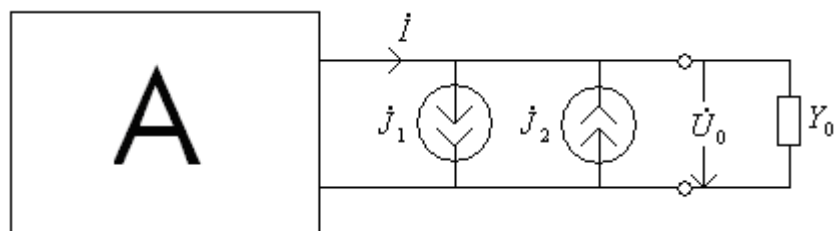


Рис.1.4

Глава 2

Индуктированные напряжения от воздушных линий передач

2.1. Вводные замечания

При оценке индуктированных напряжений от воздушных линий (ВЛ) электропередач будем пользоваться следующим выражением для взаимного сопротивления прямолинейных проводов на единицу длины [16] (рис. 2.1):

$$Z_{m1} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2}b_g}{\rho_1} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_1 + h_n}{b_g} (1+j) - 0,0772 \right] \text{ Ом/м,} \quad (2.1)$$

где h_1 и h_n - высота расположения провода 1 ВЛ и предполагаемой линии.

b_g - эквивалентная глубина проникновения электромагнитной волны в грунт

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

где ω - круговая частота, μ_0 - магнитная постоянная, σ_g - удельная проводимость грунта, ρ_1 - расстояние от оси провода 1 до оси предполагаемой линии, равное

$$\rho_1 = \sqrt{(h_1 - h_n)^2 + y_n^2}.$$

Формулу (2.1) применяют в том случае, когда все расстояния значительно меньше b_g .

Если можно пренебречь высотой расположения над землей ($h_1 \approx h_n \approx 0$), то предыдущее расчетное выражение упрощается:

$$Z_{m1} = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2}b_g}{y} - j\frac{\pi}{4} - 0,0772 \right] \text{ Ом/м,} \quad (2.2)$$

где $y = y_n$

При $h_1 = h_n = h$ и $y_n = y = r_{ins}$ из (2.1) получаем собственное сопротивление провода с радиусом по изоляции, равным r_{ins} в виде

$$(2.3) \quad Z_e = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2}b_g}{r_{ins}} - j\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} + \frac{2h}{b_g}(1+j) - 0,0772 \right],$$

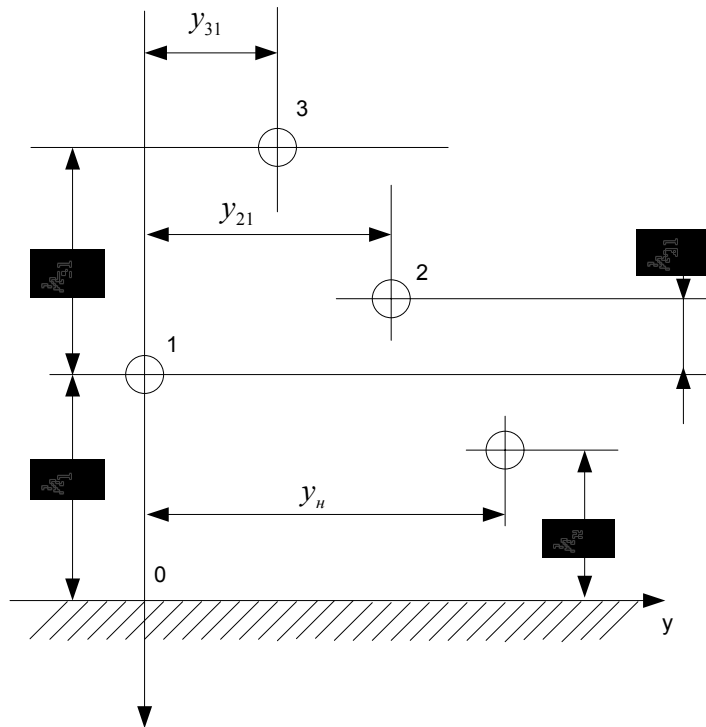


Рис. 2.1

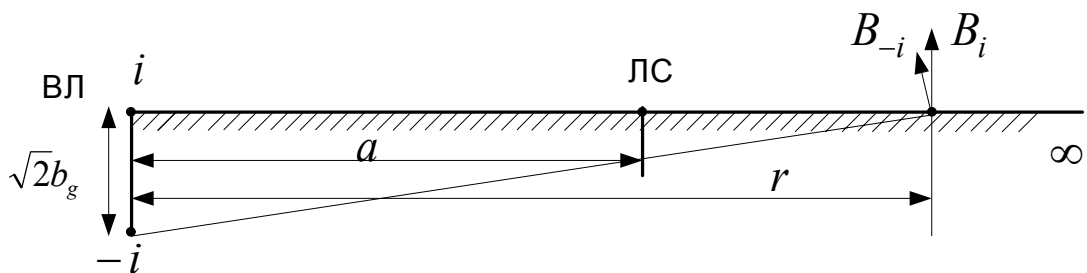


Рис. 2.2

из которого при $h = 0$ будем иметь собственное сопротивление для частного случая расположения провода на уровне земли. Заметим, что если бы прямолинейный проводник с радиусом по изоляции r_{ins} располагался бы внутри грунта (земли) на расстоянии h от поверхности, то для определения Z_e в этом случае третий член в выражении (2.3) следовало бы взять со знаком

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

$$Z_e = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \frac{\sqrt{2}b_g}{r_{ins}} - j \frac{\pi}{4} \pm \frac{2}{3} \frac{2h}{b_g} (1+j) - 0,0772 \right]. \quad (2.4)$$

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 [17]. Допустимые расстояния в этом случае, как правило, значительно превосходят эквивалентную глубину проникновения. Тогда для Z_m можно воспользоваться формулой

$$Z_m = \frac{\omega\mu_0 b_g^2}{2\pi a^2} \quad \text{Ом/м}, \quad (2.5)$$

где a – расстояние между ВЛ и ЛС на участке параллельного сближения [17]. С учетом ограничения для Z_m имеем

$$a \geq b_g \sqrt{\frac{\omega\mu_0}{2\pi \cdot 3 \cdot 10^{-6}}} \quad (2.6)$$

Формулу (2.5) можно получить из формулы (42) работы [18], если считать, что как ВЛ, так и ЛС располагаются на уровне земли. Формулу (2.5) нетрудно получить независимым путем, предполагая, что эквивалентная глубина возврата тока i через землю равна $\sqrt{2}b_g$ (рис. 2.2). Здесь r – расстояние до точки наблюдения ($a \leq r < \infty$), взятое справа от расположения ЛС.

Требование по ограничению Z_m 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. Подстановка значений μ_0 и ω в (2.6) дает

$$a \geq b_g \cdot 4,576 \text{ м}$$

Для b_g при промышленной частоте и $\sigma_g = 0,02$ См/м имеем величину 503,3 м, и тогда $a \geq 2303$ м. При в два раза меньшей удельной проводимости грунта

$$a \geq \sqrt{2} \cdot 2303 \approx 3257 \text{ м}.$$

Как указано в [17], ширина зоны сближения для этого случая должна быть больше 3200 м, и таким образом, полученный результат согласуется с указанным требованием.

2.2 Индуктированные напряжения вблизи линии передачи

Выражение (2.1) является основным при определении индуктированных напряжений вблизи линии на расстояниях, соизмеримых с высотой подвеса проводов на опорах ВЛ, и их необходимо учитывать при обеспечении безопасных условий во время производства работ на линиях электропередач.

Следует отметить, что токи в фазах, помимо основной гармоники, могут содержать и высшие гармоники. В связи с этим введем обозначения для k – гармоник токов в фазах $n=1,2,3$ через \mathcal{I}_{nk} . Высоту подвеса для провода фазы 1 запишем как h_1 , фазы 2 как $h_2 = h_1 + h_{21}$, фазы 3 как $h_3 = h_1 + h_{31}$ (рис.2.1). Соответственно расстояния до линии, проходящей через точку наблюдения, как $y_{H1} = y_H$, $y_{H2} = y_H - y_{21}$, $y_{H3} = y_H - y_{31}$. Тогда для суммы индуктированных напряженностей поля от k -х гармоник токов в фазах найдем

$$\mathcal{E}_k = \sum_{n=1}^3 \mathcal{E}_{nk} = - \sum_{n=1}^3 Z_{mn} \mathcal{I}_{nk} = - \frac{j\omega_k \mu_0}{2\pi} \left\{ \left[\ln \frac{\sqrt{2}b_g^k}{\rho_1} - j \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} \frac{h_1 + h_H}{b_g^k} (1+j) - 0.0772 \right] \sum_{n=1}^3 \mathcal{I}_{nk} - \mathcal{I}_{2k} \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} - \mathcal{I}_{3k} \ln \frac{\rho_3}{\rho_1} + \frac{2}{3} (1+j) \frac{h_{21} \mathcal{I}_{2k} + h_{31} \mathcal{I}_{3k}}{b_g^k} \right\},$$

(2.7)

где $\rho_n = [(h_1 + h_{n1} - h_H)^2 + (y_H - y_{n1})^2]^{1/2}$, $n=1,2,3$ и при записи ρ_1 следует положить $h_{11} = y_{11} = 0$.

Если сумма токов в (2.7) равна нулю, то расчетное выражение упрощается:

$$\mathcal{E}_k = - \frac{j\omega_k \mu_0}{2\pi} \left\{ \left[- \ln \frac{\rho_2}{\rho_1} + \frac{2}{3} (1+j) \frac{h_{21}}{b_g^k} \right] \mathcal{I}_{2k} + \left[- \ln \frac{\rho_3}{\rho_1} + \frac{2}{3} (1+j) \frac{h_{31}}{b_g^k} \right] \mathcal{I}_{3k} \right\}.$$

(2.8)

Это выражение далее используем для расчетов в конкретных примерах.

Пример 1. Определим индуктированные напряженности в точках I' и I'' для стальной опоры (рис.2.3) от основных гармоник тока в фазах, полагая, что сумма их равна нулю.

Высота подвеса проводов и взаимные расстояния для стальной промежуточной опоры П110-4 с проводом АС 240/32 и тросом ПС-50 показаны на рис 2.3. Цепь с проводами 1', 2', 3' отключена, и ремонтируемый

участок длиной l цепи (работа без или с опусканием проводов на землю) заземлен по концам. В первом случае выделим контур, состоящий из одного из фазных проводов (на рис.2.3 – ось провода $1'$), двух заземляющих проводов по концам выделенного участка и линии, их соединяющей через точку $1''$ вдоль провода $1'$. Опустим из точки 1 перпендикуляр к поверхности грунта. Основание перпендикуляра примем за начало декартовой системы координат с осями x, y, z , как показано на рис. 2.3. Смысл остальных обозначений ясен из рис. 2.3, на котором расстояние между проводами, проводов от земли и до троса T даны в метрах.

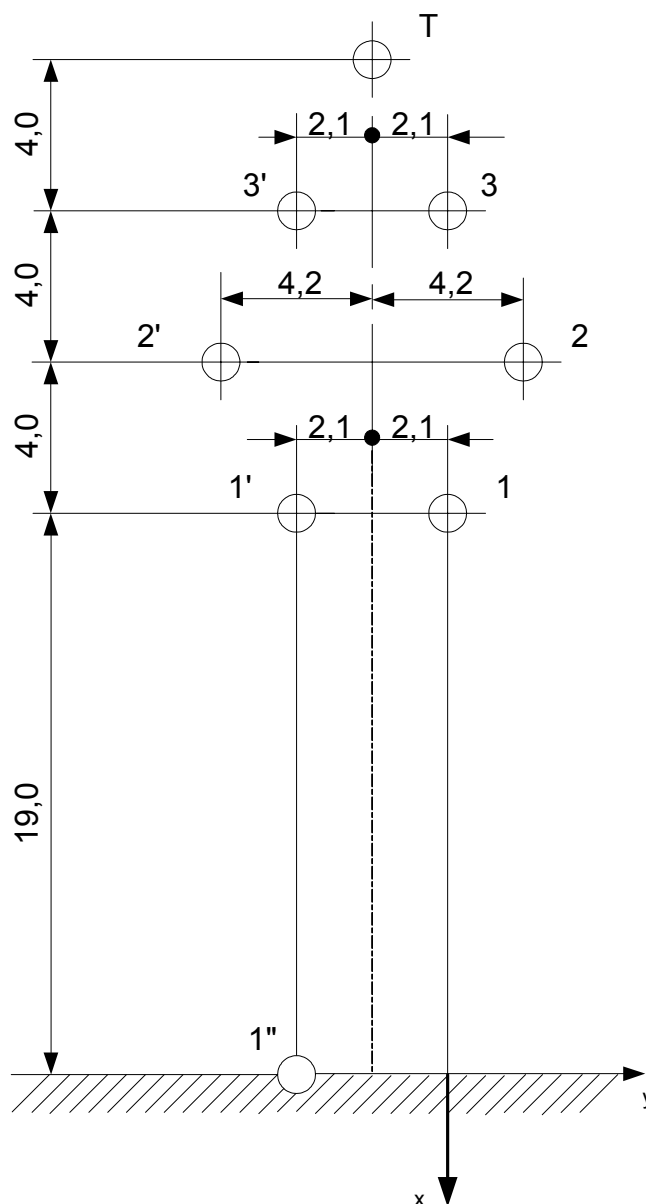


Рис. 2.3

При расчете исходим из формулы (2.8) при $k=1$ и $\rho_1 = 4,20$ м, $\rho_2 = 7,462$ м, $\rho_3 = 9,035$ м для точки I' .

Считаем, что отношения h_{21} и h_{31} к b_g^1 достаточно малы (что, как правило, справедливо) и ими можно пренебречь в первом приближении. Для тока $I_1 = 300$ А и комплексов токов

$$\mathcal{E}_{21,31} = \mathcal{E}_1 \left(-\frac{1}{2} \mu j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

находим в первом приближении, что

$$\mathcal{E}_1(I') = -j18,85 \cdot 10^{-3} (0,682 - j0,144) \text{ В/м}$$

с модулем 13,1 В/км.

Сложнее выбрать значение b_g^1 . Если принять значение $b_g^1 = 500$ м, то при промышленной частоте 50 Гц оно будет соответствовать удельной электропроводности грунта около 0,02 См/м, или удельному сопротивлению 50 Ом/м. Такое значение характерно для диапазона удельных сопротивлений грунтов болотистых, суглинистых и глинистых почв с влажностью 20-40 %. Кроме того, сделанный выбор не противоречит данным об удельном сопротивлении поверхностного слоя грунта, расположенного на вечном мерзлом основании.

При $b_g^1 = 500$ м, известных h_{21} (4 м) и h_{31} (8 м) получим $\mathcal{E}_1(I') = 12,8$ В/км,

что мало отличается от ранее приведенного значения. Действующее значение $\mathcal{E}_1(I'')$ при этом было бы равно 5,4 В/км, учитывая, что для точки I'' $\rho_1 = 19,46$ м, $\rho_2 = 23,85$ м, $\rho_3 = 27,32$ м, а значение тока оставалось неизменным. Предполагая, с другой стороны, значение b_g^1 бесконечно большим, для точки I'' , найдем

$$\mathcal{E}_1(I'') = -j18,85 \cdot 10^{-3} (0,271 - j0,118) \text{ В/м.}$$

с действующим значением 5,6 В/км.

Из этих результатов следует, что при уравновешенной системе токов электрические параметры и структура грунта не оказывают значительного влияния на оценку индуктированной напряженности.

Предположим теперь, что не только основные гармоники тока, но и кривые тока в фазах, будучи изоморфными, смещены относительно друг друга во времени на 1/3 периода. Тогда третьи и кратные им гармоники тока оказываются синфазными и замыкающимися через землю, а формула (2.7) для них может быть записана в виде

$$\mathcal{E}_p = -\frac{j\omega_p \mu_0 I_p}{2\pi} \left\{ 3 \left[\ln \frac{\sqrt{2} b_g^p}{\rho_1} - j \frac{\pi}{4} + \frac{2}{3} (1+j) \frac{h_1 + h_H}{b_g^p} - 0,0772 \right] - \ln \frac{\rho_2 \rho_3}{\rho_1} + \frac{2}{3} (1+j) \frac{h_{21} + h_{31}}{b_g p} \right\},$$

(2.9)

где $p = 3s$ и s принимает значения $1, 2, 3, \dots$,

$$b_g^p = \sqrt{\frac{2}{\omega_p \mu_0 \gamma_p}}$$

(2.10)

и

$$\omega_p = p\omega_1 = 3s\omega_1.$$

Для третьей гармоники тока

$$b_g^3 = b_g^1 / \sqrt{3}.$$

Если значение b_g^1 принято равным 500м, то

$$b_g^3 = 288,68 \text{ м.}$$

(2.11)

Уровни третьей и кратных ей гармоник, как правило, весьма незначительны, но сложение эффектов от действия этих гармоник в фазах и повышение частоты в $3s$ раз могут иметь существенное значение.

Пример 2. Предположим, что значение третьей гармоники составляет 5 % первой гармоники тока с действующим значением 300 А. Определим по формуле (2.9) напряженность электрического поля в тех же точках I' и I'' (рис. 2.3) от третьих гармоник в фазных проводах на опоре П110-4, считая грунт однородным с $b_g^3 = 288,68$ м.

При токе $I_3 = 15$ А имеем

$$\mathcal{E}_3(I') = -j2,827 \cdot 10^{-3} (12,45 - j2,065) \text{ В/м}$$

с действующим значением 35,7 В/км

$$\mathcal{E}_3(I'') = -j2,827 \cdot 10^{-3} (8,52 - j2,20) \text{ В/м}$$

с действующим значением 24,9 В/км.

По сравнению с E_1 напряженность поля увеличилась в 3 раза в точке I' и более чем в 4 раза в точке I'' . Можно отметить, что результаты расчета по формуле (2.9) в значительной степени зависят от параметров грунта.

Определим также напряженность электрического поля от первой и третьей гармоник тока в точке крепления оси троса на стальной опоре (рис.

2.3) , обозначенной буквой T . Приведем приближенное и уточненное значения $E_1(T)$ при $b_g^1 = 500$ м от токов в фазах с $I_1 = 300$ А. При $b_g^1 \rightarrow \infty$ на основании формулы (2.8) и при $\rho_1 = 12.182$ м, $\rho_2 = 9.035$ м, $\rho_3 = 4.518$ м имеем

$$\mathcal{E}_1(T) = -j18,85 \cdot 10^{-3} (-0,645 - j0,60) \text{ В/м}$$

с действующим значением 16,6 В/км.

Уточненный результат расчета при $b_g^1 = 500$ м почти не отличается от предыдущего:

$$\mathcal{E}_1(T) = -j18,85 \cdot 10^{-3} (-0,658 - j0,597) \text{ В/м}$$

с действующим значением 16.7 В/км.

Значение $\mathcal{E}_3(T)$ найдем при тех же условиях, что и при определении $\mathcal{E}_3(I')$ и $\mathcal{E}_3(I'')$. Имеем

$$\mathcal{E}_3(T) = -j2,827 \cdot 10^{-3} (11,969 - j1,982) \text{ В/м}$$

с модулем $E_3(T) \cong 34,3$ В/км.

Возникает вопрос, каковы последствия появления индуктированных напряжений для обслуживающего персонала?

В наших примерах опасность попадания под напряжение возникает в случае разрыва заземленных контуров с проводами фаз и троса. При заземлении в одном месте опасность попадания под напряжение может возникнуть на удаленном конце от места замыкания в случае прикосновения к проводу. Рассмотрим первое утверждение подробнее. В случае разрыва контура (рис. 2.4) и при прикосновении к обеим частям провода в месте разрыва ремонтник попадает под напряжение по пути AmB , как это условно показано на этом же рисунке, где l_1 и l_2 – длины участков между точками разрыва и точками I' . При опускании провода на землю и в случае разрыва заземленного контура ремонтник может попасть под напряжение по пути CqD (рис. 2.4). Сумма падений напряжения вдоль контура с AmB равна

$$\begin{aligned} \oint \mathcal{E}_1 dl &= -j\omega \Phi = -j\omega [A(I') - A(I'')](l_1 + l_2) = [E(I') - E(I'')](l_1 + l_2) = \\ &= U_{AmB} + U_{B'I''} + U_{I''dI'} + U_{I'I'A}. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Но напряжение вдоль проводников по пути $B'I''$ и $I''I'A$ равно нулю, а напряжение вдоль грунта по пути $I''dI''$

$$U_{I''dI''} = -E(I'')(l_1 + l_2) = -E(I'')l.$$

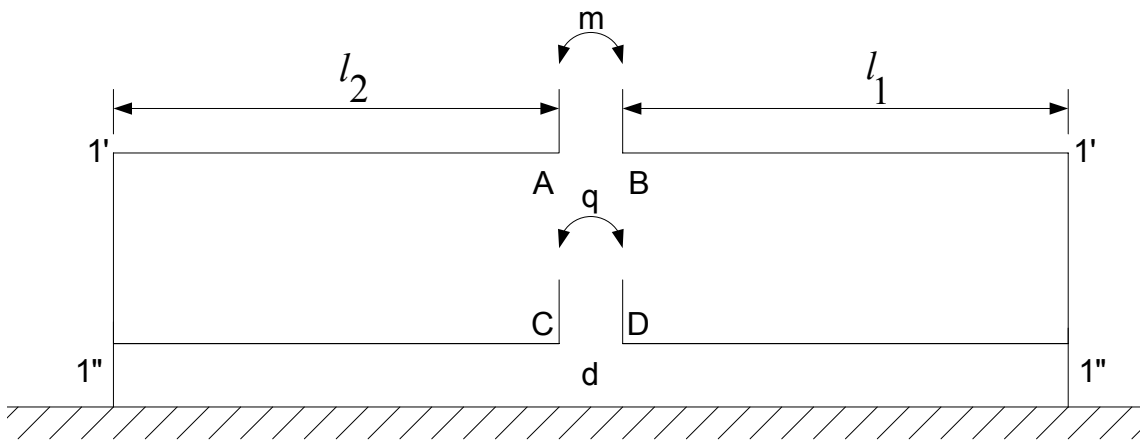


Рис. 2.4

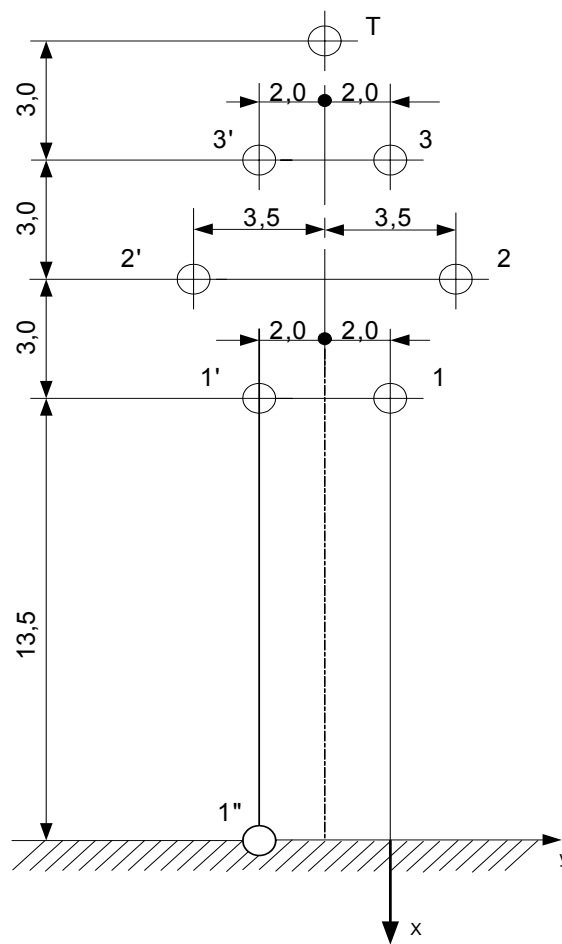


Рис. 2.5

Поэтому

$$U_{AmB} = E_1'(l_1 + l_2) = E_1' l. \quad (2.13)$$

Для контура с участком CqD потоком \mathcal{E} можно пренебречь, и тогда

$$U_{CqD} = E_1'' l \quad (2.14)$$

Следовательно, напряжения U_{CqD} , U_{AmB} и U_T для троса в месте разрыва в моменты прикосновения, например в процессе восстановления, или ремонта при длине участка $l=1$ км, могут иметь следующие значения: $U_{CqD} = 25,5$ В, $U_{AmB} = 31,9$ В, $U_T = 38,15$ В, что близко к значению безопасного напряжения (42—50 В).

Пример 3. На рис. 2.5 приведена схема расположения осей проводов на железобетонной промежуточной двухцепной опоре ПБ 110-4 (расстояния даны в метрах). Штрихпунктирная линия – вертикальная ось опоры; остальные обозначены как на рис. 2.3.

Для железобетонной опоры при вычислении напряженности электрического поля в точке I' следует принять $\rho_1 = 4$ м, $\rho_2 = 6,265$ м, $\rho_3 = 7,211$ м; в точке I'' – $\rho_1 = 14,08$ м, $\rho_2 = 17,392$ м, $\rho_3 = 19,906$ м; на оси троса – $\rho_3 = 9,22$ м, $\rho_3 = 6,946$ м, $\rho_3 = 3,606$ м.

При $b_g^1 = 500$ м и токе $I_1 = 300$ А найдем

$$E_1'(I') = -j18,85 \cdot 10^{-3} (0,51 - j0,124) \text{ В/м}$$

с действующим значением 9,89 В/км;

$$E_1''(I'') = -j18,85 \cdot 10^{-3} (-0,658 - j0,597) \text{ В/м}$$

с действующим значением 5,54 В/км;

$$E_1'(T) = -j18,85 \cdot 10^{-3} (-0,62 + j0,565)$$

с модулем 15,81 В/км.

Напряженности электрического поля от 5 %-ной третьей гармоники тока в точках I' , I'' и на оси троса при $b_g^3 = 288,68$ м соответственно равны

$$E_3'(I') = -j2,827 \cdot 10^{-3} (12,815 - j2,148) \text{ В/м}$$

с действующим значением 36,7 В/км;

$$E_3(I'') = -j2,827 \cdot 10^{-3} (9,426 - j2,242) \text{ В/м}$$

с действующим значением 27,4 В/км;

$$E_3(I) = -j2,827 \cdot 10^{-3} (12,632 - j2,086) \text{ В/м}$$

с действующим значением (модулем) 36,2 В/км.

Действующее значение напряженности в точках I' , I'' и на оси троса от совместного действия тока $I_1 = 300 \text{ А}$ и тока $I_3 = 15 \text{ А}$ предлагаем определить читателю.

Глава 3 Нормирование и стандартизация в области ЭМС

3.1. Основные определения и требования некоторых нормативных документов по ЭМС

Согласно ГОСТ Р 51317.2.4-2000 (МЭК 61000-2-4-94)[19], в котором дана классификация уровней электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промпредприятий, термин “ЭМС технических средств (ТС)” определен как способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам. Под уровнем ЭМС понимается установленный максимальный уровень помехи, который может воздействовать на ТС в конкретных условиях эксплуатации. Введены также термины “Точка общего присоединения (ТОП)” и “Точка внутрипроизводственного присоединения (ТВП)”. Термин ТОП относится к точке электрической сети общего назначения, электрически ближайшей к сетям рассматриваемого потребителя электрической энергии (входным устройствам рассматриваемого приемника электрической энергии), к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей (входные устройства других приемников).

Точка внутрипроизводственного присоединения (ТВП)- точка присоединения к питающей сети внутри рассматриваемой системы электроснабжения.

В стандарте рассматриваются и определяются три класса из возможных классов электромагнитной обстановки:

- класс 1- для электромагнитной обстановки в защищенных системах электроснабжения, характеризующихся уровнями ЭМС более низкими, чем уровни ЭМС в системах электроснабжения общего назначения. Он соответствует применению ТС, восприимчивых к помехам в питающей сети, например, контрольно-измерительного оборудования, образцов вычислительной техники некоторых видов и т. д.

- класс 2. Данный класс обычно применяется для электромагнитной обстановки в ТОП и ТВП для промышленных условий эксплуатации ТС. Уровни ЭМС данного класса идентичны таковым для систем электроснабжения общего назначения.

- класс 3. Данный класс применяется только для ТВП в промышленных условиях эксплуатации ТС. Он имеет более высокие уровни ЭМС, чем таковые для класса 2 в отношении некоторых электромагнитных явлений, вызывающих помехи. К классу 3 должна быть отнесена электромагнитная обстановка, если имеет место одно из следующих условий:

- питание большей части нагрузки осуществляется через преобразователи;

- используется электросварочное оборудование;

- имеют место частые пуски электродвигателей большой мощности;
- имеют место резкие изменения нагрузок в электрических сетях.

ГОСТ Р 51317.2.5-2000 (МЭК 61000-2-5-95)[20] устанавливает классификацию электромагнитных помех, вызванных электромагнитными явлениями и процессами, определяющими электромагнитную обстановку, применительно к различным местам размещения электротехнических, электронных и радиоэлектронных изделий, оборудования и систем далее ТС.

В стандарте встречаются следующие определения:

- уровень помехоустойчивости- максимальный уровень данной электромагнитной помехи, воздействующий на конкретное ТС, при котором сохраняется требуемое качество функционирования ТС.
- место размещения ТС- место установки или применения ТС, характеризующееся различаемыми условиями электромагнитной обстановки.
- класс мест размещения ТС- совокупность мест размещения ТС, имеющих общие свойства, относящихся к типам и особенностям применения ТС, включая условия установки и влияния внешних электромагнитных помех.

Стандарт устанавливает три категории электромагнитных помех, характеризующих электромагнитную обстановку:

- низкочастотные электромагнитные помехи (кондуктивные и излучаемые), вызываемые любым источником кроме электростатических разрядов;
- высокочастотные электромагнитные помехи (кондуктивные и излучаемые), вызываемые любым источником кроме электростатических разрядов;
- электростатические разряды.

Понятие “низкие частоты” относится к диапазону частот ниже 9 кГц, выше 9 кГц и много больше относится к понятию “высокие частоты”.

Излучаемые электромагнитные помехи возникают в пространстве, окружающем ТС, в то время как кондуктивные распространяются в проводящих средах. К электромагнитным помехам низкочастотного кондуктивного происхождения относятся:

- гармоники, интергармоники напряжения электропитания;
- напряжения сигналов по системам электропитания;
- колебания, отклонения, провалы и выбросы (кратковременные перенапряжения);
- несимметрия напряжения в трехфазных системах электроснабжения;
- изменения частоты питающего напряжения;
- наведенные низкочастотные напряжения;
- постоянные составляющие в сетях электропитания переменного тока.

К низкочастотным электромагнитным помехам относятся низкочастотные магнитные и электрические поля.

К кондуктивным высокочастотным помехам относятся наведенные напряжения, быстротекущие апериодические и колебательные переходные процессы.

Излучаемые высокочастотные электромагнитные помехи – быстропеременные электромагнитные поля.

В данном стандарте установлены следующие градации интенсивности электромагнитной помехи: А – как контролируемой, поддающейся регулированию электромагнитной обстановки, 1, 2, 3, 4 ..., и X как естественных электромагнитных обстановок, из которых X характеризуется как жесткая электромагнитная обстановка.

В качестве примера в таблицах 3.1 и 3.2 приведены уровни низкочастотных помех обусловленных магнитными и электрическими полями, в зависимости от установленной стандартом степени интенсивности, при различных частотах.

Таблица 3.1 Уровни электромагнитных помех от низкочастотных магнитных полей (в А/м)

Степень интенсивности электромагнитной помехи	Частота помехи				
	Постоянный ток	Частота электрической тяги	Промчастота 50 Гц	Гармоника основной частоты (0,1-3 кГц)	Частоты, не связанные с основной частотой сети
А	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида				
1	3	3	3	3/n	0,015
2	10	3	10	10/n	0,05
3	30	10	30	30/n	0,15
4	100	30	100	100/n	0,5
Х	В соответствии с характеристиками места размещения ТС				

Примечания. В графе постоянный ток указаны напряженность магнитного поля в дополнение к магнитному полю Земли (в среднем 0,5 эрстед или 40 А/м) на одном метре от земли. В графе с электрической тягой данные относятся к расстоянию 20 метров от колеи. В графе промчастота данные относятся к воздушным линиям передач на одном метре от земли.

Таблица 3.2

**Уровни электромагнитных полей от низкочастотных электрических полей
(в кВ/м), на высоте 1 м. над землей**

Степень интенсивности электромагнитной помехи	Источник электромагнитной помехи		
	Линии постоянного тока	Линии при частоте $16^{2/3}$ Гц	Линии при частоте 50 Гц
А	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида		
1	0,1	0,1	$\leq 0,1$
2	1	0,3	≤ 1
3	10	1,0	≤ 10
4	20	3,0	≤ 20
Х	В соответствии с характеристиками места размещения ТС		

В первой графе последнего столбца (не считая строки А) данные характеризуют уровень электромагнитной обстановки в жилых помещениях вдали от воздушных линий передач. Вторая графа этого же столбца характеризует электромагнитную обстановку внутри помещений под ВЛ напряжением до 765 кВ. Третья – вне помещений для ВЛ до 400 кВ. Последняя – для ВЛ до 765 кВ.

В конце этой главы в виде приложений 3.1-3.3 приведены предельно-допустимые уровни для магнитных полей, воздействия электрического поля промышленной частоты на население от ЛЭП и временно-допустимые уровни воздействия электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи.

ГОСТ Р51317.4.11-99 (МЭК 6100-4-11-94)[21] распространяется на электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия и оборудование (далее ТС), подключаемые к низковольтным электрическим сетям переменного тока (≤ 1000 В), и устанавливает степени жесткости и методы испытания на устойчивость к воздействию динамических изменений электропитания следующего вида:

- провалов,
- прерываний,
- выбросов.

Динамическое изменение напряжения электропитания – это помеха, представляющая собой ступенчатое кратковременное отклонение напряжения электропитания за регламентированный нижний или верхний

предел, длительностью от полупериода частоты переменного тока до нескольких секунд с последующим возвращением к исходному значению.

Вид и степени жесткости испытаний сгруппированы в табл. 3.3.

Как записано в стандарте, множество и разнообразие испытываемого оборудования и систем затрудняют установление единой оценки их реакции на воздействие провалов, прерываний и выбросов напряжения. Установлены критерии качества функционирования ТС в виде А, В, С, D:

- А – нормальное функционирование в соответствии с установленными требованиями;
- В – временное ухудшение или потеря функции или работоспособности с самовосстановлением;
- С – временное ухудшение или потеря функции или работоспособности, которые требуют вмешательства оператора или перезапуска системы;
- D – ухудшение или потеря функции, которая не может быть восстановлена из-за повреждения оборудования (компонентов) или программного обеспечения или потери данных.

Как правило, результаты испытаний считаются положительными, если испытываемое техническое средство (ИТС) сохраняет помехоустойчивость с заданным качеством функционирования в течение всего периода воздействия помех, а после испытаний ИТС соответствует функциональным требованиям, установленным в технической документации.

В технической документации на ИТС могут быть указаны нарушения функционирования при воздействиях помех, которые рассматриваются как незначительные и допустимые.

Таблица 3.3

Вид и параметры испытательного воздействия

Вид динамических изменений напряжения электропитания	Степень жесткости испытаний	Параметры испытательного воздействия		
		Испытательное напряжение, $\%U_H, \pm 5\%$	Амплитуда динамических изменений напряжения, $\%U_H$	Длительность динамических изменений напряжения периоды, (мс)
Провалы напряжений	1	70	30	10
	2	70	30	25
	3	70	30	50
	4	70	30	100
	x (открытая степень жесткости)	Специальное	Специальная	Специальная
Прерывания напряжения	1	0	100	1
	2	0	100	5
	3	0	100	10
	4	0	100	25
	x	Специальное	Специальная	Специальная
Выбросы напряжения	1	120	20	10
	2	120	20	25
	3	120	20	50
	4	120	20	100
	x	Специальное	Специальная	Специальная

3.2. Изменение напряжения в точке общего присоединения при подключении емкостной нагрузки

Как отмечено в упомянутом ГОСТ Р 51317.2.4-2000(МЭК 61000-2-4-94), точки присоединения к питающей сети внутри рассматриваемой системы электроснабжения должны быть разделены на категории в соответствии с уровнями электромагнитной совместимости. Для того чтобы обосновать выбор конкретных ТС, например батарей сетевых конденсаторов, может потребоваться, как сказано в ГОСТе, конкретное описание изменения напряжения на зажимах ТС. При коммутации батарей конденсаторов возникает скачкообразное изменение напряжения в точке присоединения до значения напряжения на емкости (в том числе и до нуля) с последующим переходом к новому установившемуся напряжению, который может носить как колебательный, так и аperiodический характер. В качестве примера рассмотрим процесс изменения напряжения в точке общего присоединения активной нагрузки после подключения к ней емкостной нагрузки.

Будем считать, что источник питания характеризуется внутренней индуктивностью L . В момент замыкания ключа (рис.3.1) - рисунок приведен в конце параграфа, начальные условия могут быть записаны в виде

$$I_{L0} = i(0), U_{C0} = u_C(0).$$

После замыкания ключа для операторных изображений токов имеем

$$I(p) = I_C(p) + I_R(p), I_R(p) = \frac{U_C(p)}{R} \cdot I(p).$$

Поскольку

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} \text{ и } U_L = L \frac{di}{dt}, \text{ то}$$

$$I_C(p) = pCU_C(p) - CU_{C0}, U_L(p) = pLI(p) - Li_{L0}.$$

Тогда

$$E(p) = U_L(p) + U_C(p) = -Li_{L0} + pL[I_C(p) + I_R(p)] + U_C(p),$$

где $E(p)$ - операторное изображение ЭДС.

Подставляя предыдущие выражения и решая уравнение относительно $U_C(p)$, найдем

$$U_C(p) = \frac{\omega_0^2 E(p) + i_{L0} / C + pU_{C0}}{p^2 + p/\tau + \omega_0^2},$$

(3.1)

где

$$\omega_0^2 = (LC)^{-1} \text{ и } \tau = RC.$$

До момента включения емкости

$$U_R(t) = i(t)R = \frac{E_m R}{Z} \sin(\omega t + \psi_i),$$

где

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \psi_i = \psi_E - \varphi$$

и

$$\operatorname{tg} \varphi = \omega L / R$$

При этом ψ_E можно положить равным нулю.

Моменту включения емкости соответствует фаза тока $\psi_{ВКЛ}$, и этому моменту отвечает значение тока

$$\frac{E_m \sin \psi_{BKЛ}}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = i_{L0}$$

Найдем напряжение $U_C(t) = U_R(t)$, операторное изображение которого определяется выражением (3.1). Из предыдущего вытекает, что в момент включения емкости фаза ЭДС будет равна $\psi_E = \psi_{BKЛ} + \varphi$

Тогда

$$E(p) = E_m \frac{p \sin \psi_E + \omega \cos \psi_E}{p^2 + \omega^2}$$

и

$$U_C(p) = \omega_0^2 E_m \frac{p \sin \psi_E + \omega \cos \psi_E}{(p^2 + \omega^2)(p^2 + p\tau^{-1} + \omega_0^2)} + \frac{i_{L0} / C}{p^2 + p\tau^{-1} + \omega_0^2} + \frac{pU_{C0}}{p^2 + p\tau^{-1} + \omega_0^2}$$

(3.2)

Пользуясь теоремой разложения, найдем, что для первого члена в (3.2) изменение во времени будет происходить в соответствии с выражением

$$U_{C1}(t) = \omega_0^2 E_m \sum_K \frac{G_1(p_K)}{H_1(p_K)} \exp(p_K t),$$

(3.3)

где

$$G_1(p) = p \sin \psi_E + \omega \cos \psi_E, \quad H_1(p) = (p^2 + \omega^2)(p^2 + p\tau^{-1} + \omega_0^2),$$

суммирование происходит по корням $H_1(p)$ и штрих означает производную этого выражения по p .

Здесь

$$p_{1,2} = -0,5\tau^{-1} \pm 0,5\tau^{-1} \sqrt{1 - (2\tau\omega_0)^2}, \quad p_{3,4} = \pm j\omega, \quad (k = 1 \div 4).$$

Ограничимся случаем, когда $2\tau\omega_0 > 1$ и $p_{1,2} = 0,5\tau^{-1}(-1 \pm j\Delta)$, где $\Delta = \sqrt{(2\tau\omega_0)^2 - 1}$.

Отсюда

$$G_1(p_{3,4}) = \omega \exp(\pm \psi_E), \quad H_1'(p_{3,4}) = \pm 2j\omega(\omega_0^2 - \omega^2 \pm j\omega\tau^{-1}),$$

$$G_1(p_{1,2}) = -0,5\tau^{-1}(-1 \pm j\Delta) \sin \psi_E + \omega \cos \psi_E,$$

$$H_1'(p_{1,2}) = [0,5\tau^{-1}(-1 \pm j\Delta) + \omega^2](\pm \tau^{-1} j\Delta).$$

$$U_{C1}(t) = \omega_0^2 E_m 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{0,5\tau^{-1}(-1 + j\Delta) \sin \psi_E + \omega \cos \psi_E}{\tau^{-1} j\Delta [(-0,5\tau^{-1} + 0,5\tau^{-1} j\Delta)^2 + \omega^2]} \exp[0,5\tau^{-1}(-1 + j\Delta)t] \right\} +$$

$$+ \omega_0^2 E_m \operatorname{Re} \left[\frac{\exp(j\psi_E)}{j(\omega_0^2 - \omega^2 + j\omega\tau^{-1})} \exp(j\omega t) \right].$$

(3.4)

Для второго члена выражения (3.4) легко получаем

$$U_{Cy}(t) = \frac{\omega_0^2 E_m}{[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (\omega\tau^{-1})^2]^{1/2}} \sin(\omega t + \psi_E - \varphi_{II}) = \frac{E_m R}{Z_{II}} \sin(\omega t + \psi_{BKЛ} + \varphi - \varphi_{II})$$

где $\operatorname{tg} \varphi_{II} = \frac{\omega}{\tau(\omega_0^2 - \omega^2)}$ и $Z_{II} = [R^2(1 - \omega^2 LC)^2 + (\omega L)^2]^{1/2}$.

Соответственно для первого члена выражения (3.4) после ряда преобразований найдем:

$$U_{C1}(t) = \frac{E_m R}{Z_n} \{-\sin(\psi_{вкл} + \varphi - \varphi_n) \cos(\Delta t / 2\tau) \exp(-t / 2\tau) - \Delta^{-1} [\sin(\psi_{вкл} + \varphi - \varphi_n) + 2\tau\omega \cos(\psi_{вкл} + \varphi - \varphi_n)] \sin(\Delta t / 2\tau) \exp(-t / 2\tau)\} \quad (3.5)$$

Общий результат можно записать в следующем виде:

$$U_C(t) = U_{Cy}(t) + U_{CII}(t) = U_{Cy}(t) + U_{C1}(t) + U_{C2}(t) + U_{C3}(t), \quad (3.6)$$

где

$$U_{C2}(t) = 2i_{L0} R \Delta^{-1} \sin\left(\frac{\Delta t}{2\tau}\right) \exp\left(\frac{-t}{2\tau}\right),$$

$$U_{C3}(t) = U_{C0} \left[\cos\left(\frac{\Delta t}{2\tau}\right) - \Delta^{-1} \sin\left(\frac{\Delta t}{2\tau}\right) \right] \exp\left(\frac{-t}{2\tau}\right),$$

(3.7)

и

$$\operatorname{tg} \varphi_{II} = \frac{\omega L}{(1 - \omega^2 LC)R}.$$

Пусть $L = 0,1 \text{ мГн}$ и $C = 25 \text{ мкФ}$, и следовательно, $\omega_0 = 2 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. Полагая $R = 30 \text{ Ом}$, находим, что $\Delta \approx 30$. Поэтому качественный ход графика для изменения напряжения при $U_{C0} = 0$ и $\psi_{вкл} = \pi/2$ выглядит так, как показано на рис. 2. При этом высокочастотный колебательный процесс практически полностью затухнет на протяжении четверти периода промышленной частоты.

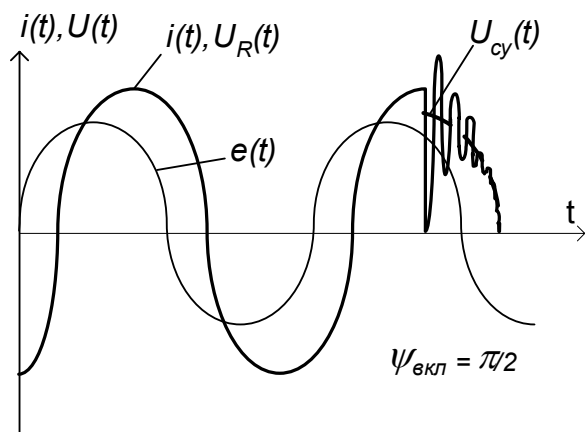
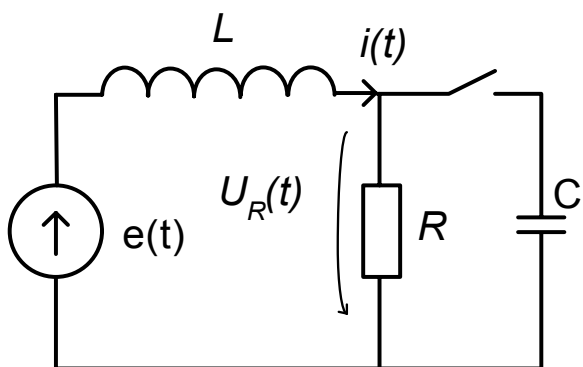


Рис. 3.1

Рис. 3.2

Заметим, что выбор значений первичных параметров в рассмотренном примере произведен только по соображениям большей наглядности и исключения ряда второстепенных деталей.

В заключение этой главы приводим в виде приложений 3.1-3.3 предельно – допустимые уровни для постоянных магнитных и переменных полей промышленной частоты и временно-допустимые уровни для электромагнитных излучений, создаваемых системами сотовой радиосвязи.

**Предельно допустимые уровни
(ПДУ) для магнитных полей (МП)**

Частота МП	Измеряемая величина, единица	Нормируемое значение ПДУ воздействия		
Постоянное магнитное поле	Напряженность магнитного поля Н, кА/м. Магнитная индукция в Тл (мТл)	Н=8кА/м В=0,01Тл (10 мТл) (ПДУ воздействия постоянных магнитных полей при работе с магнитными устройствами и магнитными материалами, № 174277 Минздрав СССР. М. 1977)		
Магнитное поле промышленной частоты (МППЧ) (50 Гц)	Напряженность магнитного поля Н, кА/м Плотность потока магнитной индукции в Тл (мТл)	Непрерывное воздействие		
		Время пребывания, ч	При общем воздействии Н, кА/м	При локальном воздействии Н, кА/м
		≤ 1	1,60	6,4
		2	0,80	3,2
		4	0,40	1,6
		8	0,08	0,8
(Сан ПИН 2.2.4-98 Минздрав РФ. М. 1998)				

Приложение 3.2

Допустимые уровни воздействия электрического поля промышленной частоты на население от ЛЭП (по СНиП 2971-84)

ПДУ ЭППЧ кВ/м	Условия экспозиции
0,5	Внутри жилых зданий
1,0	На территории зоны жилой застройки
5,0	В населенной местности вне зоны жилой застройки, а также на территории огородов и садов
10,0	На участках пересечения ВЛ с автомобильными дорогами
15,0	В ненаселенной местности
20,0	В труднодоступной местности и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения

**Временно допустимые уровни (ВДУ)
воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ),
создаваемых системами сотовой радиосвязи.**

Категория облучаемых	Величина ВДУ ЭМИ	Примечания
Облучение населения, проживающего на прилегающих территориях антенн базовых станций	Плотность потока энергии за единицу времени (ППЭ _{пду}) ППЭ _{пду} = 10 мкВт/см ²	(ГН 2.1.8/2.2.4.019-94) Условия измерения: Измерения ППЭ производится на расстоянии от источника ЭМИ до головы человека, подвергающегося воздействию
Облучение пользователей радиотелефонов	ППЭ _{пду} = 100 мкВт / см ²	

Глава 4. Параметры молнии и молниезащита

4.1. Краткая характеристика параметров молниевом разряда

Статистические данные по молниевому разряду в настоящее время изучены достаточно подробно, по-крайней мере, для нисходящих молний отрицательной полярности, т. е. молний, несущих отрицательный заряд. К существенным параметрам молниевом разряда относятся пиковое значение тока, форма волны тока при обратном (возвратном) ударе и скорость его распространения, полный переносимый заряд, а также интеграл квадратичного тока (интеграл действия тока).

Здесь ограничимся кратким описанием статистического распределения тока возвратного удара, следуя в основном изложению вопроса в вышедшей недавно обзорной статье [22].

Установлено, что распределение тока подчиняется логарифмически-нормальному закону. Это означает, что нормальному закону подчинена не случайная величина X , - в нашем случае пиковое значение тока, а величина Y , причем

$$y = \ln x.$$

Отсюда вытекает равенство элементов вероятностей [23]

$$p_Y(y)dy = p_X(x)dx, \quad (4.1)$$

и если $p_Y(y)$ - плотность вероятности нормального закона распределения величины Y , то из (4.1) немедленно следует, что

$$p_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi x} \sigma_{\ln x}} \exp \left[-0,5 \left(\frac{\ln x - \ln x_1}{\sigma_{\ln x}} \right)^2 \right], \quad (4.2)$$

где $\sigma_{\ln x}$ - стандартное отклонение для $\ln x$, а $\ln x_1$ - математическое ожидание или среднее значение.

Учитывая, что числитель выражения под знаком экспоненты в круглых скобках может быть записан как

$$\ln \frac{x}{x_1},$$

то математическое ожидание случайной величины $\ln \frac{x}{x_1}$ равно нулю, достигаемое при $x = x_1$. Поскольку при этой величине имеем и медиану распределения для Y , то, очевидно, что $x_1 = x_{med}$ для распределения величины X .

Подставим в (4.2)

$$u = \frac{\ln x - \ln x_{med}}{\sqrt{2}\sigma_{\ln x}}. \quad (4.3)$$

Тогда вероятность того, что случайная величина окажется в интервале (u_0, ∞) , где

$$u = \frac{\ln x_0 - \ln x_{med}}{\sqrt{2}\sigma_{\ln x}},$$

будет равна

$$P_c(u_0) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{u_0}^{\infty} e^{-u^2} du = 0,5 \operatorname{erfc}(u_0) = 0,5(1 - \operatorname{erf}(u_0)). \quad (4.4)$$

Здесь $\operatorname{erfc}(u_0)$ - функция ошибок или интеграл вероятности, чаще обозначаемый как $\Phi(u_0)$ при видоизмененной форме записи интеграла [23,24].

Таким образом, оценка кумулятивной вероятности $P_c(I_m)$, где I_m - пиковое (максимальное) значение тока обратного разряда в кА для молнии отрицательной полярности, может быть осуществлена в соответствии с (4.4), когда вместо x в (4.3) подставляется I_m , а вместо x_{med} - I_{med} .

В [22] I_{med} принято равным 31,1 кА, а $\sigma = 0,48$.

Наиболее просто кумулятивная вероятность $P_c(I_m)$ может быть подсчитана по формуле, предложенной Андерсоном [25]:

$$P_c(I_m) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_m}{31}\right)^{2,6}}. \quad (4.5)$$

Вероятности, подсчитанные по формулам (4.4) с использованием значений интеграла вероятности [24,26] и формуле (4.5), сведены в таблицу.

Таблица 4.1

Сравнение значений кумулятивной вероятности $P_c(I_m)$

I_m (кА)	10	20	31	40	50	60
Формула (4)	0,99	0,82	0,5	0,3	0,24	0,17
Формула (5)	0,95	0,76	0,5	0,34	0,22	0,15

Как видно, разница незначительна.

Медианы и стандартные отклонения распределения пикового тока I_m , длительности переднего фронта T_ϕ и максимальной крутизны $\left(\frac{di_M}{dt}\right)_m$ для возвратного удара даны в табл. 4.2.

Значения параметров распределений

Таблица 4.2

Параметр	Медиана	Стандартное отклонение σ
I_m , кА	31,1	0,48
T_ϕ , мкс	3,83	0,55
$\frac{di_M(t)}{dt}$, кА/мкс	24,3	0,60

Коэффициент корреляции ρ_c между I_m и T_ϕ принимается равным 0,47 [22].

4.2. Форма базового тока молниевых разрядов

Удар молнии в молниеприемник может вызвать опасные перенапряжения в молниезащитной системе, а также между ней и окружающими объектами. Перенапряжения могут иметь место и при прямом поражении молнией различных конструкций, например опор линий электропередач, штыревых антенн радиоэлектронных средств и др. Характер изменения для относительно невысоких приемников в течение прохождения тока молнии может быть определен на основании выражения

$$U(t) = i_M(t)R_g + L'l_{ab} \frac{di_M}{dt},$$

где R_g - сопротивление заземления ($R_g = 4-10$ Ом) и более в случае сопротивление опоры, l_{ab} - высота опоры или дипольной антенны, L' - погонная индуктивность, выбираемая от 0,6 до 1,5 мкГн/м [27,28].

Отсюда ясно, какое важное значение приобретают данные по пиковым значениям тока, максимальной крутизне и длительности различных стадий процесса обратного разряда на уровне земли, т. е. то, что в литературе принято называть характеристикой базового тока молнии. В справочнике [27]

перечислены все наиболее известные аналитические описания базового тока молнии.

Отметим биоэкспоненциальную форму базового тока:

$$i_M(t) = I_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}),$$

где для первого разряда I_m можно принять равным 30 кА,

$$\alpha = 2 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}, \beta = 2 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}.$$

Другая аппроксимация формы импульса базового тока задается отдельно для переднего фронта и спада импульса:

$$i_M(t) = \begin{cases} \frac{I_m \left(\lambda^{t/T_1} - 1 \right)}{\lambda - 1}, & t \leq T_1 \\ I_m \exp(-\beta(t - T_1)), & t \geq T_1 \end{cases}$$

где T_1 - время от начала разряда до достижения пикового значения тока I_m , λ - отношение двух значений крутизны фронта для моментов времени, близкого к $t = 0$ и к T_1 .

В настоящее время нашло применение описание переднего фронта импульса тока в следующем упрощенном виде [29]:

$$i_M(t) = \frac{I_m}{\eta} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1} \right)^n}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1} \right)^n}, 0 \leq t \leq T_1.$$

где n - фактор крутизны, изменяющийся в пределах $n = 2(1)10$.

Корректирующий множитель записывается в виде

$$y = \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^n / \left[1 + \left(\frac{T_1}{\tau_1} \right)^n \right],$$

где T_1 , как и прежде, является временем от начала до достижения пикового тока.

Можно показать, что максимальная крутизна определяется выражением

$$\left(\frac{di_M(t)}{dt} \right)_{MAX} = \frac{I_M}{\eta} \frac{n}{4\tau_1} f_2(n),$$

$$\text{где } f_2(n) = \frac{n^2 - 1}{n^2} \left[\frac{(n+1)}{(n-1)} \right]^{1/2}.$$

Если ввести отношение максимальной крутизны к крутизне I_m/T_1 , соответствующей косоугольной форме фронта импульса, а именно

$$Y = \left(\frac{di_M(t)}{dt} \right)_{MAX} \frac{T_1}{I_M} = \frac{T_1}{\tau_1} y^{-1} \frac{nf_2(n)}{4},$$

то построив кривые зависимости Y от T_1/τ_1 в диапазоне изменения значений n , можно конкретизируя n, I_m, T_1 и $\left(di_M/dt \right)_{MAX}$ найти T_1/τ_1 , а следовательно, и неизвестную величину τ_1 . Кривые зависимостей Y от T_1/τ_1 и n для упрощенной формы построены в [29], и здесь не воспроизводятся.

Отметим, что ток молнии в момент достижения максимальной крутизны будет равен $\left(I_m/\eta \right) f_3(n)$, где $f_3(n) = (n-1)/n$.

4.3. Кондуктивное влияние растекающегося тока молнии на линии связи

Предположим, что ток молниевых разряда протекает через опору ВЛ или токоотвод молниезащитной системы в землю. Допустим, что ток вытекает (растекается) через поверхности в земле при соблюдении сферической симметрии для вектора плотности тока. Тогда плотность тока направлена по радиусу к центру растекания и не зависит как от азимутального угла Θ , так и от полярного угла φ (рис. 4.1).

Однако это предположение практически выполняется лишь на некотором удалении от вертикального токоотвода. Вблизи места растекания следует учитывать скругление линий тока.

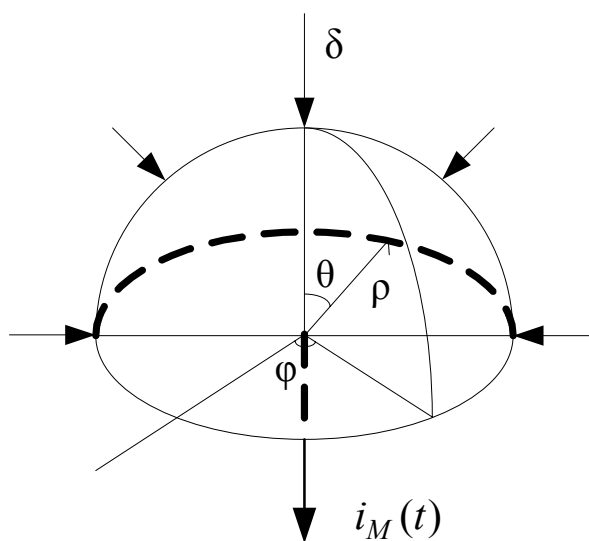


Рис. 4.1

При упомянутом допущении можно записать

$$\delta_M(t) = -\frac{i_M(t)}{2\pi\rho^2}.$$

Отсюда

$$E(\rho) = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g\rho^2}, \quad (4.6)$$

где σ_g - удельная электропроводность грунта

Для межблочной несимметричной линии связи (рис. 4.2) вдоль радиуса ρ расстояние от центра до блока a с оконченным сопротивлением R_a равно ρ_a , до блока b сопротивлением R_b - ρ_b . Блоки заземлены с обоих концов. Длина линии равна $\rho_b - \rho_a = l_{ab}$

Учитывая (4.6), напряжение между блоками по цепи заземления равно

$$U_{ab}(t) = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g} \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_b} \right) = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g} \left(\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{\rho_a + l_{ab}} \right) \quad (4.7)$$

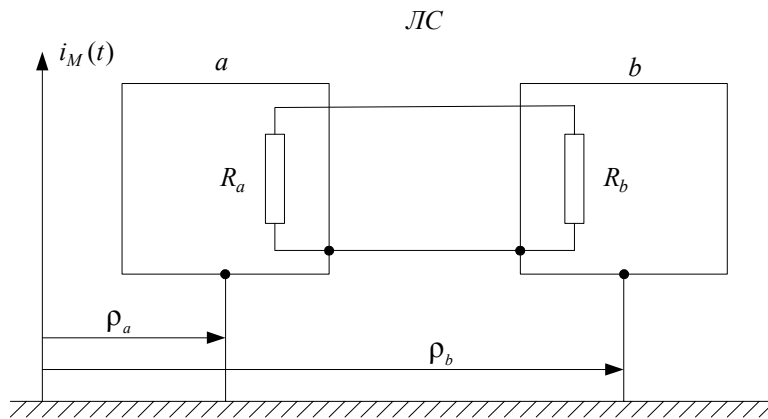


Рис. 4.2

Приведем (4.7) к виду

$$U_{ab}(t) = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g} \frac{l_{ab}}{\rho_a(\rho_a + l_{ab})} \quad (4.8)$$

Соответственно ток помехи будет определяться выражением

$$i_{II}(t) = \frac{i_M(t)l_{ab}}{2\pi\sigma_g(R_a + R_b)\rho_a(\rho_a + l_{ab})} \quad (4.9)$$

Те же самые соображения могут быть применены и для случая коаксиального кабеля, соединенного по схеме (рис. 4.3)

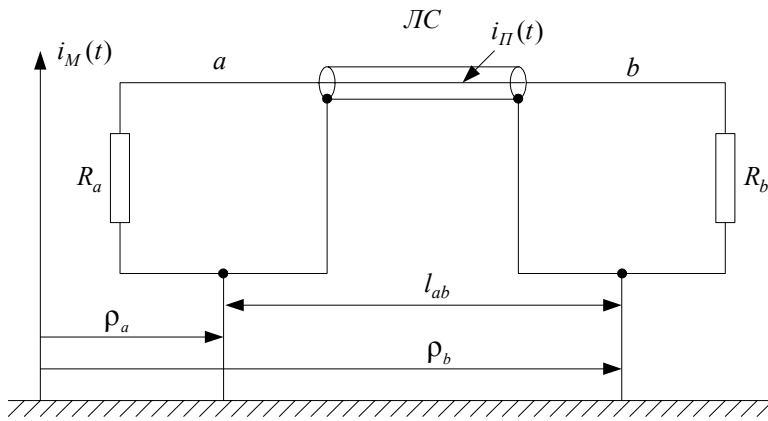


Рис. 4.3

При ориентации линии связи, показанной на рис. 4.4, где ρ_a представляет собой кратчайшие расстояния от центра растекания до одного из заземленных концов, а линия связи располагается таким образом, что текущее расстояние ρ_b до элемента d_x на линии, соединяющей точки a и b (рис. 4.4) равно

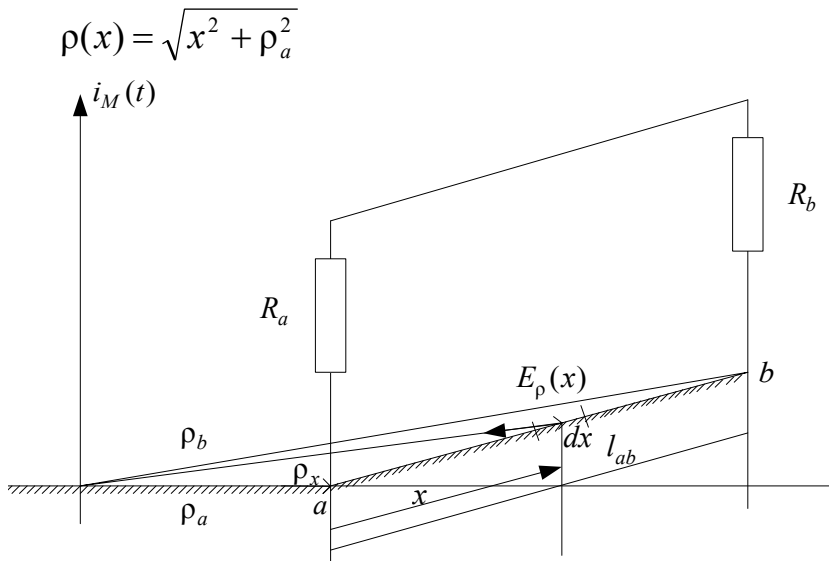


Рис. 4.4

имеем

$$E_x = E_\rho(x) \frac{x}{(x^2 + \rho_a^2)^{1/2}} = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g} \frac{x}{(x^2 + \rho_a^2)^{3/2}}. \quad (4.10)$$

Следовательно:

$$U_{ab}(t) = \int_{x=0}^{x=l_{ab}} E_x dx = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g} \frac{1}{(x^2 + \rho_a^2)^{1/2}} \Big|_{x=0}^{x=l_{ab}} = -\frac{i_M(t)}{2\pi\sigma_g} \left[\frac{1}{\rho_a} - \frac{1}{(l_{ab}^2 + \rho_a^2)^{1/2}} \right]. \quad (4.11)$$

Ясно, что при одинаковых ρ_a и l_{ab} отношение (4.11) к (4.7) меньше единицы.

Это утверждение, очевидное из геометрических построений предлагаем проверить читателю путем прямого соотнесения выражения (4.11) к выражению (4.7).

Из вышеизложенного вытекает, что межблочные линии связи могут быть подвержены кондуктивному влиянию токов в земле через свою систему заземления.

Здесь отметим два способа электрической развязки цепей, подключенных к протяженным проводным и кабельным линиям связи.

1. Изолирующий трансформатор.

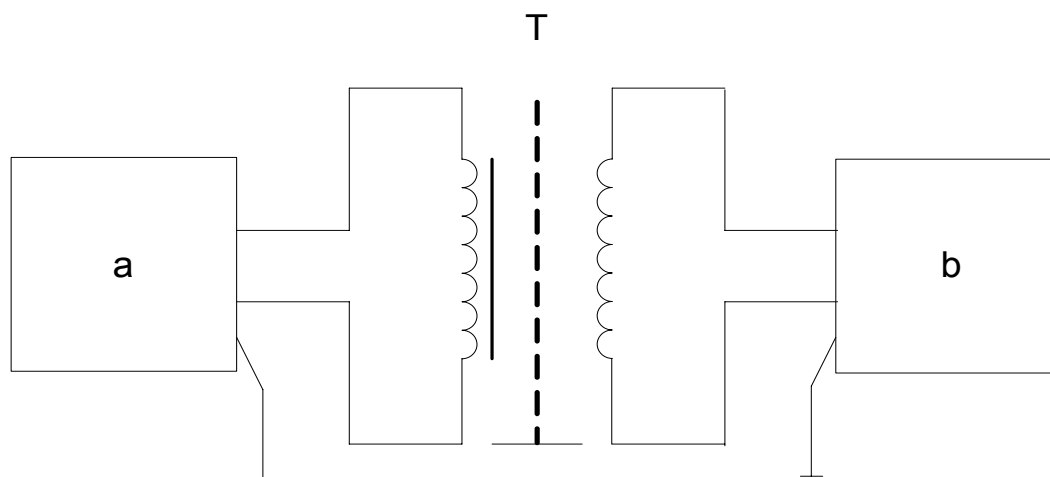


Рис. 4.5

Применяется для разрыва общих контуров в цепях, требующих обязательного заземления с обоих концов. Изолирующий трансформатор выполняет также согласующие функции, а заземленный экран защищен от высокочастотных наводок.

2. Оптрон

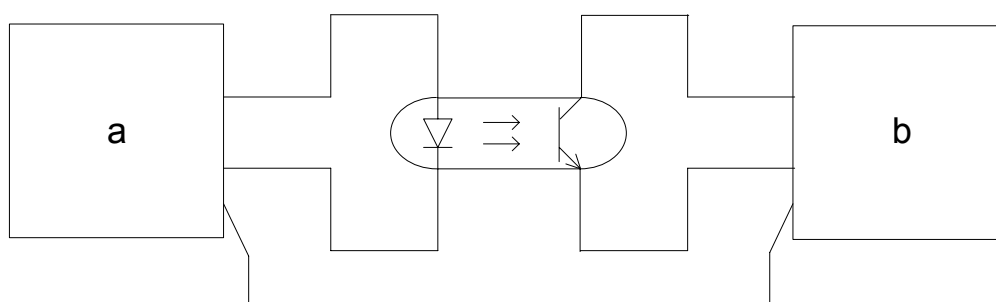


Рис. 4.6

Схема с оптроном дает идеальную развязку между подсистемами a и b , поскольку связь между ними осуществляется через световой поток.

Вместе с тем следует отметить, что при попадании токов молнии в землю напряженность электрического поля в окрестности центров растекания может намного превысить пробивные напряжения для почвы. При этом образуется искровая и стримерная зоны растекания тока с нарушением сферической симметрии. Кроме того, следует учитывать неоднородную структуру грунта, что может существенно усложнить предыдущий анализ

даже в предположении относительно простой горизонтально-слоистой структуры земли [27].

Приложение 4.1

Основные положения инструкции по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций [30]

Инструкция по устройству защиты зданий, сооружений и промпредприятий (далее - Инструкция) распространяется на все виды зданий, сооружений и промышленные коммуникации независимо от ведомственной принадлежности и формы собственности.

Инструкция предназначена для использования при разработке проектов, строительстве, эксплуатации, а также при реконструкции зданий, сооружений и промкоммуникаций.

При нормировании молниезащиты за исходное принято положение, что любое ее устройство не может предотвратить развитие молнии.

Классификация объектов (зданий и сооружений) по устройству молниезащиты определяется по опасности ударов молнии для самого объекта и его окружения.

Объекты можно подразделить на обычные и специальные, причем специальные, в свою очередь, могут подразделяться на специальные с ограниченной опасностью, представляющие опасность для непосредственного окружения, опасные для экологии.

Для каждого класса объектов устанавливаются необходимые уровни надежности защиты от прямых ударов молнии, сокращенно ПУМ.

Надежность защиты определяется как $1-P$, где P - вероятность прорыва молнии в объект, защищенный молниеотводами.

Для обычных объектов может быть предложено четыре уровня защиты, сгруппированных в табл.П.1.

Таблица П.1

Уровень защит

Уровень защиты	Надежность защиты от ПУМ
I	0,98
II	0,95
III	0,90
IV	0,80

Для специальных объектов минимально допустимый уровень защиты от ПУМ устанавливается в пределах 0,9-0,999 в зависимости от степени

общественной значимости и тяжести ожидаемых последствий от ПУМ по согласованию с органами госконтроля.

Комплекс средств молниезащиты зданий и сооружений в общем случае включает в себя устройства защиты от ПУМ (внешняя молниезащитная система - МЗС) и устройства защиты от вторичных воздействий молнии (внутренняя МЗС).

Остановимся на кратком описании внешней МЗС.

Внешняя молниезащитная система

Внешняя МЗС состоит из молниеприемников, токоотводов и заземлителей. В случае специального изготовления их материал и сечения должны удовлетворять требованиям таблицы п.2.

Таблица П.2

Материал и минимальные сечения элементов внешней МЗС

Уровень защиты	Материал	Сечения, мм ²		
		Молниеприемника	Токоотвода	Заземлителя
I-IV	Сталь	50	50	80
I-IV	Алюминий	70	25	Не применяется
I-IV	Медь	35	16	50

Молниеприемники

Молниеприемники либо специально устанавливаются, либо их функцию выполняют конструктивные элементы защищаемого объекта. Последние называются естественными молниеприемниками.

Молниеприемники могут состоять из комбинации стержней, натянутых проводов (тросов), сетчатых проводников (сеток).

Следующие конструктивные элементы зданий и сооружений могут рассматриваться как естественные молниеприемники:

- а) металлические кровли защищенного объекта;
- б) металлические конструкции крыши (фермы, соединенная между собой стальная арматура);
- в) металлические элементы типа водосточных труб, если их сечение не меньше значений, предписанных для обычных молниеприемников;
- г) технологические металлические трубы и резервуары, если они выполнены из металла толщиной не менее 2,5 мм;
- д) металлические трубы и резервуары если они выполнены из металла толщиной t не менее значений, приведенных в табл.п.3.

Толщина кровли, трубы или корпуса резервуара, выполняющего функции естественного заземлителя

Уровень защиты	Материал	Толщина t , мм, не менее
I-IV	Железо	4
I-IV	Медь	5
I-IV	Алюминий	7

Токоотводы

В целях снижения вероятности опасного искрения токоотводы должны располагаться таким образом, чтобы между точкой поражения и землей:

- а) ток растекался по нескольким параллельным путям;
- б) длина этих путей была ограничена до минимума;

Желательно равномерное расположение токоотводов по периметру защищаемого объекта. По возможности они прокладываются вблизи углов зданий.

Не следует прокладывать токоотводы в водосточных трубах. Рекомендуется размещать токоотводы на максимально возможных расстояниях от дверей и окон.

Заземлители

Во всех случаях, за исключением отдельно стоящего молниеотвода, заземлитель молниезащиты следует совместить с заземлителями электроустановок и средств связи. Если эти заземлители должны быть разделены по каким-либо соображениям, их следует объединить в общую систему.

Основные типы заземлителей: один или несколько контуров, вертикальные (или наклонные) электроды, радиально расходящиеся электроды или заземляющий контур, уложенный на дне котлована, заземляющие сетки. Заземлитель в виде наружного контура предпочтительно прокладывать на глубине не менее 0,5м от поверхности земли и на расстоянии не менее 1м от стен.

В качестве заземляющих электродов можно использовать соединенную между собой арматуру железобетона.

Зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода

Стандартной зоной защиты одиночного стержневого молниеотвода высотой h является конус высотой $h_0 < h$, вершина которого совпадает с вертикальной осью молниеотвода (рис.П.1). Габариты зоны определяются двумя параметрами: высотой конуса h_0 и радиусом конуса на уровне земли r_0 , причем

$$r_x = \frac{r_0(h_0 - h_x)}{h_0}.$$

В зависимости от надежности защиты P_z и высоты молниеотвода в табл.П.4 приведены габариты зоны защиты одиночного стержневого молниеотвода, т. е. значения h_0 и r_0 .

Таблица П.4

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода

Надежность защиты, P_z	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,9	От 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	От 100 до 150	$0,85h$	$[1,2 - 10^{-3}(h - 100)]h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	От 100 до 150	$[0,8 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$0,7h$
0,999	От 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	От 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	От 100 до 150	$[0,65 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$

Зоны защиты одиночного тросового молниеотвода

Стандартные зоны защиты одиночного тросового молниепровода высотой h ограничены симметричными двускатными поверхностями. Конфигурация зоны защиты определена рис. П.2.

Здесь и далее под h понимается минимальная высота троса над уровнем земли в результате провеса; L - расстояние между точками подвеса тросов. Расчет зоны защиты тросового молниеотвода для определения h_0 и r_0 дан в табл. П.5.

Таблица П.5

Зоны защиты одиночного тросового молниеотвода

Надежность защиты, P_s	Высота молниеотвода h , м	Высота конуса h_0 , м	Радиус конуса r_0 , м
0,9	От 0 до 150	$0,87h$	$1,5h$
0,99	От 0 до 30	$0,8h$	$0,95h$
	От 30 до 100	$0,8h$	$[0,95 - 7,14 \cdot 10^{-4}(h - 30)]h$
	От 100 до 150	$0,8h$	$[0,9 - 10^{-3}(h - 100)]h$
0,999	От 0 до 30	$0,75h$	$0,7h$
	От 30 до 100	$[0,75 - 4,28 \cdot 10^{-4}(h - 30)]h$	$[0,7 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h - 30)]h$
	От 100 до 150	$[0,72 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,6 - 10^{-3}(h - 100)]h$

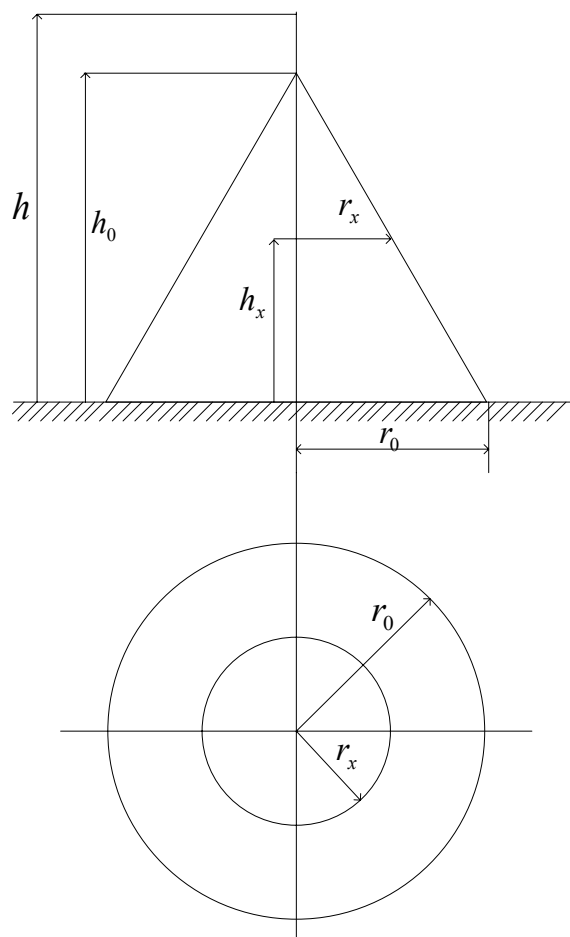


Рис. П1

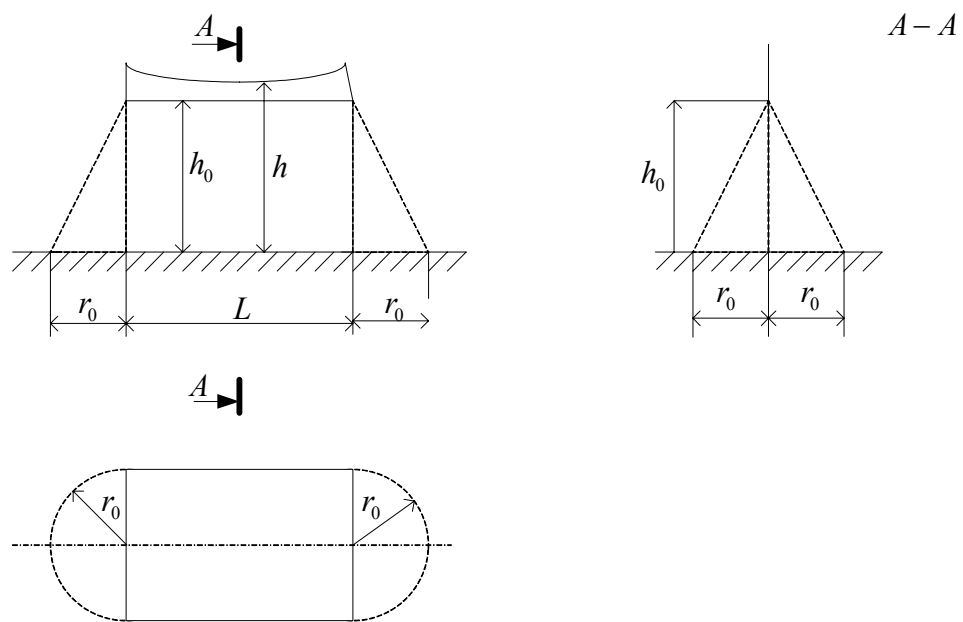


Рис. П2

Библиографический список

1. Дальние электропередачи 750 кВ. Ч.1. Воздушные линии. М.: Энергия 1974. Ч. II. Оборудование, подстанции.- М.: Энергия, 1975.
2. Harold N. Scherer and Gregory S. Vassel. Transmission of Electric Power at Ultra-High Voltages: Current Status and Future Prospects. Proceedings of the IEEE. Vol.73, Number 8, August 1985. (Русский перевод. Передача электроэнергии на ультравысоком напряжении, ТИИЭР.М.: Изд-во Мир, 1986.)
3. Банкоске, Познаньяк, Мак Ки, Грейвс, Бриджес. Биологическое влияние электрических полей.// В кн. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду. Пер. докл. (СИГРЭ-78).- М.: Энергия, 1980.- 112с.
4. Перельман Л.С., Тиходеев Н.Н., Фельдман М.Л. Влияние превышения высоты подвески проводов средней фазы над крайними на основные электрические характеристики линии 750 кВ. Ч.1. Воздушные линии.- М.: Энергия, 1974 .
5. Риш У.Р., Морган М.Г.. Регулирование возможных воздействий электромагнитных полей линий электропередачи переменного тока на здоровье человека. ТИИЭР т.67, №10, 1979 /Пер. с англ. Regulating Possible Health Effects from AC Transmission line Electromagnetic Fields.
6. Кайданов Ф.Г. Электростатическая индукция на автотранспорт вблизи линий сверхвысокого напряжения. Изв. АН СССР// Энергетика и транспорт. 1987.- №1.-С.51-58.
7. Бирюков С.В. и др./В кн. Расчет и измерение напряженности электрического поля в электроустановках сверх- и ультравысокого напряжения. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду: Переводы докладов Международной конференции по большим электрическим системам (СИГРЭ-86). //Энергетика за рубежом.- М.: Энергоатомиздат, 1988.-104с.
8. Schaefer H. Uber die Wirkung elektrischer Felder auf den Menschen. Sitzungsberichte der Heidelbferger Akademie der Wissenschaften. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse. Jahrgang 1983, 3 Abhandlung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo.
9. Бриджес Дж. Э., Прич М. Биологическое действие электрического поля промышленной частоты: Обзор физических и методических аспектов. ТИИЭР.1981. т.69.- №9./Пер. с англ. Biological influences of Power Frequency Electrical Fields - A Tutorial Review from a Physical and Experimental Viewpoint.
10. Электрические и магнитные поля линий электропередачи. Результаты международного обзора// В кн. Влияние электроустановок высокого напряжения на окружающую среду. Пер. докладов (СИГРЭ-86).//Энергетика за рубежом.- М.: Энергоатомиздат. 1988 .
11. ПучковГ.Г., Перельман Л.С., Задорожная М.Н.. Электрические поля электропередачи СВН и их моделирование. В сборнике научных трудов: Электропередачи сверхвысокого напряжения и экология. ЭНИН им. Кржижановского - М., 1986 .
12. Денно, Зафанелла. Электростатическое влияние воздушных линий электропередачи и подстанций линии электропередачи 345 кВ и выше. //Сб. трудов научно-исследовательского института энергетики США-М.: Энергия, 1980.- 408с.

13. Reilly J.P. "Characteristic of spark discharges from vehicles energies by AC electric field". IEEE Trans. Power App.Syst.vol.PAS-101, no.9, Sept 1982 p.p. 3178-3186.
14. Chun-Yu Lin, Huey-Ru Chaung, Kun-Mu Chen. Steady-State and shock currents induced by ELF Electric Fields in a Human Body and a Nearby Vehicle. IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility. vol.32, No.1, February 1990, p.p. 59-65
15. Тиходеев Н.Н. Защита населения и персонала от влияния воздушных линий электропередачи 1150 кВ. Изв. АН СССР.// Энергетика и транспорт.1987.- №3.- с.152-157.
16. Цицикян Г.Н. Индуцированные ЭДС от воздушных линий электропередачи и электробезопасность.// Электричество.2001.- №10.- с.22-29.
17. Справочник по проектированию систем передачи информации в энергетике / С.С. Агафонов, Б.А. Жуков, В.Х. Ишкин, Н.Н. Цитвер. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 264с.
18. Цицикян Г.Н., Новикова О.Ю. Индуктивные параметры прямолинейного провода с током с обратным путем через окружающую среду. Известия АН// Энергетика.1995- №1, -с.91 – 115.
19. ГОСТ Р 51317.2.4.-2000(МЭК 61000-2-4-94). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения промышленных предприятий.-М.: Изд-во стандартов, 2001.
- 20.ГОСТ Р 51317.2.5.-2000(МЭК 61000-2-5-95). Совместимость технических средств электромагнитная. Электромагнитная обстановка. Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств.-М.: Изд-во стандартов, 2001.
- 21.ГОСТ Р 51317.4.11-99(МЭК 61000-4-11-94). Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к динамическим изменениям напряжения электропитания. Требования и методы испытаний.-М.: Изд-во стандартов, 2000.
- 22.Parameters of lightning strokes: A Review. IEEE Trans. on Power Delivery, vol.20. January 2005.-№1. p.p. 346 – 358.
- 23.Румшинский Л.З.. Элементы теории вероятностей.-М.: Изд-во Наука, ГРФМЛ. 1976.- 240с.
- 24.Митропольский А.К.. Интеграл вероятностей.- Л.: Изд-во ЛГУ, 1972/-, 87с.
- 25.A simplified method for estimation lightning performance of transmission lines. IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems. Vol. PAS – 104. April 1985.- №4. p.p. 919 – 932.
- 26.Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и таблицами.- М., 1979.- 832с.
- 27.Кравченко В.Н.. Грозозащита радиоэлектронных средств: Справ.- М.: "Радио и связь", 1991. – 264с.

- 28.Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозовых и внутренних перенапряжений. РД 153 – 34, 3 – 35. 125 – 99.- СПб.: Изд-во ПЭИПК, 1999.- 353с.
- 29.Цицикян Г.Н.. Сравнение некоторых аналитических оценок для электромагнитных проявлений обратного разряда молнии. Изв.РАН. //Энергетика. 2005.-№1.- с.44 – 55.
- 30.Инструкция по устройству молниезащиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций.-М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2004. – 48с.*
- 31.Пресман А.С.. Электромагнитная сигнализация в живой природе. (факты, гипотезы, пути исследования). М.: “Сов.радио”, 1974.- 64с.
- 32.Раков В.А., Юман М.А, Тотапиллил Р., Шиндо Т. Статистические характеристики отрицательных молний, полученные на основе записей электрического поля и телевизионных регистраций. Изв. АН СССР. //Энергетика и транспорт.1991.- №3, с.61 – 71.
- 33.Magnetic fields from electric power lines theory and comparison to measurements. Report. IEEE Trans. on Power Delivery. vol.3. October 1988.- №4.p.p. 2127 – 2136.
- 34.Соловьев С.П., Сурков С.С.. Электрическое поле и молнии, возникающие в газопылевом облаке продуктов взрыва. Геомагнетизм и аэронавигация.Т40, 2000.-№1.- с.68 – 76.
- 35.IEEE Working Group Report Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – Updates to analytical Models. IEEE Trans. on Power Delivery. vol.8. July 1993.- №3, p.p. 1254 – 1267.
- 36.Костенко М.В.. Парадигма устойчивого развития: биоэлектромагнитная и информационная экология и высшее образование: Учеб. пособие.- СПб.:Изд-во «Нестор», 1999.- 48с.
- 37.Воскобович В.В. Актуальность и современное состояние проблемы защиты технических средств от сверхширокополосных импульсов большой мощности.// Технологии ЭМС.-2004.- №3(10). с.17 – 24.
- 38.Кириллов В.Ю. Электростатические разряды и излучаемые электромагнитные помехи. Технологии ЭМС.-2004.-№1(8). с.43 – 46.
- 39.Компьютер и система электроснабжения в офисе: современные аспекты безопасной эксплуатации/ Под ред. О.А. Григорьева. – М.: Изд-во РУДН, 2003. – 103с.

* Литература с номера 31 и далее по списку приводится как дополнительная. На нее нет прямых ссылок в тексте.

Предметный указатель

- Взаимное сопротивление 19
- Внешняя молниезащитная система 50
- Динамическое изменение напряжения электропитания 33, 34
- Заземлители 51
- Зона защиты 51
- Индуктированные напряжения 19,22
- Искровые разряды 15,17
- Классификация объектов по устройству молниезащиты 49
- Коэффициент корреляции 43
- Кумулятивная вероятность 42
- Линия связи 21,45,46
- Логарифмически-нормальный закон распределения 41
- Межблочная линия связи 45,47
- Метод эквивалентного генератора тока 12
- Молниеприемники 50
- Молнии отрицательной полярности 41,42
- Надежность защиты 49
- Полоса отчуждения 11
- Потенциальные коэффициенты 11
- Предельно-допустимые уровни 33,38,39
- Прямые удары молнии 49
- Расщепление фазы 9
- Санитарно-защитная зона 11
- Системы сотовой радиосвязи 40
- Собственное сопротивление 19,20
- Способы электрической развязки 47
- Стержневой молниеотвод 51,52
- Теорема разложения 36
- Ток обратного (возвратного) удара 41
- Токоотводы 51
- Точка внутри производственного присоединения 30
- Точка общего присоединения 30,34
- Тросовый молниеотвод 52
- Уровень электромагнитной совместимости 33
- Уровень помехоустойчивости 31
- Участок параллельного сближения 21
- Форма базового тока 43
- Функция ошибок или интеграл вероятности 42
- Эквивалентная глубина возврата тока 21
- Электромагнитная безопасность 3
- Электромагнитная обстановка 3,11,30,32
- Электромагнитная помеха 30,31,32

Оглавление

Введение.....	3.
Глава 1. Электрическое поле высоковольтной линии на уровне земли	4
1.1. Вывод основных расчетных соотношений.....	4.
1.2. Соотношения между наведенными токами и напряженностью электрического поля на уровне земли.....	12
Глава 2. Индуктированные напряжения от воздушных линий передач	19
2.1. Вводные замечания.....	19
2.2. Индуктированные напряжения вблизи линии передачи.....	22
Глава 3. Нормирование и стандартизация в области ЭМС.....	30
3.1. Основные определения и требования некоторых нормативных документов по ЭМС.....	30
3.2. Изменение напряжения в точке общего присоединения при подключении емкостной нагрузки.....	34
<i>Приложение 3.1. Предельно-допустимые уровни (ПДУ) для магнитных полей (МП).....</i>	<i>39</i>
Приложение 3.2. Допустимые уровни воздействия электрического поля промышленной частоты на население от ЛЭП(по СНиП 2971-84)	40
Приложение 3.3. Временно-допустимые уровни (ВДУ) воздействия электромагнитных излучений (ЭМИ), создаваемых системами сотовой радиосвязи	40
Глава 4. Параметры молнии и молниезащита.....	41
4.1. Краткая характеристика параметров молниевых разрядов.....	41
4.2. Форма базового тока молниевых разрядов.....	43
4.3. Кондуктивное влияние растекающегося тока молнии на линии связи.....	45
Приложение 4.1. Основные положения инструкции по устройству молние-защиты зданий, сооружений и промышленных коммуникаций	49
Библиографический список.....	54
Предметный указатель.....	57

Цицикян Георгий Николаевич

Электромагнитная совместимость в электроэнергетике

Учебное пособие

Редактор И.Н. Садчикова

Сводный темплан 2006г.

Лицензия ЛР №020308 от 14.02.97

Санитарно-эпидемиологическое заключение №78.01.07.953.П.005641.11.03
от 21.11.2003 г.

Подписано в печать

Формат 60x84 1/16

Б. кн.-журн.

П.л.

Б.л.

Изд-во СЗТУ

Тираж

Заказ

Северо-Западный государственный заочный технический университет
Издательство СЗТУ, член Издательско-полиграфической ассоциации
Университетов России

191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, д.5