А. М. ЗАЛЕССКИЙ
Профессор Ленинградского Индустриального Института

СБОРНИК УПРАЖНЕНИЙ ПО ТЕХНИКЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ОНТИ НКТП СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1936 МОСКВА

А. М. ЗАЛЕССКИЙ
Профессор Ленинградского Индустриального Института.

СБОРНИК УПРАЖНЕНИЙ ПО ТЕХНИКЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

ОНТИ НКТП СССР
ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
ЛЕНИНГРАД 1936 МОСКВА

ЭЭ—30—5—2
ТКК № 44 от 29/V—36 г.

Сборник предназначается для студентов электротехнических и энергетических втузов и должен служить пособием при прохождении курса техники высокого напряжения. С целью дать материал для самостоятельной работы студентов и сделать этот сборник подходящим руководством также для студентов заочных втузов, все типичные задачи даны с решениями. Сборник заключает в себе 12 глав, охватывающих все отделы курса „Техника высокого напряжения“ для специальности „Передача энергии и объединие электрических систем“ и других родственных специальностей.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В инженерном образовании особенно важно не только сообщить студентам определенные теоретические сведения по той или иной дисциплине, но и научить их прилагать эти сведения к решению практических вопросов. Одним из действительных средств для достижения этой цели является решение задач, на что учебные планы втузов отводят значительное время. По некоторым дисциплинам, главным образом, теоретическим (математика, физика, теоретическая механика), давно уже составлены задачники, которые значительно облегчают преподавание, с одной стороны, и дают студентам большой материал для самостоятельной проработки дисциплины, с другой стороны. По дисциплинам специальным такие задачники почти совершенно отсутствуют, и не потому, конечно, что их невозможно создать, а, вероятно, потому, что быстро развивающаяся техника вызывает столь же быстрое изменение содержания специальных дисциплин. Мы полагаем, все же, что создание задачников по специальным дисциплинам вполне возможно, и настоящая книга представляет собою попытку разрешения этого вопроса в области техники высокого напряжения. Ведя преподавание по этой дисциплине в течение 12 лет, автор накопил довольно значительный материал, который и лег в основание настоящего „Сборника упражнений“.

Многие из вопросов, трактуемых в Сборнике, в достаточной мере выкристаллизовались и едва ли потерпят существенные изменения в течение ближайших лет. Другие же вопросы, наоборот, далеки от стадии кристаллизации, а потому некоторые из задач, предлагаемых в сборнике, должны будут через некоторое время отмереть и смениться новыми. В особенности это относится к таким главам, как пробой твердых и жидких диэлектриков и перенапряжения.

Объем сборника примерно соответствует содержанию курса „Техника высокого напряжения“ для специальности „Передача энергии и объединение систем“, а также идентичных им курсов, существующих, нередко под другими названиями, в учебных планах иных специальностей.

Имея в виду возможность использования Сборника для самостоятельной подготовки студентов и, в частности, для студентов заочных втузов, автор дал большое количество решений задач; как общее правило, материал в Сборнике расположен таким образом, что в каждой группе задач дается решение типовой задачи, а затем следует несколько аналогичных задач, снабженных только ответами.

По поводу отдельных глав необходимо сделать следующие замечания.

В главе „Электростатика" не приведено решение задач методом конформных преобразований. Этот метод имеет большое значение для конструкторов высоковольтных трансформаторов и аппаратуры, но как раз на этой специальности автор не вел преподавания и соответствующих задач в его материалах не оказалось. Этот пробел возможно будет пополнить в дальнейшем. В главе „Электрическая прочность масла" задачи базируются почти исключительно на эмпирических формулах, так как математическая теория пробоя масла до настоящего времени совершенно еще не разработана. Точно так же, в значительной мере на эмпирических формулах базируется глава „Высоковольтные изоляторы".

В главе „Перенапряжения" автор широко пользовался операционным методом, без знания которого в настоящее время нельзя выпускать инженера-электрика-сетевика. В то же время, эта глава содержит достаточное количество задач, решаемых без помощи операционного метода, которые могут быть использованы для студентов других специальностей.

Являясь первым опытом в своей области, эта книга, несомненно, не лишена недостатков, которые будут выявлены практикой ее применения. Все же автор надеется, что она принесет пользу как преподавателям, так и студентам электротехнических и энергетических втузов.

В заключение автор считает своим приятным долгом выразить благодарность инженерам В. Ю. Гессену, К. И. Пяртману, Б. М. Рябову и В. С. Толчкову, проверившим решения значительной части задач, а также доценту В. Н. Глазанову, просмотревшему гл. XII книги и давшему некоторые полезные советы.

Проф. *А. М. Залесский*

I. ЭЛЕКТРОСТАТИКА.

№ 1. Определить электрическое смещение в точке, находящейся в воздухе, если электрическая сила в этой точке равна 15 kV/cm.

Решение. Зависимость между электрическим смещением и электрической силой выражается в абсолютных электростатических единицах равенством:

$$D = \frac{\varepsilon E}{4\pi}.$$

Так как для воздуха диэлектрическая постоянная равна $\varepsilon = 1$, то это уравнение обращается в следующее:

$$D = \frac{E}{4\pi}.$$

Величина E, входящая в это уравнение, должна быть выражена в абсолютных электростатических единицах. Так как по условию задачи величина E выражена в kV/cm, то мы должны превратить ее в вольты на cm, а затем, разделив на 300, превратить ее в электростатические единицы.

Подставляя значение E, находим

$$D = \frac{15\,000}{300 \cdot 4\pi} = 3{,}98 \ \text{CGSE}.$$

Если мы хотим выразить результат в практических единицах (C/cm²), необходимо полученный результат разделить на $3 \cdot 10^9$:

$$D = \frac{3{,}98}{3 \cdot 10^9} = 1{,}325 \cdot 10^{-9} \text{C/cm}^2.$$

Можно было бы получить этот результат сразу, если воспользоваться формулой, выражающей D в практических единицах:

$$D = 8{,}84 \cdot 10^{-14} \varepsilon E = 8{,}84 \cdot 10^{-14} \cdot 15\,000 = 1{,}325 \cdot 10^{-9} \ \text{C/cm}^2.$$

№ 2. Определить электрическую силу в воздухе, если известно, что электрическое смещение в данной точке равно 4,78 единиц CGSE. Результат выразить в электростатических единицах и в kV/cm.

№ 3. Найти диэлектрическую постоянную среды, если смещение в ней равно $8 \cdot 10^{-3}$ μC/cm² при электрической силе, равной 21 kV/cm.

№ 4. Найти градиент в равномерном поле, образованном между двумя плоскими дисками, расположенными на расстоянии s сантиметров, если разность потенциалов между ними равна U.

Решение. Если поле равномерно, то градиент в любой точке этого поля должен быть одинаков. Потенциал в таком поле равномерно изменяется от одного электрода (диска) до другого. Градиент потенциала, по определению, выражается производной от потенциала по длине взятой по направлению силовой линии, т. е.

$$g=\frac{dU}{ds}.$$

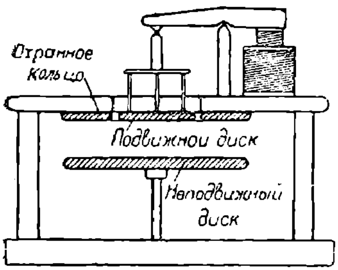

Рис. 1.

Так как эта величина постоянна, то мы можем заменить производную $\frac{dU}{ds}$ отношением $\frac{U}{s}$. Поэтому получим

$$g=\frac{U}{s}.$$

№ 5. Высоковольтный электростатический вольтметр (рис. 1) состоит в главной своей части из двух плоских дисков, расположенных на расстоянии 2,5 cm друг от друга в сжатом воздухе. Наибольшее напряжение, измеряемое вольтметром, равно 200 kV. Определить градиент в воздухе при этом напряжении.

№ 6. Высоковольтный вольтметр на 150 kV Абрагама и Вийяра (рис. 2) состоит из двух дисков с закругленными краями, расположенных на расстоянии 15 cm. Найти градиент при полном напряжении вольтметра, предполагая поле между дисками равномерным.

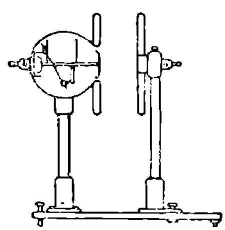

Рис. 2.

№ 7. Плоский воздушный конденсатор для моста Шеринга работает при градиенте $g=12$ kV/cm и имеет расстояние между дисками 20 cm. Определить его напряжение.

№ 8. Дана зависимость электрической силы от расстояния по силовой линии $E=\frac{20}{s^2}$ kV/cm. Найти потенциал в точке $s=2$ cm.

№ 9. Потенциал электрического поля выражается уравнением

$$U=\frac{15}{r}+10 \text{ kV}.$$

Найти уравнение эквипотенциальной поверхности, имеющей потенциал $U=12$ kV.

№ 10. Написать уравнение эквипотенциальной поверхности, по которой должны быть очерчены электроды типа Роговского, полагая

$$\psi=\frac{2}{3}\pi, \quad a=3{,}14 \text{ cm}.$$

Решение. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности электрического поля между бесконечной плоскостью и полуплоскостью (рис. 3) выражаются следующими уравнениями, данными Максвеллом:

$$x=\frac{a}{\pi}(\varphi+e^{\varphi}\cos\psi),$$

$$y=\frac{a}{\pi}(\psi+e^{\varphi}\sin\psi),$$

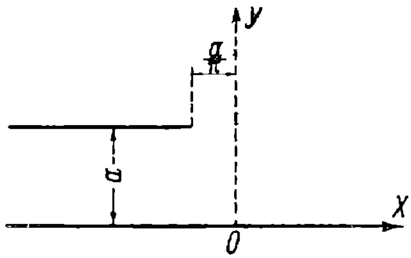

Рис. 3.

где a — расстояние между плоскостью и полуплоскостью. Эти уравнения определяют силовую линию, если $\varphi=\text{const}$, и эквипотенциальную поверхность, если $\psi=\text{const}$.

Полагая $\psi=\frac{2\pi}{3}$, получим:

$$x=\frac{a}{\pi}\left(\varphi+e^{\varphi}\cos\frac{2\pi}{3}\right)=\frac{a}{\pi}(\varphi-0{,}5e^{\varphi}),$$

$$y=\frac{a}{\pi}\left(\psi+e^{\varphi}\sin\frac{2\pi}{3}\right)=\frac{a}{\pi}\left(\frac{2\pi}{3}+0{,}866e^{\varphi}\right).$$

Определим из второго уравнения φ:

$$e^{\varphi}=\frac{\pi}{0{,}866a}\left(y-\frac{2a}{3}\right)=\frac{3{,}63y}{a}-2{,}42,$$

$$\varphi=\ln\left(\frac{3{,}63y}{a}-2{,}42\right)=\ln\left(\frac{1{,}5y}{a}-1\right)+0{,}883.$$

Подставляя значения φ и e^{φ} в первое уравнение, получим:

$$x=\frac{a}{\pi}\left[\ln\left(\frac{1{,}5y}{a}-1\right)+0{,}883-1{,}21\left(\frac{1{,}5y}{a}-1\right)\right]=$$

$$=\ln(0{,}478y-1)-0{,}578y+2{,}093.$$

№ 11. Написать уравнение эквипотенциальной поверхности, по которой должна быть очерчена поверхность конденсатора Роговского, если $\psi=120°$ и $a=15$ cm.

№ 12. Воздушный цилиндрический конденсатор для моста Шеринга (рис. 4) имеет размеры: $r = 22{,}4$ cm, $R = 59{,}5$ cm, $l = 100$ cm. Определить его емкость и наибольший градиент при напряжении $U = 125$ kV.

Рис. 4.

Решение. Емкость цилиндрического конденсатора может быть выражена уравнением

$$C = \frac{\varepsilon l}{2 \ln \frac{R}{r}} \text{ cm.}$$

Подставляя величины, данные в условии задачи, найдем

$$C = \frac{100}{2 \ln \frac{59{,}5}{22{,}4}} = 51{,}3 \text{ cm.}$$

Если нужно выразить эту емкость в практических единицах, мы должны разделить полученный результат на $9 \cdot 10^{11}$:

$$C = \frac{51{,}3}{9 \cdot 10^{11}} = 5{,}70 \cdot 10^{-11} F.$$

Наибольший градиент в системе двух концентрических цилиндров получается на поверхности внутреннего цилиндра и может быть выражен уравнением

$$g = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}.$$

Подставляя величины, данные в условии задачи, найдем:

$$g = \frac{125}{22{,}4 \ln \frac{59{,}5}{22{,}4}} = 5{,}73 \text{ kV/cm.}$$

№ 13. Провод диаметром $d = 20$ mm проходит через имеющееся в стене круглое отверстие диаметром $D = 60$ cm. Определить, при каком напряжении провода относительно земли будет достигнут градиент $g = 21$ kV/cm у поверхности провода. Влиянием краев отверстия пренебрегаем.

№ 14. Высоковольтный одножильный кабель (рис. 5) имеет наружный диаметр 5 cm, толщину свинца 2 mm и толщину изоляции 11 mm. Найти максимальный и минимальный градиент в нем при напряжении 100 kV.

№ 15. Одножильный кабель имеет диаметр внутренней жилы 14,2 mm и толщину изоляции 11 mm. Определить наибольший и наименьший градиент в нем, если напряжение равно 20 kV.

№ 16. Найти максимальный градиент для кабеля Пирелли, предназначенного для трехфазной линии с напряжением 130 kV, зная диаметр жилы $d = 17$ mm и толщину изоляции $s = 15$ mm.

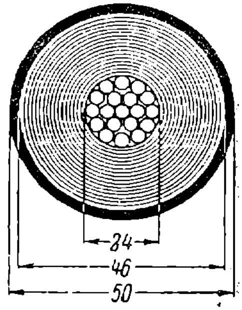

Рис. 5.

№ 17. Наружный диаметр освинцованного одножильного кабеля, предназначенного для трехфазной линии с напряжением 60 kV, равен 48,5 mm. Толщина свинца — 2,5 mm, толщина изоляции — 13,5 mm. Найти максимальный и минимальный градиент в кабеле при рабочем напряжении.

№ 18. Определить размеры одножильного кабеля таким образом, чтобы при данной толщине изоляции $s = 10$ mm градиент у поверхности внутренней жилы был наименьший. Определить также величину градиента у поверхности жилы и у поверхности свинца при напряжении $U = 22,2$ kV. Наружный радиус кабеля R предполагаем неизменным.

Решение. Градиент у поверхности внутренней жилы кабеля выражается уравнением:

$$g = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}}.$$

Для нахождения минимума этого выражения удобнее всего взять обратную величину и найти ее максимум:

$$\frac{1}{g} = \frac{r \ln \frac{R}{r}}{U},$$

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{g}\right) = \frac{\ln R - \ln r - 1}{U} = 0.$$

Отсюда следует:

$$\ln \frac{R}{r} = 1,$$

$$\frac{R}{r} = e.$$

Таким образом, градиент у поверхности внутренней жилы кабеля будет минимум, когда отношение радиусов $\frac{R}{r}$ равно основанию натуральных логарифмов e. Поэтому мы можем написать:

$$R = r + s,$$

$$\frac{R}{r} = \frac{r+s}{r} = e,$$

$$s = r(e - 1),$$

$$r = \frac{s}{e-1},$$

$$R = r + s = \frac{s}{e-1} + s = \frac{se}{e-1}$$

Подставляя значение $s = 1$ cm, найдем

$$r = \frac{1}{e-1} = 0{,}582,$$

$$R = \frac{e}{e-1} = 1{,}582.$$

Максимальный градиент будет равен

$$g_{\max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{22{,}2}{0{,}582} = 38{,}15 \text{ kV/cm},$$

$$g_{\min} = \frac{U}{R \ln \frac{R}{r}} = \frac{22{,}2}{1{,}582} = 14{,}03 \text{ kV/cm}.$$

№ 19. Одножильный кабель имеет внутреннюю жилу диаметром 12,6 mm и работает при напряжении $U = 20$ kV между жилой и свинцом. Найти толщину изоляции, необходимую для того, чтобы наибольший градиент в кабеле не превзошел $g = 40$ kV/cm.

№ 20. Одножильный кабель должен работать при напряжении $U = 23{,}0$ kV. Наружный диаметр его, вместе со свинцовой оболочкой, должен быть не более $D = 38$ mm. Определить наименьшее сечение внутренней жилы (предполагая ее скрученной из 7 проволок), при котором градиент в кабеле нигде не превзойдет $g = 38{,}3$ kV/cm. Толщина свинца — 2,5 mm.

№ 21. При заданной толщине изоляции одножильного кабеля $s = 12$ mm найти диаметр жилы, при котором получается наименьшая величина градиента у поверхности жилы, и величину этого градиента. Напряжение кабеля 23 kV. Наружный радиус кабеля $R = \text{const}$.

№ 22. Одножильный кабель имеет внутреннюю жилу диаметром $d = 12{,}6$ mm и работает при напряжении $U = 20$ kV. Найти толщину изоляции, необходимую для того, чтобы наибольший градиент в кабеле не превзошел 40 kV/cm.

№ 23. 100-kV кабельная линия в Нюренберге состоит из трех одножильных кабелей, имеющих диаметр внутренней жилы 2,2 cm и толщину изоляции — 1,8 cm. Определить диэлектрическую постоянную его изоляции, если его емкость по измерению оказалась равной 0,21 μF/km.

№ 24. Наружный диаметр освинцованного одножильного кабеля равен 48,5 mm. Толщина свинца равна 2,5 mm, толщина изоляции — 13,5 mm. Найти максимальный градиент в кабеле при рабочем напряжении, равном 38 kV, а также его емкость на 1 km, если диэлектрическая постоянная изоляции равна 4,2.

№ 25. Определить максимальный градиент для кабеля на 35 kV, зная наружный диаметр его жилы $d = 15,3$ mm и толщину изоляции $s = 10$ mm. Определить также напряжение, при котором этот градиент будет равен 21 kV/cm. Кабель — трехжильный, каждая жила в отдельной свинцовой оболочке.

№ 26. Одножильный кабель имеет диаметр внутренней жилы 15,9 mm и толщину изоляции — 15 mm. Определить максимальный градиент и найти распределение градиента между жилой и свинцом при рабочем напряжении кабеля, равном 38 kV.

№ 27. Определить максимальный градиент трехфазного кабеля нормальной конструкции на 35 kV, 120 mm² (рис. 6) при рабочем напряжении. Толщина изоляции $s = 13$ mm.

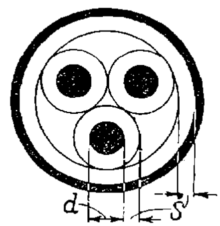

Рис. 6.

Решение. Для определения максимального градиента в кабеле нормальной конструкции при одинаковой толщине фазной и поясной изоляции Haas дал следующую формулу:

$$g = \left(\frac{1}{2s} + \frac{0,18}{r}\right) U,$$

где r — радиус внутренней жилы и s — толщина фазной изоляции.

Диаметр провода, имеющего сечение 120 mm², мы возьмем из таблицы стандартных сечений проводов (см. СЭТ, отд. 19, табл. 3). Он равен 14,2 mm. Подставляя величины s и r в формулу Haas'а, находим:

$$g = \left(\frac{1}{2s} + \frac{0,18}{r}\right) U = \left(\frac{1}{2,6} + \frac{0,18}{0,71}\right) 35 = 22,4 \text{ kV/cm}.$$

№ 28. Найти максимальный градиент трехфазного кабеля нормальной конструкции на 6 kV при трехкратном перенапряжении. Диаметр каждой жилы кабеля — 10,9 mm, толщина изоляции — 2,0 mm.

№ 29. Определить напряжение, при котором будет достигнут наибольший градиент в 45 kV/cm в трехфазном кабеле нормальной конструкции, имеющем диаметр жилы 12,6 mm и толщину изоляции 2,75 mm.

№ 30. Найти емкость 1 km одножильного кабеля, если сечение медной жилы равно 150 mm², толщина изоляции — 10 mm и диэлектрическая постоянная изоляции — 3,6.

№ 31. Высоковольтный кабель на 130 kV имеет диаметр внутренней жилы $d=24$ mm и толщину изоляции $s=15$ mm. Найти емкость 1 km кабеля, зная, что диэлектрическая постоянная изоляции равна 3,5.

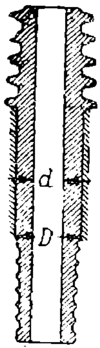

Рис. 7.

№ 32. Определить наибольший градиент в средней части проходного изолятора, имеющего сердечник диаметром $d=2{,}5$ cm и наружный диаметр фарфора $D=7{,}5$ cm. Напряжение равно 6,35 kV.

№ 33. Проходные изоляторы масляного выключателя на 10 kV испытываются напряжением, определяемым формулой

$$U=2{,}2\,U_n+20 \text{ kV},$$

где U_n — номинальное напряжение выключателя. Найти наибольший градиент в средней части изолятора при испытательном напряжении, если диаметр сердечника изолятора равен 2,0 cm, а наружный диаметр фарфора равен 7,0 cm.

№ 34. Определить максимальный градиент между двумя параллельными проводами диаметром $d=10$ mm при расстоянии между ними, равном 1) 5 cm, 2) 50 cm и 3) 200 cm. Найти также ошибку, которую дает во втором и третьем случае применение приближенной формулы по сравнению с точной. Напряжение между проводами равно 50 kV.

Решение. Максимальный градиент электрического поля между двумя параллельными проводами определяется уравнением:

$$g=\frac{2U_0\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}}{d\left(\frac{s}{d}-1\right)\ln\left[\frac{s}{d}+\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}\right]}=$$

$$=\frac{2U_0\sqrt{\left(\frac{s}{d}\right)^2-1}}{(s-d)\operatorname{arch}\frac{s}{d}},$$

где U_0 — напряжение каждого из проводов по отношению к нейтрали,

s — расстояние между проводами и d — диаметр провода. В случае однофазного тока напряжение относительно нейтрали равно

$$U_0 = \frac{U}{2},$$

а в случае трехфазного тока

$$U_0 = \frac{U}{\sqrt{3}},$$

причем U здесь обозначает напряжение между проводами.

Если расстояние между проводами велико по сравнению с диаметром провода, так что можно пренебречь единицей по сравнению с отношением $\frac{s}{d}$, вышеприведенное уравнение значительно упрощается, а именно:

$$g \cong \frac{U_0}{r \ln \frac{s}{r}}.$$

Применяя точную формулу к первому случаю нашей задачи, получим:

1) $$g = \frac{2 \cdot 50\sqrt{5^2 - 1}}{2 \cdot (5-1) \ln [5 + \sqrt{5^2 - 1}]} = \frac{12{,}5 \cdot 4{,}9}{\ln 9{,}9} = 26{,}7 \text{ kV/cm}.$$

2) Для второго случая точная формула даст:

$$g = \frac{50\sqrt{50^2 - 1}}{49 \ln [50 + \sqrt{50^2 - 1}]} = 11{,}08 \text{ kV/cm}.$$

Приближенная формула дает:

$$g = \frac{25}{0{,}5 \ln \frac{50}{0{,}5}} = 10{,}87 \text{ kV/cm}.$$

Ошибка, выраженная в процентах, будет равна:

$$\Delta g = \frac{11{,}08 - 10{,}87}{11{,}08} \cdot 100 = 1{,}9\%.$$

3) В третьем случае применение точной формулы дает:

$$g = \frac{50\sqrt{200^2 - 1}}{(200-1) \ln [200 + \sqrt{200^2 - 1}]} = 8{,}39 \text{ kV/cm}.$$

По приближенной формуле получим:

$$g = \frac{25}{0{,}5 \ln \frac{200}{0{,}5}} = 8{,}35 \text{ kV/cm}.$$

Ошибка равна:

$$\Delta g = \frac{8{,}39 - 8{,}35}{8{,}39} \ 100 = 0{,}477\%.$$

Итак, при соотношении $\frac{s}{d} = 50$ мы получили ошибку в 1,9%, а при $\frac{s}{d} = 200$ эта ошибка стала меньше полупроцента. Поэтому, если мы желаем производить расчет градиента с точностью до 1%, то приближенной формулой можно пользоваться только при соотношении $\frac{s}{d} \geqslant 100$.

№ 35. Найти максимальный градиент у поверхности двух круглых шин диаметром 2 cm, расположенных на расстоянии 25 cm при напряжении 82 kV.

№ 36. При каком напряжении между двумя проводами будет достигнут градиент 30 kV/cm, если расстояние между ними равно 3 m, а диаметр провода равен 10,6 mm?

№ 37. На какое расстояние можно сблизить между собою два провода диаметром по 16 mm, питаемых трехфазным током с напряжением 40 kV, чтобы максимальный градиент не превысил 28,4 kV/cm?

Примечание. Получающееся при решении задачи логарифмическое уравнение рекомендуется решать графически,

№ 38. Определить наибольший градиент и емкость шарового конденсатора, состоящего из двух концентрических шаров диаметром 4 cm и 10 cm при напражении 15 kV.

Решение. Градиент в конденсаторе, образованном двумя концентрическими шарами, может быть определен по формуле

$$g = \frac{rRU}{r_x^2 (R - r)},$$

где r — радиус внутреннего шара, R — радиус наружного шара, r_x — радиус рассматриваемой точки в пространстве между шарами и U — разность потенциалов между шарами. Наибольший градиент мы получим, подставив в это уравнение наименьшее из возможных значений радиуса r_x, т. е. положив $r_x = r$:

$$g = \frac{RU}{r(R - r)}.$$

Величина емкости шарового конденсатора определяется уравнением

$$C = \frac{\varepsilon rR}{R - r} \text{ cm},$$

или

$$C = \frac{\varepsilon rR}{(R - r)\ \ 9 \cdot 10^{11}} \ F.$$

Подставляя данные в условии задачи величины, получим

$$g = \frac{10 \cdot 15}{4\,(10 - 4)} = 6{,}25 \ \mathrm{kV/cm},$$

$$C = \frac{4 \cdot 10}{(10 - 4) \cdot 9 \cdot 10^{11}} = 7{,}4 \quad 10^{-12} F.$$

№ 39. Определить наибольший градиент и емкость в подвесном изоляторе ВЭТ типа П-4,5 (рис. 8) при напряжении 75 kV.

Размеры изолятора: $R = 5{,}0$ cm, $r = 2{,}8$ cm, $\alpha = 240°$. Диэлектрическая постоянная фарфора равна 5,5.

Примечание. При решении задачи можно рассматривать изолятор, как сферический конденсатор. При определении емкости считать, что емкость изолятора пропорциональна поверхности, охватываемой шапкой изолятора.

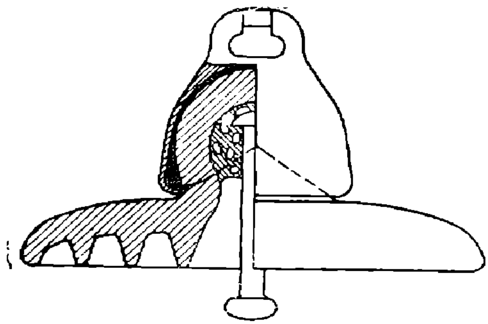

Рис. 8.

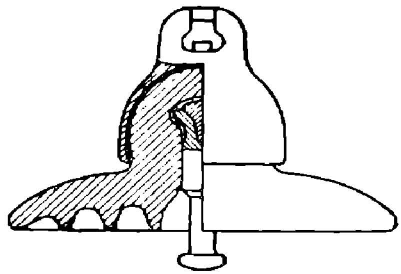

Рис. 9.

№ 40. Подвесной изолятор с конической головкой (Kegelkopf Isolator, рис. 9) установленный на Свирской линии передачи, имеет внутренний радиус шарового углубления в фарфоре, равный 2,9 cm и наружный радиус шарового фарфора — 5,4 cm. Определить наибольшую электрическую силу в нем и его емкость при напряжении $U = 30$ kV, считая, что изолятор образован полушаром и цилиндром с радиусами $r_2 = 1{,}5$ cm, $R_2 = 5{,}0$ cm и высотой $h = 5$ cm. Диэлектрическая постоянная фарфора — 5,5.

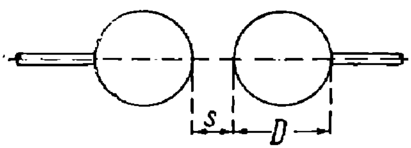

Рис. 10.

№ 41. Два шара диаметром 50 cm расположены на расстоянии 20 cm (рис. 10) и находятся под напряжением 334 kV. Найти наибольший градиент.

Решение. Наибольший градиент на поверхности шара в системе двух шаров приближенно определяется уравнением Дина:

$$g = \frac{Uf}{s} = \frac{U}{4s}\left[\frac{s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2 + 8}\right],$$

где r — радиус шара и s — расстояние между шарами. Подставляя величины U, r и s, получим

$$g=\frac{334}{4\cdot 20}\left[\frac{20}{25}+1+\sqrt{\left(\frac{20}{25}+1\right)^2+8}\,\right]=21{,}5\ \text{kV/cm}.$$

Более точно функция f, входящая в уравнение для градиента, может быть выражена уравнением

$$f=\frac{1}{2}\left(\frac{s}{r}+1\right)+\frac{1}{\frac{s}{r}+2}+\frac{\frac{s}{r}}{2\left(\frac{s}{r}+2\right)^3}+$$

$$+\frac{\frac{s}{r}}{2\left(\frac{s}{r}+2\right)^4}+\frac{\frac{s}{r}}{2\left(\frac{s}{r}+2\right)^5}-\frac{\frac{s}{r}}{\left(\frac{s}{r}+2\right)^7}-$$

$$-\frac{\frac{s}{r}}{\left(\frac{s}{r}+2\right)^8}.$$

Подставляя значение $\frac{s}{r}=0{,}8$ в эту формулу и производя подсчет, получим

$$f=1{,}2830.$$

Поэтому

$$g=\frac{Uf}{s}=\frac{334\cdot 1{,}283}{20}=21{,}42\ \text{kV/cm}.$$

Таким образом, разница между результатом, даваемым приближенной формулой и точной формулой, составляет в данном случае около 0,4%. В наиболее неблагоприятном случае приближенная формула дает ошибку, достигающую до 0,5%, сравнительно с более точной.

№ 42. Разряд между двумя шарами диаметром 125 mm, расположенными на расстоянии 74 mm, произошел при напряжении 170 kV. Найти максимальный градиент при этом напряжении.

№ 43. При каком напряжении произойдет разряд между двумя шарами диаметром 1 m, расположенными на расстоянии 2 m, если наибольший градиент в момент разряда равен 24,95 kV/cm?

№ 44. Найти емкость конденсатора, образованного двумя шарами, расположенными на расстоянии: 1) 1 cm, 2) 10 cm 3) 50 cm, если диаметр шаров равен 25 cm.

Решение. Для определения емкости между двумя шарами можно воспользоваться уравнением

$$C=\frac{s}{4(f-1)}\ \text{cm},$$

или

$$C = \frac{s \cdot 10^{-11}}{36\,(f - 1)}\, F,$$

где f — функция от радиуса шара и расстояния между шарами (см. задачу № 41).

Подставляя условия задачи для первого случая, найдем:

$$C = \frac{s}{\frac{s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2 + 8} - 4} =$$

$$= \frac{1}{0{,}08 - 3 + \sqrt{1{,}08^2 + 8}} = 9{,}52 \text{ cm},$$

или

$$C = \frac{9{,}52}{9 \cdot 10^{11}} = 1{,}056 \quad 10^{-11} F.$$

Для второго случая получим:

$$C = \frac{10}{0{,}8 - 3 + \sqrt{1{,}8^2 + 8}} = 8{,}64 \text{ cm} = 9{,}6 \cdot 10^{-11} F.$$

Для третьего случая получим:

$$C = \frac{50}{4 - 3 + \sqrt{5^2 + 8}} = 7{,}42 \text{ cm} = 8{,}25 \quad 10^{-11} F.$$

№ 45. Определить емкость шарового разрядника с шарами диаметром 10 cm, расположенными на расстоянии 5 cm.

№ 46. При каком диаметре шаров можно получить емкость в 10 cm на расстоянии 2 cm?

Примечание. Уравнение, определяющее емкость шарового разрядника, при заданном s легко решается относительно $\frac{s}{r}$. Найдя $\frac{s}{r}$ определим r и d.

№ 47. Силовые линии идут в фарфоре под углом 60° к его поверхности. Определить, под каким углом выйдут они из фарфора в воздух и в масло. Диэлектрическая постоянная фарфора равна 5,5, масла — 2,5.

Решение. При прохождении силовых линий через поверхность раздела двух диэлектриков имеет место соотношение:

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2},$$

где α_1 — угол, образуемый силовой линией с нормалью к поверхности в первой среде (диэлектрическая постоянная ε_1), и α_2 — угол, образуемый силовой линией с нормалью к поверхности во второй среде (диэлектрическая постоянная ε_2).

Подставляя в это уравнение условия задачи, получим для первого случая:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{1}{5{,}5} \operatorname{tg} 30^\circ = 0{,}105.$$

Отсюда

$$\alpha_2 = 6^\circ.$$

Для второго случая:

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{2{,}5}{5{,}5} \operatorname{tg} 30^\circ = 0{,}263.$$

Отсюда

$$\alpha_2 = 14^\circ 43'.$$

№ 48. Силовые линии выходят из фарфора в воздух, подходя к поверхности раздела под углом 40° к нормали. Найти угол, под которым силовые линии пойдут в воздухе, а также градиент в воздухе, если градиент в фарфоре был равен 3,8 kV/cm. Диэлектрическая постоянная фарфора равна 6,0.

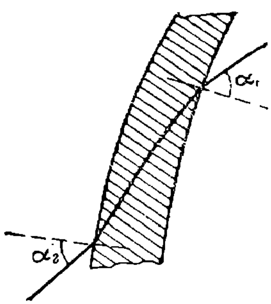

Рис. 11.

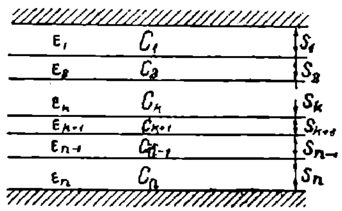

Рис. 12.

№ 49. В проходном изоляторе силовые линии идут из масла ($\varepsilon_1 = 2{,}3$) в фарфор ($\varepsilon_3 = 5{,}7$) и затем в воздух (рис. 11). Угол падения силовых линий равен $\alpha_1 = 55^\circ$. Найти угол α_2, под которым силовые линии выходят из изолятора в воздух.

№ 50. Определить емкость плоского конденсатора (рис. 12), составленного из n слоев с различными диэлектрическими постоянными, и градиент в любом слое.

Решение. Плоской конденсатор, составленный из n слоев, мы можем рассматривать, как n последовательно включенных конденсаторов. Поэтому емкость такого конденсатора должна быть равна

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \qquad + \frac{1}{C_n}} = \frac{1}{\sum\limits_1^n \frac{1}{C_i}},$$

где C_i — емкость любого слоя.

Емкость каждого слоя, пренебрегая влиянием краев, мы можем определить из уравнения

$$C_i \cong \frac{\varepsilon_i S}{4\pi s_i},$$

где s_i — толщина данного слоя, а S — площадь электрода конденсатора.

Поэтому

$$C = \frac{1}{\sum\limits_{1}^{n} \frac{4\pi s_i}{\varepsilon_i S}} = \frac{S}{4\pi \sum\limits_{1}^{n} \frac{s_i}{\varepsilon_i}}.$$

Для определения градиента в каждом слое воспользуемся зависимостью между электрическим смещением и градиентом:

$$D_i = \frac{\varepsilon_i g_i}{4\pi}$$

(знак минус отбрасывается).

Отсюда

$$g_i = \frac{4\pi D_i}{\varepsilon_i}.$$

Электрическое смещение во всех слоях должно быть одинаково, так как все слои включены последовательно и через все слои проходит один и тот же электрический поток. Величину его найдем, разделяя заряд конденсатора Q на его сечение:

$$D_i = \frac{Q}{S}.$$

С другой стороны, мы можем выразить заряд через емкость конденсатора. Поэтому

$$D_i = \frac{CU}{S}.$$

Подставляя это выражение в формулу для градиента, получим:

$$g_i = \frac{4\pi CU}{\varepsilon_i S}.$$

Наконец, подставляя сюда значение емкости C, окончательно найдем:

$$g_i = \frac{4\pi CU}{\varepsilon_i S} = \frac{4\pi U \cdot S}{\varepsilon_i S \cdot 4\pi \sum\limits_{1}^{n} \frac{s_i}{\varepsilon_i}} = \frac{U}{\varepsilon_i \sum\limits_{1}^{n} \frac{s_i}{\varepsilon_i}}.$$

№ 51. В плоский конденсатор заложено 5 слоев бумаги для определения потерь в ней. Толщина каждого слоя бумаги — 0,12 mm. Между слоями бумаги остались зазоры с воздухом общей толщиною 0,06 mm. Найти емкость конденсатора, считая диэлектрическую постоянную бумаги равной 2,8, а также градиент в воздухе и бумаге при напряжении, равном 1000 V. Площадь дисков конденсатора равна 176 cm².

№ 52. Генератор на 11 kV имеет изоляцию из миканитовой гильзы толщиною 2,5 mm, обмотанной пропитанной лентой толщиною 0,5 mm. Между изоляцией и железом статора имеется воздушный зазор в 0,1 mm. Определить градиенты в воздухе и в изоляции, если диэлектрическая постоянная миканита — 5, а ленты — 3.

Примечание. При решении задачи можно рассматривать гильзу, как плоский конденсатор.

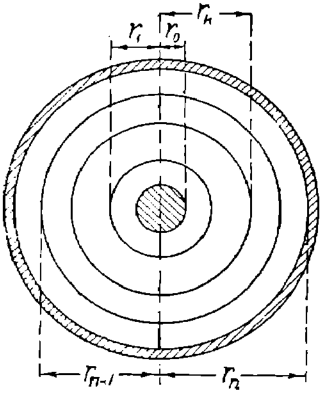

Рис. 13.

№ 53. При укладке в пазы обмотки генератора, имеющего напряжение 11 kV, между изоляцией и железом остался зазор в 0,2 mm. Медь обмотки изолирована миканитовой гильзой толщиной 3,5 mm, обмотанной снаружи слоем пропитанного лаком полотна толщиною 2 mm. Диэлектрическая постоянная миканита — 5, а полотна — 4. Определить максимальный градиент и градиент у поверхности меди.

Примечание. Гильзу рассматривать, как плоский конденсатор.

№ 54. Изоляция обмотки генератора на 6,6 kV состоит из пропитанной компаундом пряжи (диэлектрическая постоянная 4,0), имеющей толщину 0,25 mm, и миканитовой гильзы (диэлектрическая постоянная 4,5), имеющей толщину 3 mm. Определить градиент в миканите и пряже.

Примечание. Гильзу рассматривать, как плоский конденсатор.

№ 55. Определить емкость на единицу длины цилиндрического конденсатора (рис. 13), составленного из нескольких концентрических слоев разных диэлектриков, и градиент в любом слое при напряжении U.

Решение. Рассматривая конденсатор, имеющий диэлектрик в виде нескольких разнородных слоев, как цепь из нескольких последовательно включенных конденсаторов, мы можем определить емкость составного конденсатора уравнением:

$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \qquad + \frac{1}{C_n}} = \frac{1}{\sum\limits_1^n \frac{1}{C_i}},$$

где C_i — емкость любого слоя.

Емкость каждого слоя на единицу длины равна

$$C_i = \frac{\varepsilon_i}{2 \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}.$$

Поэтому

$$C = \frac{1}{\sum\limits_1^n \frac{2 \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}{\varepsilon_i}} = \frac{1}{2 \sum\limits_1^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}.$$

Для нахождения градиента в любом слое, определим электрическое смещение в этом слое:

$$D_i = \frac{Q}{S_i} = \frac{CU}{2\pi r_i}.$$

С другой стороны,

$$D_i = -\frac{\varepsilon_i g_i}{4\pi}.$$

Отсюда (опуская знак минус) получим:

$$g_i = \frac{4\pi D_i}{\varepsilon_i}$$

или

$$g_i = \frac{4\pi CU}{2\pi r_i \varepsilon_i} = \frac{2CU}{\varepsilon_i r_i}.$$

Подставляя сюда значение емкости C_i, найдем:

$$g_i = \frac{2U}{2\varepsilon_i r_i \sum\limits_1^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} = \frac{U}{\varepsilon_i r_i \sum\limits_1^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}.$$

№ 56. Кабель имеет диаметр внутренней проводящей жилы, равный 14,2 mm, и толщину изоляции 11 mm. Определить наибольший градиент в том случае, когда кабель изолирован однородной бумагой, и в том случае, когда он изолирован двумя сортами бумаги с диэлектрическими постоянными 3 и 4. Напряжение между жилой и свинцом 20 kV.

Примечание. Сорта бумаги должны быть расположены так, чтобы получить наиболее выгодное распределение градиента. Это будет достигнуто, когда максимальные градиенты в каждом слое будут равны.

№ 57. Кабель имеет медную жилу, изолированную тремя сортами бумаги, диэлектрические постоянные которых равны $\varepsilon_1 = 4{,}0$, $\varepsilon_2 = 3{,}0$ и $\varepsilon_3 = 2{,}5$. Диаметр медной жилы равен $d = 17$ mm, полная толщина изоляции 15 mm. Определить толщину каждого слоя бумаги таким образом, чтобы максимальный градиент во всех слоях был одинаков. Определить также величину градиента при $U = 75$ kV.

№ 58. Определить наибольший градиент в одножильном кабеле, имеющем диаметр внутренней жилы $d = 15$ mm и толщину изоляции 12 mm. Изоляция состоит из бумаги трех сортов с диэлектрическими постоянными $\varepsilon_1 = 3$, $\varepsilon_2 = 3{,}5$ и $\varepsilon_3 = 4$. Напряжение равно 63,5 kV. Расположение сортов бумаги должно быть таково, чтобы максимальный градиент в каждом слое был одинаков.

№ 59. Стандартный проходной изолятор на 20 kV имеет диаметр сердечника, равный 22 mm. На сердечник надета трубка из бакелизированной бумаги толщиной 5 mm. Толщина фарфора изолятора равна 20 mm, наружный диаметр изолятора 120 mm. Найти наибольшие градиенты во всех слоях изоляции при напряжении, равном 75 kV (сухое разрядное напряжение изолятора), считая диэлектрическую постоянную бакелита равной 4,5 и фарфора — 5,8.

№ 60. Стандартный проходной изолятор на 35 kV имеет диаметр сердечника, равный 22 mm. На сердечник надета трубка из бакелизированной бумаги толщиной 5 mm. Толщина фарфора изолятора равна 24 mm, наружный диаметр изолятора равен 135 mm. Определить напряжение, при котором наибольший градиент в воздухе внутри изолятора достигает величины $g = 27{,}2$ kV/cm. Диэлектрическая постоянная бакелита равна 4,3, а фарфора — 5,6.

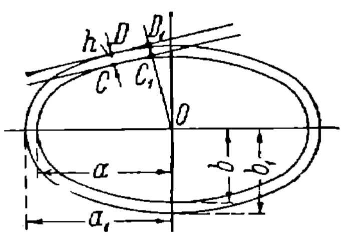

Рис. 14.

№ 61. Найти распределение электричества на поверхности эллипсоида с зарядом Q и полуосями a, b и c (рис. 14).

Решение. Построим вокруг данного эллипсоида другой эллипсоид, концентрический с первым и имеющий полуоси, отличающиеся от полуосей первого на малую величину α, а именно:

$$a_1 = a(1+\alpha),\ b_1 = b(1+\alpha),\ c_1 = c(1+\alpha).$$

Возьмем некоторый элемент поверхности эллипсоида dS около точки C и из общего центра эллипсоидов опустим перпендикуляр на касательные плоскости, проведенные к эллипсоидам в точках C и D. Как видно из рисунка,

$$OD_1 : OC_1 = 1+\alpha$$

и

$$h = OD_1 - OC_1 = p(1+\alpha) - p = \alpha p.$$

Представим себе, что слой между двумя поверхностями эллипсоидов заполнен электрическими зарядами одного знака с объемной плотностью ρ. Тогда заряд, сосредоточенный на площадке dS, будет равен

$$dQ = \rho h dS.$$

Обозначая поверхностную плотность электричества через σ, получим

$$\rho h dS = \sigma dS,$$

или

$$\sigma = h\rho = \alpha p \rho.$$

Полный заряд эллипсоида мы можем найти умножая объемную плотность зарядов ρ на объем эллипсоидного слоя. Последний равен

$$dV = \frac{4}{3}\pi(a_1 b_1 c_1 - abc).$$

Поэтому

$$Q = \frac{4}{3}\pi\rho(a_1 b_1 c_1 - abc).$$

Подставляя значения a_1, b_1 и c_1, получим

$$Q = \frac{4}{3}\pi\rho\left[abc(1+\alpha)^3 - abc\right] =$$

$$= \frac{4}{3}\pi\rho\, abc(1 + 3\alpha + 3\alpha^2 + \alpha^3 - 1) \cong 4\pi\rho\alpha abc.$$

Отсюда находим:

$$\alpha\rho = \frac{Q}{4\pi abc}.$$

Подставим произведение $\alpha\rho$ в выражение для σ:

$$\sigma = \frac{Qp}{4\pi abc}.$$

Величина перпендикуляра, опущенного из центра эллипса на касательную плоскость к нему выражается, как известно из аналитической геометрии, уравнением

$$p = \frac{1}{\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}}.$$

Таким образом, окончательное выражение для поверхностной плотности будет:

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi abc\sqrt{\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4} + \frac{z^2}{c^4}}}.$$

№ 62. Найти величину поверхностной плотности электричества на оконечности цилиндра с закругленными краями, имеющего диаметр $d = 5$ cm и длину $l = 50$ cm, если заряд, сосредоточенный на цилиндре, равен $4 \cdot 10^{-7}$ C.

Примечание. Цилиндр можно приближенно заменить эллипсоидом вращения.

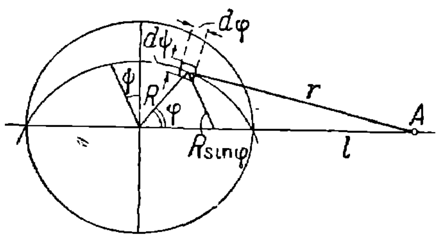

Рис. 15.

№ 63. Найти потенциал, создаваемый заряженным проводящим шаром радиуса R в точке A на расстоянии l от его центра (рис. 15), если заряд шара равен Q, а диэлектрическая постоянная окружающей среды — ε.

Решение. Потенциал в точке A, создаваемый зарядом dQ, расположенным на бесконечно малой площадке dS на поверхности шара, равен

$$dU = \frac{dQ}{\varepsilon r}.$$

Полный же потенциал в точке A, создаваемый всей заряженной поверхностью шара, мы получим, просуммировав все элементарные заряды:

$$U = \frac{1}{\varepsilon}\int\int \frac{dQ}{r}.$$

Пусть шар имеет на поверхности плотность электрических зарядов, равную σ. Тогда

$$dQ = \sigma dS.$$

Пользуясь рисунком, мы можем выразить величину dS так:

$$dS = R^2 \sin\varphi \, d\varphi \, d\psi.$$

Кроме того,

$$r = \sqrt{l^2 + R^2 - 2lR\cos\varphi}.$$

Поэтому

$$U = \frac{\sigma}{\varepsilon} \int_0^{\pi} \int_0^{2\pi} \frac{R^2 \sin\varphi \, d\varphi \, d\psi}{\sqrt{l^2 + R^2 - 2lR\cos\varphi}} =$$

$$= \frac{2\pi R^2 \sigma}{\varepsilon} \int_0^{\pi} \frac{\sin\varphi \, d\varphi}{\sqrt{l^2 + R^2 - 2lR\cos\varphi}} =$$

$$= \frac{2\pi R\sigma}{\varepsilon l} \left| \sqrt{l^2 + R^2 - 2lR\cos\varphi} \right|_0^{\pi} = \frac{4\pi R^2 \sigma}{\varepsilon l}.$$

Но

$$4\pi R^2 = S,$$

и

$$\sigma S = Q.$$

Поэтому

$$U = \frac{Q}{\varepsilon l}.$$

Таким образом, заряженный проводящий шар создает в точках, лежащих вне его, такой же потенциал, какой получили бы эти точки при действии заряда шара, сосредоточенного в его центре.

Заметим, что полученное нами решение позволяет определить и потенциал, который должен быть на поверхности шара, если заряд шара равен Q. Полагая $l = R$, получим:

$$U = \frac{Q}{\varepsilon R}.$$

№ 64. Шина высоковольтной лаборатории заканчивается шаром, диаметр которого равен 150 mm. Потенциал шара равен 130 kV. Найти потенциал в точке, расположенной на расстоянии 2 m от центра шара.

№ 65. Найти потенциал, создаваемый шаром с равномерно распределенным на его поверхности электричеством в точке, лежащей внутри его на расстоянии l от его центра. Радиус шара равен R, плотность электричества — σ, диэлектрическая постоянная среды — ε.

№ 66. Найти потенциал, создаваемый шаром, заполненным зарядом с равномерной объемной плотностью ρ в точке, лежащей на расстоянии l от центра шара. Радиус шара — R, диэлектрическая постоянная среды — ε.

Примечание. При решении задачи следует рассмотреть 3 случая: 1) точка лежит вне шара; 2) точка лежит на поверхности шара; 3) точка лежит внутри шара.

Рекомендуется при решении воспользоваться решением задач № 63 и 65.

№ 67. Доказать, что внутри шара, заполненного зарядом с равномерной объемной плотностью ρ, всегда имеет место уравнение Пуассона

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{4\pi}{\varepsilon}\rho,$$

где x, y и z — координаты некоторой точки, причем начало координат находится в центре шара.

Примечание. При решении воспользоваться результатом решения задачи № 61.

№ 68. Грозовое облако мы можем рассматривать, как некоторый объем, заполненный электрическими зарядами с объемной плотностью ρ. Определить потенциал, создаваемый этим облаком у земной поверхности, предполагая, что облако имеет форму шара, диаметром $D = 1$ km, что высота центра шара над землей равна 0,8 km и что плотность электрических зарядов в облаке равна $2{,}5 \cdot 10^{-15}$ C/cm. Влиянием земли пренебрегаем.

Примечание. Для того чтобы получить потенциал в вольтах при пользовании формулой, полученной в задаче № 66, следует результат умножить на $9 \cdot 10^{11}$.

№ 69. Найти распределение потенциала, электрическую силу и емкость сферического конденсатора, если потенциал внутреннего шара равен U_1, внешнего U_2, а их радиусы равны соответственно R_1 и R_2. Диэлектрическая постоянная среды равна ε.

Решение. Вследствие симметрии системы, распределение электричества на поверхностях обоих шаров должно быть равномерным. В силу симметрии очевидно также, что и поверхности уровня между двумя шарами должны представлять собою сферические поверхности, концентричные обоим проводящим шарам. Поэтому потенциал U в любой точке между шарами будет зависеть только от расстояния этой точки до центра шаров, т. е. мы будем иметь зависимость

$$U = f(r).$$

Приняв за начало координат центр шаров, получим

$$r^2 = x^2 + y^2 + z^2. \tag{1}$$

Потенциал электрического поля между шарами должен удовлетворять уравнению Лапласа:

$$\Delta^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = 0.$$

Исключаем из этого уравнения координаты x, y и z, выражая их и их производные через r.

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial r} \cdot \frac{\partial r}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial r} \cdot \frac{x}{r},$$

так как из уравнения (1) следует, что

$$2rdr = 2xdx,$$

и

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x}{r}.$$

Далее,

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\left(\frac{\partial r}{\partial x}\right)^2 + \frac{\partial U}{\partial r}\left(\frac{r - x \cdot \frac{x}{r}}{r^2}\right) =$$

$$= \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \cdot \frac{x^2}{r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} \cdot \frac{1}{r}\left(1 - \frac{x^2}{r^2}\right).$$

В силу симметрии мы можем написать:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \cdot \frac{y^2}{r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} \cdot \frac{1}{r}\left(1 - \frac{y^2}{r^2}\right)$$

$$\frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \cdot \frac{z^2}{r^2} + \frac{\partial U}{\partial r} \cdot \frac{1}{r}\left(1 - \frac{z^2}{r^2}\right).$$

Суммируя, получаем:

$$\Delta^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2}{r^2}\right) + \frac{\partial U}{\partial r} \quad \frac{1}{r}\left(3 - \frac{x^2 + y^2 + z^2}{r^2}\right) =$$

$$= \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial U}{\partial r}.$$

Введем обозначение:

$$-\frac{dU}{dr} = -\frac{\partial U}{\partial r} = E \text{ и } \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = -\frac{dE}{dr}.$$

Тогда

$$-\frac{dE}{dr} - \frac{2E}{r} = 0,$$

и

$$\frac{dE}{E} = -\frac{2dr}{r},$$

откуда

$$\ln E = -\ln r^2 + C'_1 = \ln \frac{C_1}{r^2},$$

или

$$E = \frac{C_1}{r^2},$$

а следовательно,

$$\frac{dU}{dr} = -E = -\frac{C_1}{r^2}.$$

Отсюда получим

$$U = -\int \frac{C_1}{r^2}\, dr = \frac{C_1}{r} + C_2.$$

Для внутреннего шара будем иметь

$$U_1 = \frac{C_1}{R_1} + C_2,$$

а для внешнего:

$$U_2 = \frac{C_1}{R_2} + C_2.$$

Вычитая, найдем

$$U_1 - U_2 = C_1\left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right).$$

Поэтому

$$C_1 = \frac{(U_1 - U_2)\, R_1 R_2}{R_2 - R_1}.$$

Таким образом, окончательный вид уравнения для потенциала будет

$$U = C_2 + \frac{(U_1 - U_2)\, R_1 R_2}{r\,(R_2 - R_1)}.$$

Если мы предположим, что на бесконечности потенциал равен нулю, то $C_2 = 0$, и

$$U = \frac{(U_1 - U_2)\, R_1 R_2}{r\,(R_2 - R_1)}.$$

Теперь мы можем определить электрическую силу:

$$E = \frac{C_1}{r^2} = \frac{(U_1 - U_2)\, R_1 R_2}{r^2\,(R_2 - R_1)}.$$

Максимума электрическая сила достигает, когда величина r становится наименьшей, т. е. при $r = R_1$:

$$E_{\max} = \frac{(U_1 - U_2)\, R_2}{R_1\,(R_2 - R_1)}.$$

Для определения емкости найдем заряд каждого из шаров. Его можно выразить следующим образом:

$$Q_1 = 4\pi R_1^{\,2} \sigma_1,$$

где σ_1 — поверхностная плотность на внутреннем шаре. Но

$$\sigma_1 = D_1 = \frac{\varepsilon E_{\max}}{4\pi},$$

где D_1 — электрическое смещение у самой поверхности внутреннего шара. Поэтому

$$Q_1 = \frac{4\pi R_1^2 \varepsilon R_2 (U_1 - U_2)}{4\pi R_1 (R_2 - R_1)} = \frac{\varepsilon R_1 R_2 (U_1 - U_2)}{R_2 - R_1}.$$

Отсюда найдем емкость:

$$C = \frac{Q_1}{U_1 - U_2} = \frac{\varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}\ \mathrm{cm} = \frac{\varepsilon R_1 R_2}{(R_2 - R_1) \cdot 9 \cdot 10^{11}} F.$$

№ 70. Найти распределение потенциала, электрическую силу и емкость на единицу длины цилиндрического конденсатора, если потенциал внутреннего цилиндра равен U_1, его радиус — R_1, потенциал внешнего цилиндра — U_2, а его радиус R_2. Диэлектрическая постоянная среды — ε.

Примечание. При решении следует исходить из уравнения Лапласа и принять во внимание симметрию поля относительно оси Z.

№ 71. Найти зависимость между потенциалами и зарядами системы, состоящей из n параллельных проводов, предполагая, что диаметры проводов весьма малы по сравнению с расстоянием между ними.

Решение. Если расстояние между проводами велико по сравнению с их радиусами, мы можем приближенно считать, что электрические оси проводов совпадают с их геометрическими осями. Тогда потенциал, создаваемый каким-либо проводом № 1 на расстоянии r от его оси, можно выразить уравнением

$$U_1 = C_1 - C_2 \ln r$$

и электрическую силу в этой точке — уравнением

$$E = -\frac{dU}{dr} = \frac{C_2}{r}.$$

Определяя электрическую силу у самой поверхности провода, получим:

$$E_1 = \frac{C_2}{r_1}. \qquad (1)$$

Если провод имеет заряд q_1 на единицу длины, то электрическое смещение у самой поверхности провода должно быть равно

$$D_1 = \frac{q_1}{2\pi r_1}.$$

С другой стороны, электрическое смещение может быть выражено через электрическую силу:

$$D_1 = \frac{\varepsilon E_1}{4\pi}.$$

Поэтому

$$\frac{q_1}{2\pi r_1} = \frac{\varepsilon E_1}{4\pi},$$

или

$$E_1 = \frac{2q_1}{\varepsilon r_1}.$$

Сравнивая это уравнение с уравнением (1) и принимая во внимание, что для воздуха $\varepsilon = 1$, мы получим:

$$C_2 = 2q_1.$$

Таким образом,

$$U_1 = C_1 - 2q_1 \ln r = C_1 + 2q_1 \ln \frac{1}{r}. \qquad (2)$$

Определяя это напряжение при радиусе, равном r_1, получим потенциал на поверхности данного провода, создаваемый собственным зарядом:

$$U_1 = C_1 + 2q_1 \ln \frac{1}{r_1}.$$

Потенциал, создаваемый другим проводом в какой-либо точке на расстоянии r от его оси, выразится уравнением, аналогичным уравнению (2):

$$U_2 = C_1 + 2q_2 \ln \frac{1}{r}.$$

Если расстояние между первым и вторым проводом равно S_{12}, то потенциал в месте, занимаемом первым проводом, создаваемый вторым проводом, будет равен

$$U_2 = C_1 + 2q_2 \ln \frac{1}{S_{12}}.$$

Аналогичные выражения мы получим для потенциалов, создаваемых на первом проводе всеми другими проводами. Суммируя эти частичные потенциалы, найдем полный потенциал первого провода:

$$U_1 = 2q_1 \ln \frac{1}{r_1} + 2q_2 \ln \frac{1}{S_{12}} + \ldots + 2q_n \ln \frac{1}{S_{1n}} + C'.$$

Произвольную постоянную C' мы можем отбросить, так как мы можем определить лишь относительную, а не абсолютную величину потенциала. Тогда

$$U_1 = 2q_1 \ln \frac{1}{r_1} + 2q_2 \ln \frac{1}{S_{12}} + \ldots + 2q_n \ln \frac{1}{S_{1n}}.$$

Путем аналогичных рассуждений мы можем определить потенциалы всех других проводов системы:

$$U_2 = 2q_1 \ln \frac{1}{S_{21}} + 2q_2 \ln \frac{1}{r_2} + \ldots + 2q_n \ln \frac{1}{S_{2n}},$$

$$U_3 = 2q_1 \ln \frac{1}{S_{31}} + 2q_2 \ln \frac{1}{S_{32}} + \ldots + 2q_n \ln \frac{1}{S_{3n}},$$

$$U_n = 2q_1 \ln \frac{1}{S_{n1}} + 2q_2 \ln \frac{1}{S_{n2}} + \ldots + 2q_3 \ln \frac{1}{r_n}.$$

Обозначим:

$$\alpha_{11} = 2 \ln \frac{1}{r_1}$$

$$\alpha_{12} = 2 \ln \frac{1}{S_{12}}$$

$$\alpha_{ii} = 2 \ln \frac{1}{r_i}$$

$$\alpha_{ik} = 2 \ln \frac{1}{S_{ik}}$$

$$\alpha_{nn} = 2 \ln \frac{1}{r_n}.$$

Тогда мы можем представить полученные выше уравнения в такой форме:

$$U_1 = \alpha_{11}q_1 + \alpha_{12}q_2 + \ldots + \alpha_{1n}q_n$$
$$U_2 = \alpha_{12}q_1 + \alpha_{22}q_2 + \ldots + \alpha_{2n}q_n$$

$$U_n = \alpha_{1n}q_1 + \alpha_{2n}q_2 + \ldots + \alpha_{nn}q_n.$$

В таком виде эти уравнения были получены впервые Максвеллом почему их обычно и называют уравнениями Максвелла.

Заметим, что в уравнениях Максвелла всегда $\alpha_{ik} = \alpha_{ki}$.

№ 72. Найти емкость двухпроводной линии между проводами и емкость проводов относительно земли.

Решение. Емкость конденсатора, образованного двумя проводами, мы можем выразить уравнением

$$C = \frac{q_1}{U_1 - U_2},$$

где q_1 — заряд провода 1. Очевидно, что заряд второго провода равен ему по величине и обратен по знаку. Если мы примем, что q_1 изображает заряд на единицу длины провода, то это уравнение даст нам емкость на единицу длины провода.

Напишем уравнения Максвелла для нашей системы проводов:

$$U_1 = \alpha_{11} q_1 + \alpha_{12} q_2,$$
$$U_2 = \alpha_{12} q_1 + \alpha_{22} q_2.$$

Вычитая второе уравнение из первого, получим:

$$U_1 - U_2 = (\alpha_{11} - \alpha_{12}) q_1 + (\alpha_{12} - \alpha_{22}) q_2.$$

Заменим q_2 через $-q_1$:

$$U_1 - U_2 = (\alpha_{11} - 2\alpha_{12} + \alpha_{22}) q_1.$$

Подставляя это выражение в уравнение для емкости, получим:

$$C = \frac{q_1}{U_1 - U_2} = \frac{1}{\alpha_{11} - 2\alpha_{12} + \alpha_{22}} = \frac{1}{2\left(\ln\frac{1}{r_1} - 2\ln\frac{1}{S_{12}} + \ln\frac{1}{r_2}\right)} = \frac{1}{2\ln\frac{S_{12}^2}{r_1 r_2}}.$$

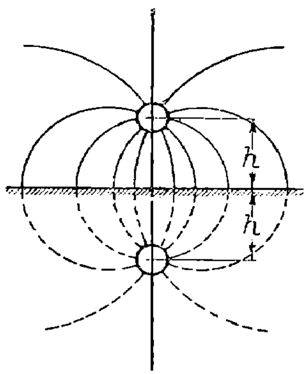

Рис. 16.

Если радиусы проводов равны, то

$$C = \frac{1}{4\ln\frac{S_{12}}{r_1}}.$$

Для того чтобы определить емкость провода относительно земли, рассмотрим электрическое поле между проводами и землей, представленное на рис. 16, причем поверхность земли будем рассматривать, как проводящую плоскость. Нетрудно видеть, что если мы вообразим себе под поверхностью земли второй провод, расположенный на таком же расстоянии h от поверхности земли, как и первый, то поле этого провода будет совершенно симметрично полю первого провода, и эти два поля вместе образуют такое же поле, какое мы получили бы, если бы поместили два провода на расстоянии $2h$ друг от друга. Поэтому и емкость провода относительно земли должна быть равна емкости двух проводов, помещенных на расстоянии $2h$ друг от друга, только увеличенной в 2 раза, т. е.

$$C_e = \frac{1}{2\ln\frac{2h}{r_1}}$$

Заметим, что во многих случаях бывает важно знать не только емкость между проводами или емкость их относительно земли, но и емкость проводов относительно нейтральной точки. Эту емкость мы получим, удваивая емкость между проводами, как это ясно из рис. 17, т. е. полагая, как и выше, что емкость между проводами образуется путем последовательного включения двух емкостей относительно нейтрали. Таким образом

$$C_n = \frac{1}{2 \ln \frac{S_{12}}{r_1}}.$$

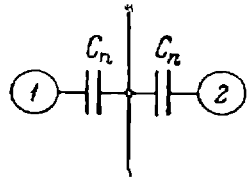

Рис. 17.

Во всех вышеприведенных формулах емкость выражена в сантиметрах на 1 cm длины провода.

№ 73. Два провода диаметром 10 mm расположены на расстоянии 3 m и находятся на высоте $h = 12$ m от земли. Найти емкость между проводами, емкость проводов относительно нейтрали и емкость проводов относительно земли. Результаты выразить в фарадах на километр длины провода.

№ 74. При заданной разности потенциалов между шарами сферического конденсатора U найти величину радиуса R_1, при котором электрическая сила у поверхности внутреннего шара будет наименьшей, предполагая толщину диэлектрика неизменной.

№ 75. При заданной разности потенциалов между шарами сферического конденсатора U найти величину радиуса R_1, при котором электрическая сила у поверхности внутреннего шара будет наименьшая, предполагая радиус наружного шара R_2 неизменным.

№ 76. При заданной разности потенциалов между цилиндрами конденсатора U найти отношение радиусов наружного и внутреннего цилиндров $\frac{R_2}{R_1}$, при котором градиент у поверхности внутреннего цилиндра будет наименьший, считая радиус наружного цилиндра неизменным.

II. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ГАЗОВ.

№ 77. Определить ток насыщения плоского конденсатора, имеющего диски диаметром 1,5 m и расстояние между ними 60 cm, предполагая, что в cm^3 воздуха содержится 1500 пар ионов.

Примечание. Ток насыщения в амперах определяется уравнением

$$i = 2{,}42 \cdot 10^{-25} n^2 s S,$$

где n — число пар ионов, s — расстояние между пластинами конденсатора и S — площадь пластины.

№ 78. Определить ток насыщения плоского конденсатора, имеющего диски диаметром 10 cm при расстоянии между ними 3,5 cm, предполагая, что в cm^3 воздуха содержится 1200 пар ионов.

№ 79. Вычислить число ионизирующих столкновений электронов α при $E = 30$ kV/cm и при $E = 38$ kV/cm, полагая постоянную $A = 3080$.

Примечание. По Шуману $\alpha = Ae^{-\frac{5000}{E^2}}$

№ 80. Найти число ионизирующих столкновений электронов при $E = 28$ kV/cm.

№ 81. Определить пробивной градиент в равномерном электрическом поле, если расстояние между электродами равно $s = 5$ cm, пользуясь формулой Шумана.

Решение. Пробивной градиент связан с расстоянием между электродами и зависимостью

$$\ln s = \ln \frac{N}{A} + \frac{B}{g^2},$$

где

$$\frac{N}{A} = 7{,}95 \cdot 10^{-8} \text{ и } B = 5000.$$

Из этой зависимости находим градиент:

$$g = \sqrt{\frac{B}{\ln \frac{sA}{N}}} = \sqrt{\frac{5000}{\ln 5 - \ln 7{,}95 \cdot 10^{-3}}} = 27{,}8 \text{ kV/cm}.$$

№ 82. Определить пробивной градиент в равномерном поле, пользуясь формулой Шумана, если расстояние между электродами равно 10 cm.

№ 83. Толщина воздушных щелей в кабеле равна 50 μ. При каком давлении электрическая прочность воздуха в этих щелях достигнет минимума и во сколько раз эта прочность меньше прочности воздуха при той же толщине и при атмосферном давлении.

Решение. Электрическая прочность воздуха достигает минимума, когда произведение давления газа на расстояние между электродами равно

$$ps = 4 \text{ mm} \cdot \text{mm}.$$

Здесь p выражено в mm ртутного столба и s — в mm. Если мы выразим p — в атмосферах, а s — в сантиметрах, то получим:

$$ps = 5{,}27 \quad 10^{-4} \text{ at} \cdot \text{cm}.$$

Отсюда находим:

$$p = \frac{5{,}27 \quad 10^{-4}}{50 \cdot 10^{-4}} = 0{,}1054.$$

При этих условиях пробивное напряжение воздуха имеет постоянную величину, равную 340 V, независимо от толщины щели. Предполагая, что электрическое поле в пределах щели, вследствие ее малой толщины, мало изменяется, примем его равномерным. Тогда

$$g = \frac{340 \cdot 10^{-3}}{50 \cdot 10^{-4}} = 68\ \text{kV/cm}.$$

При атмосферном давлении пробивной градиент может быть определен по формуле Шумана или по более простой эмпирической формуле

$$g_1 = 24{,}5\left(1 + \frac{0{,}28}{\sqrt{s}}\right)\text{kV/cm},$$

из которой следует:

$$g_1 = 24{,}5\left(1 + \frac{0{,}28}{\sqrt{50 \cdot 10^{-4}}}\right) = 121{,}5\ \text{cm}.$$

Отношение пробивных градиентов равно

$$\frac{g_1}{g} = \frac{121{,}5}{68} = 1{,}78.$$

№ 84. Определить минимальную электрическую прочность и давление, при котором она будет достигнута в щели, имеющей толщину 35 μ.

№ 85. Коэфициент импульса при разряде в равномерном поле был равен 1,05. Найти время разряда, полагая коэфициент a в формуле Пика равным 0,1.

Решение. По формуле Пика коэфициент импульса равен

$$\beta = 1 + \frac{a}{\sqrt{\tau}}.$$

Отсюда время разряда τ равно

$$\tau = \left(\frac{a}{\beta - 1}\right)^2 = \left(\frac{0{,}1}{1{,}05 - 1}\right)^2 = 4\ \mu\,\text{sec}.$$

№ 86. Определить время разряда на гирлянде, зная коэфициент импульса $\beta = 1{,}75$ и постоянную $a = 0{,}8$.

№ 87. Разряд между иглами при воздействии на них волны длиною 5 μsec произошел при напряжении 1900 kV. При напряжении 50 Hz и том же расстоянии между иглами разряд происходит при напряжении 800 kV_m. Определить время разряда, полагая $a = 2{,}2$.

№ 88. Определить постоянную a в формуле Пика, если известен коэфициент импульса $\beta = 1{,}6$ и время разряда $\tau = 2{,}25\ \mu$sec.

№ 89. Напряжение на фронте волны возрастает прямолинейно со скоростью $5 \frac{MV}{\mu\, sec}$. Найти коэфициент импульса гирлянды изоляторов при разряде на ней от этой волны, принимая $a = 0,8$, и сухое разрядное напряжение гирлянды $U_c = 420$ kV.

Решение. Коэфициент импульса равен отношению разрядного напряжения при импульсе к амплитуде сухого разрядного напряжения гирлянды, т. е.

$$\beta = \frac{U_{ci}}{U_c} = \frac{U_{ci}}{420\sqrt{2}}.$$

Отсюда

$$U_{ci} = 420\sqrt{2}\,\beta.$$

С другой стороны, при прямолинейном возрастании напряжения импульсное разрядное напряжение должно быть равно

$$U_{ci} = k\tau = 5000\,\tau.$$

Приравнивая полученные выражения для U_{ci}, получим

$$420\sqrt{2}\,\beta = 5000\,\tau.$$

Но

$$\tau = \left(\frac{a}{\beta - 1}\right)^2$$

а поэтому

$$420\sqrt{2}\,\beta = 5000\left(\frac{a}{\beta - 1}\right)^2$$

Отсюда находим:

$$\beta(\beta - 1)^2 = \frac{5000 \cdot 0,8^2}{420\sqrt{2}} = 5,39.$$

Это кубическое уравнение легко решается подбором и дает для β величину

$$\beta = 2,475.$$

№ 90. Напряжение на фронте волны возрастает прямолинейно со скоростью 10 MV/μ sec. Найти коэфициент импульса гирлянды изоляторов, имеющей сухое разрядное напряжение $U_c = 700$ kV, принимая $a = 0,8$.

№ 91. Напряжение на фронте волны возрастает прямолинейно со скоростью 5 MV/μ sec. Найти коэфициент импульса для разряда на рогах, защищающих опору от расщепления, предполагая разрядное напряжение между рогами при 50 Hz равным 650 $kV_{ш}$ и считая $a = 2,0$.

№ 92. Найти пробивное напряжение между дисками при расстоянии между ними 5 cm, предполагая плотность воздуха равной единице.

Решение. В равномерном электрическом поле, каким является поле между двумя дисками, предполагая, что их края закруглены таким образом, что на них не происходит увеличения градиента, пробой газа определяется следующей эмпирической формулой:

$$g = 24{,}5\,\delta\left(1 + \frac{0{,}28}{\sqrt{s\delta}}\right) \mathrm{kV_m/cm}.$$

Здесь g — пробивной градиент газа в киловольтах максимальных на cm, δ — относительная плотность воздуха и s — расстояние между электродами в сантиметрах. Подставляя в эту формулу значения s и δ, данные в условии задачи, получим:

$$g = 24{,}5\left(1 + \frac{0{,}28}{\sqrt{5}}\right) = 27{,}6\ \mathrm{kV_m/cm}.$$

Пробивное напряжение найдем, умножая пробивной градиент на расстояние между электродами:

$$U_d = 27{,}6 \cdot 5 = 138\ \mathrm{kV_m}.$$

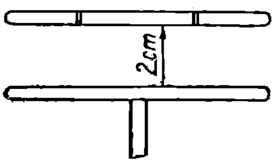

Рис. 18.

Выражая пробивное напряжение в эффективных киловольтах, получим:

$$U_d = \frac{138}{\sqrt{2}} = 97{,}6\,\mathrm{kV}.$$

№ 93. Рассчитать пробивное напряжение в вольтметре Чернышева (рис. 18), если расстояние между его дисками равно 2 cm, а $\delta = 1$.

№ 94. Чему равно разрядное напряжение между дисками вольтметра Абрагама и Вийяра (рис. 19), если расстояние между ними равно 15 cm? Плотность воздуха $\delta = 1$.

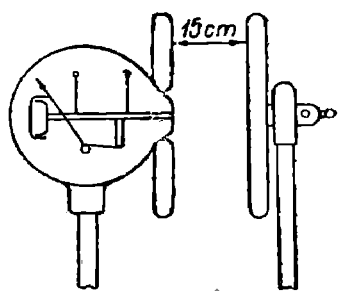

Рис. 19.

№ 95. Найти пробивное напряжение между иглами, расположенными на расстоянии 90 cm, если одна из игл заземлена и если обе иглы изолированы. Плотность воздуха равна 1.

Решение. Зависимость пробивного напряжения от расстояния s между иглами при $s \geqslant 8$ cm выражается линейным уравнением. В случае, когда одна из игл заземлена, это уравнение имеет вид

$$U_d = \delta (20 + 4.5\, s)\, \mathrm{kV_m},$$

где δ — относительная плотность воздуха.

Подставляя в это уравнение условия задачи, найдем:

$$U_d = 20 + 4{,}5 \cdot 90 = 425\ \mathrm{kV_m}.$$

Выраженное в эффективных киловольтах пробивное напряжение будет равно

$$U_d = 300\ \mathrm{kV}.$$

Когда обе иглы изолированы, уравнение имеет вид:

$$U_d = \delta (20 + 5{,}0\, s)\, \mathrm{kV}.$$

Отсюда найдем:

$$U_d = 20 + 5 \cdot 90 = 470\ \mathrm{kV_m},$$

или

$$U_d = 332\ \mathrm{kV}.$$

№ 96. На трансформаторе для защиты выводных изоляторов поставлен защитный шаровой разрядник с шарами диаметром 5 cm на расстоянии 95 cm. Найти напряжение, при котором и произойдет разряд между шарами.

Примечание. При большом расстоянии между шарами ($s \geqslant 10\ d$) разрядное напряжение между шарами приблизительно равно таковому для игл.

№ 97. Наибольшая длина искры, достигнутая в настоящее время в лабораторных условиях, равна 9,15 m. Найти необходимое для этого напряжение, считая коэфициент импульса равным 2,43.

№ 98. Расстояние между токоведущими частями выводов трансформатора на 6,6 kV равно 10 cm. Определить коэфициент запаса на разряд (т. е. отношение разрядного напряжения к рабочему).

Примечание. Вследствие наличия острых краев на токоведущих частях выводов разрядное напряжение между ними можно считать приближенно таким же, как между иглами, расположенными на том же расстоянии.

№ 99. Расстояние между токоведущими частями выводов трансформатора на 38,5 kV равно 34 cm. Найти коэфициент запаса на разряд.

Примечание. См. задачу № 98.

№ 100. Найти наименьшее расстояние между токоведущими частями выводов масляного выключателя на 110 kV, принимая коэфицпепт запаса равным 3.

Примечание. См. задачу № 98.

№ 101. Защитные рога гирлянды изоляторов расположены на расстоянии 80 cm. Найти, при каком напряжении произойдет разряд между ними, предполагая коэфициент импульса равным 3 и относительную плотность воздуха равной $\delta = 1{,}04$.

№ 102. Для вывода проводов из высоковольтной лаборатории на 2000 kV в стене сделано круглое отверстие диаметром 8 m. Диаметр провода — 10 cm. Определить разрядное напряжение с провода на стену, предполагая $\delta = 1$.

Решение. Хотя в данном случае мы имеем систему из двух концентрических цилиндров (провод-отверстие), но было бы неправильно применить здесь формулу Пика для определения пробивного градиента в концентрических цилиндрах:

$$g = 31\,\delta\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r\delta}}\right)\ \mathrm{kV/cm},$$

так как эта формула пригодна для данной цели только при условии

$$\frac{R}{r} \leqslant 10.$$

Между тем, по условию задачи

$$\frac{R}{r} = \frac{400}{5} = 80.$$

Принимая во внимание, что толщина стены мала сравнительно с диаметром отверстия и что края отверстия негладки, мы можем приближенно считать, что разрядное напряжение с провода на стену равно пробивному напряжению между иглами. Поэтому

$$U_d = 20 + 4{,}5\,s = 20 + 4{,}5\,(400 - 5) = 1798\ \mathrm{kV}_m,$$

или

$$U_d = 1270\ \mathrm{kV}.$$

№ 103. Определить диаметр отверстия в стене, необходимого для вывода в цех напряжения от испытательного трансформатора, имеющего напряжение 150 kV относительно земли. Диаметр провода 2 cm. Коэфициент запаса должен быть равен 1,5.

№ 104. Определить диаметр отверстия в стене, необходимого для проведения через него провода от испытательного трансформатора, имеющего напряжение 300 kV относительно земли. Провод имеет диаметр 5 cm. Коэфициент запаса равен 1,5.

№ 105. Конец стрелки вольтметра Кельвина при полном отклонении отстоит от стенки металлического ящика прибора на 2,3 cm. Определить разрядное напряжение.

Решение. Устройство, состоящее из острого конца стрелки, расположенного на некотором расстоянии от металлической стенки ящика прибора, мы можем уподобить игле, расположенной против плоскости (рис. 20). Если мы рассмотрим поле, которое получается в этом случае, и изобразим по другую сторону от плоскости симметричную картину, то мы получим такую картину, которая ничем не отличается от картины поля, получающегося между двумя иглами, расположенными на удвоенном расстоянии иглы от плоскости. Это обстоятельство дает нам ключ к решению задачи. Из рис. 20 ясно, что для поля между двумя иглами, расположенными на расстоянии $2s$, плоскость, расположенная на расстоянии s от каждой иглы, будет иметь потенциал относительно любой иглы, равной половине разности потенциалов между иглами. Очевидно также, что если при данном напряжении U_{2s} между иглами происходит разряд, то в этот момент разность потенциалов между иглой и плоскостью U_s будет в 2 раза меньше, чем U_{2s}. Пробой между иглой и плоскостью определяется максимальным градиентом у иглы и всей конфигурацией поля. Этот градиент и эта конфигурация соответствуют градиенту и конфигурации поля между двумя иглами на удвоенном расстоянии $2s$. Поэтому мы можем приближенно считать, что пробивное напряжение между иглой и плоскостью мы получим, если разделим пополам пробивное напряжение между двумя иглами, расположенными на удвоенном расстоянии. При малых расстояниях между иглами ($s \leqslant 6$ cm) пробивное напряжение между ними может быть выражено эмпирической формулой

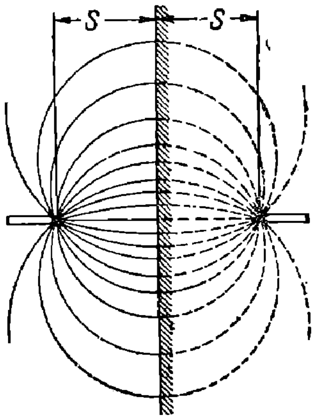

Рис. 20.

$$U_d = 12{,}6\, s^{0,85}\ \mathrm{kV}_m.$$

Пользуясь этой формулой, найдем

$$U_{d_1} = \frac{U_{d_2}}{2} = \frac{12{,}6}{2}(2 \cdot 2{,}3)^{0,85} = 23\ \mathrm{kV}_m,$$

или

$$U_{d_1} = 16{,}3\ \mathrm{kV}.$$

Сравним пробивное напряжение, которое получается между двумя иглами на расстоянии 2,3 cm:

$$U_d + 12{,}6 \cdot 2{,}3^{0,85} = 25{,}6\,\mathrm{kV_m}.$$

Оно оказывается большим, чем пробивное напряжение между иглой и плоскостью.

№ 106. Конец шины находится на расстоянии 0,65 m от стены Определить разрядное напряжение шины на стену.

№ 107. Найти пробивное напряжение между двумя круглыми шинами, диаметром 2 cm, расположенными на расстоянии 25 cm, при $\delta = 1$.

Решение. Пробой воздуха между двумя круглыми шинами должен наступить тогда, когда градиент электрического поля у поверхности шин станет равным пробивному. Последний определяется уравнением:

$$g_d = 30\,\delta\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{r\delta}}\right) = 30\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{1}}\right) = 39{,}03\ \mathrm{kV_m/cm}.$$

Градиент у поверхности шин выражается уравнением

$$g = \frac{2U\sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1}}{(S-d)\ln\left[\frac{S}{d} + \sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1}\right]}\ \mathrm{kV/cm}.$$

Мы не пользуемся приближенной формулой для g потому, что последняя применима без существенной ошибки только при условии

$$\frac{S}{r} \geqslant 100.$$

В нашем же случае

$$\frac{S}{r} = \frac{25}{1} = 25 < 100.$$

Приравнивая g_d и g, найдем из полученного уравнения пробивное напряжение U_d.

$$U_d = g_d(S-d)\ln\left[\frac{S}{d} + \sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1}\right]\frac{1}{2\sqrt{\left(\frac{S}{d}\right)^2 - 1}} =$$

$$= 39{,}02 \cdot (25 - 2)\ln\left[12{,}5 + \sqrt{12{,}5^2 - 1}\right]\frac{1}{2\sqrt{12{,}5^2 - 1}} =$$

$$= 116{,}0\ \mathrm{kV_m},$$

или

$$U_d = 82{,}1\ \mathrm{kV}.$$

№ 108. Найти пробивное напряжение между двумя круглыми шинами диаметром 36 mm, расположенными на расстоянии 1,5 m, если температура помещения равна 5° и давление — 700 mm ртутного столба.

Примечание. Когда отношение $\frac{S}{r} > 30$, следует пользоваться выражением для пробивного градиента в таком виде:

$$g = 30\delta\left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{r\delta}} \quad \frac{S}{30\,r}\right) \mathrm{kV_m/cm}.$$

Относительная плотность воздуха определяется уравнением:

$$\delta = \frac{3{,}92\,B}{273 + t},$$

где B выражено в cm ртутного столба и t — в градусах Цельсия.

№ 109. Реактор выполнен из круглых проводников диаметром 12,6 mm, расположенных на расстоянии 5 cm друг от друга. Найти пробивное напряжение между витками реактора, считая коэфициент импульса равным 2,5, а плотность воздуха $\delta = 1$.

Примечание. Приближенно можно рассматривать витки реактора как параллельные провода.

№ 110. В шаровом разряднике, имеющем шары диаметром 125 mm, разряд произошел при расстоянии между шарами 74 mm. Определить пробивное напряжение, предполагая $\delta = 1$. Шары изолированы.

Решение. 1-й способ. По формуле Пика пробивной градиент между шарами равен:

$$g_d = 27{,}2\,\delta\left(1 + \frac{0{,}54}{\sqrt{r\delta}}\right) \mathrm{kV_m/cm}.$$

Так как $\delta = 1$, а $r = 6{,}25$ cm, из этой формулы получим

$$g_d = 27{,}2\left(1 + \frac{0{,}54}{\sqrt{6{,}25}}\right) = 33{,}1\ \mathrm{kV_m/cm}.$$

Если известен пробивной градиент g_d, то пробивное напряжение мы находим из формулы

$$U_d = \frac{g_d s}{f},$$

где

$$f = 0{,}25\left[\frac{s}{r} + 1 + \sqrt{\left(\frac{s}{r} + 1\right)^2 + 8}\ \right].$$

Подставляя значения s и r, определим f:

$$f = 0{,}25\left[\frac{7{,}4}{6{,}25} + 1 + \sqrt{\left(\frac{7{,}4}{6{,}25} + 1\right)^2 + 8}\right] = 1{,}438.$$

Отсюда находим

$$U_d = \frac{33{,}1 \cdot 7{,}4}{1{,}438} = 170{,}2\ \mathrm{kV_m}.$$

2-й способ. Формула Пика является приближенной. Она дает ошибку до 2—3%, а при малых диаметрах шаров даже до 5—6%. Более точная, хотя и более сложная формула приведена ниже.

$$U_d = 34{,}4\, k\,(1 - e^{-1{,}15\, s/d})\, d^{0{,}925}\, \mathrm{kV_m}\,.$$

Коэфициент k равен единице, если $d < 10$ cm. Если же $d \geqslant 10$ cm, то

$$k = 0{,}975 + \frac{0{,}225}{d}.$$

Заметим, что приведенное уравнение справедливо при условии, что оба шара изолированы. Если один из шаров заземлен, оно изменяется следующим образом:

$$U_d = 26{,}0\, k\,(1 - e^{-1{,}6\, s/d})\, d^{0{,}925}\, \mathrm{kV_m}\,.$$

Обе эти формулы применены в пределах $0{,}05 \leqslant \frac{s}{d} \leqslant 2$.

Так как по условию задачи $d = 12{,}5$ cm > 10 cm, то $k = 1$. Подставляя значения s и d в первую из приведенных формул, получим:

$$U_d = 34{,}4\,(1 - e^{-1{,}15\,\frac{7{,}4}{12{,}5}})\, 12{,}5^{0{,}925} = 175{,}0\ \mathrm{kV_m}.$$

Сравнивая эту величину с величиной, полученной по первому способу, мы находим, что расхождение между ними составляет

$$\frac{175 - 170{,}2}{175}\, 100 = 2{,}74\%.$$

№ 111. Определить напряжение, при котором произойдет разряд между двумя шарами, имеющими диаметр 25 cm, расположенными на расстоянии 15 cm, если плотность воздуха равна 1. Оба шара изолированы.

№ 112. Определить напряжение, при котором произойдет разряд между шарами диаметром 50 cm при расстоянии 40 cm между ними. Температура воздуха равна $+30°$, давление 745 mm.

Примечание. Задачу решить по формуле Пика.

№ 113. Найти пробивное напряжение шарового разрядника, имеющего шары диаметром 10 cm, если расстояние между шарами равно 5 cm. Шары изолированы, плотность воздуха равна 1.

Примечание. Задачу решить по формуле Пика.

№ 114. Определить напряжение цепи, если шары диаметром $d = 4{,}45$ cm дают разряд при расстоянии $s = 5$ cm. Один шар заземлен, $\delta = 1$.

№ 115. На какое расстояние необходимо раздвинуть шары разрядника диаметром 250 mm для того, чтобы получить пробивное напряжение 280 kV, если $t = 40°$, а $B = 735$ mm?

Примечание. При решении задачи воспользоваться формулой Пика.

№ 116. Найти верхний предел измерений при шарах диаметром 4,45 cm, когда оба шара изолированы и когда один шар заземлен.

Примечание. См. задачу № 110.

№ 117. Наибольший разрядник, построенный до настоящего времени, имеет шары диаметром 2,5 m. Какое наибольшее напряжение можно измерить при помощи этого разрядника при изолированных шарах и при одном шаре заземленном?

Примечание. См. задачу № 110.

№ 118. Для защиты трансформатора тока от перенапряжений, на нем поставлен разрядник в виде двух полушаров диаметром 1,5 cm, отстоящих на 4,6 mm один от другого. Найти разрядное напряжение этого разрядника, предполагая коэфициент импульса равным 1,8.

№ 119. Найти величину поправки на плотность воздуха для разрядника с шарами диаметром 50 cm, если $t = 12°$ и $\beta = 77,5$ cm.

Примечание. Из формулы Пика следует, что поправка на плотность воздуха должна выражаться равенством

$$a = \sqrt{\delta}\left(\frac{\sqrt{\delta r} + 0{,}54}{\sqrt{r} + 0{,}54}\right).$$

№ 120. Найти поправку на плотность воздуха для разрядника с шарами диаметром 5 cm, если плотность воздуха равна 0,85.

№ 121. Цилиндрический конденсатор для мостика Шеринга имеет размеры $d = 22$ cm, $D = 60$ cm. Найти его пробивное напряжение, предполагая, что разряд с краев цилиндра невозможен. Плотность воздуха $\delta = 1$.

Решение. Пробивной градиент в случае двух концентрических цилиндров определяется уравнением

$$g_d = 31\,\delta\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r\delta}}\right) \mathrm{kV_m/cm}.$$

Подставляя сюда значения r и δ, получим

$$g_d = 31\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{11}}\right) = 33{,}9\ \mathrm{kV_m/cm}.$$

Пробивное напряжение найдем из уравнения

$$g_d = \frac{U_d}{r \ln \frac{R}{r}},$$

откуда следует:

$$U_d = g_d r \ln \frac{R}{r} = 33{,}9 \quad 11 \cdot \ln \frac{60}{22} = 374 \text{ kV}_m$$

или

$$U_d = 264 \text{ kV}.$$

№ 122. Воздушный цилиндрический конденсатор имеет диаметры цилиндров $d = 6$ cm и $D = 15$ cm. Найти его пробивное напряжение при $\delta = 0{,}95$, предполагая, что разряд в цилиндрической части конденсатора происходит раньше, чем на краях.

III. ЯВЛЕНИЕ КОРОНЫ.

№ 123. Определить критическое напряжение короны для линии с проводами сечением $q = 120$ mm² при расстоянии между ними $S = 3$ m, если линия проходит на высоте 1,5 km, где плотность воздуха равна $\delta = 0{,}82$. Коэфициент негладкости провода $m_0 = 0{,}9$.

Решение. Критическое напряжение короны в случае трехфазной линии выражается уравнением

$$U_\kappa = \sqrt{3}\, m_0 g_\kappa \delta r \ln \frac{S}{r}. \tag{1}$$

Входящий в это уравнение критический градиент равен

$$g_\kappa = 30\,\delta \left(1 + \frac{0{,}3}{\sqrt{\delta r}} \cdot \frac{1}{1 + 230\, r^2}\right) \text{kV}_m/\text{cm}.$$

Это выражение значительно упрощается, если радиус $r \geqslant 0{,}4$ cm. Например, при $r = 0{,}4$ cm выражение, стоящее в скобках, равно (при $\delta = 1$) 1,0125, т. е. отличается от единицы только на 1,25%. При $r = 0{,}5$ cm эта разница сокращается до 0,7%. Поэтому мы можем все выражение, стоящее в скобках, приравнять единице и писать

$$g_\kappa \cong 30\,\delta \text{ kV}_m/\text{cm}.$$

Подставляя это выражение и заданные в условии задачи величины в уравнение (1), получим:

$$U_\kappa = \sqrt{3} \cdot 0{,}9 \cdot 30 \cdot 0{,}82 \cdot 0{,}71 \cdot \ln \frac{300}{0{,}71} = 164{,}5 \text{ kV}_m,$$

или

$$U_\kappa = 116{,}2 \text{ kV}.$$

№ 124. Определить критическое напряжение короны для линии, имеющей провода сечением 150 mm² при расстоянии между ними 4 m. Коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}87$. Плотность воздуха — 0,97.

№ 125. Определить, при каком напряжении между проводами линии передачи будет достигнут критический градиент короны, если сечение провода — 95 mm², а расстояние между проводами — 3 m. Коэфициент негладкости провода — 0,85. Температура воздуха $t = +30°$, давление—746 mm.

№ 126. Определить, при каком напряжении между проводами линии передачи будет достигнут критический градиент короны, если сечение проводов $q = 70$ mm² и расстояние между проводами $S = 2$ m. Коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}9$, $\delta = 1$.

№ 127. Определить зависимость критического напряжения короны от сечения провода при расстоянии между проводами, равном 4 m. Коэфициент негладкости провода равен 0,86. Пределы сечений: $q = 50$ mm² до $q = 240$ mm². Плотность воздуха $\delta = 1$.

№ 128. Определить зависимость критического напряжения короны от расстояния между проводами (от 2 до 6 m) при сечении $q = 150$ mm². Коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}85$, $\delta = 1$.

№ 129. Определить критическое напряжение короны для Свирской линии передачи, имеющей сталь-алюминиевый провод общим сечением 425 mm², диаметром 27,43 mm при расстоянии между проводами 6,4 m. Коэфициент негладкости считать равным 0,85, $\delta = 1$.

№ 130. Определить критическое напряжение короны Днепровской высоковольтной сети, имеющей провода *СА*-150, расположенные на расстоянии 6,4 m. Коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}85$, $\delta = 1$.

№ 131. Определить критическое коронное напряжение германской линии Neuenahr-Kannstätten, имеющей полые провода диаметром 42 mm и расстояние между проводами 8,5 m. Коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}8$, $\delta = 1$.

№ 132. Проверить на корону линию передачи на 110 kV, имеющую провода сечением 70 mm² ($d = 10{,}85$ mm), расстояние между проводами $S = 3$ m, считая $m_0 = 0{,}87$ и $\delta = 1$.

№ 133. Подобрать диаметр проводов для линии передачи на 380 kV. Расстояние между проводами 7 m. Наиболее невыгодные условия температуры и давления: $t = 30°$ C, $B = 720$ mm. Коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}85$.

Примечание. Задачу решить графически.

№ 134. Найти наименьшее стандартное сечение провода, применимое на линии с напряжением 160 kV при расстоянии между проводами 5 m, если $m_0 = 0{,}87$ и $\delta = 1$. Провода медные.

Примечание. Задачу решать подбором.

№ 135. Найти наименьшее стандартное сечение сталь-алюминиевых проводов, применимое на линии с напряжением 220 kV при расстоянии между проводами в 6 m, если $m_0 = 0{,}85$ и $\delta = 1$.

№ 136. Найти наименьшее стандартное сечение сталь-алюминиевого провода, применимого на линии в 160 kV при расстоянии между проводами 4,5 m, если $m_0 = 0{,}87$ и $\delta = 0{,}9$.

№ 137. Линия на 110 kV идет на высоте, в среднем равной 700 m, на которой можно принять среднее давление $B = 69{,}5$ cm и среднюю температуру $t = +10°$. Найти наименьшее расстояние между проводами, при котором линия еще может работать без короны, если $q = 95$ mm², $m_0 = 0{,}85$.

№ 138. Определить потери на корону для линии длиною 120 km, работающей при напряжении 115 kV при сечении проводов 70 mm² и расстоянии между проводами 3 m. Температура 0°, давление 710 mm, частота 50 Hz, коэфициент негладкости $m_0 = 0{,}85$.

Решение. Для определения потерь на линии Пиком предложена эмпирическая формула, дающая хорошее схождение с опытом:

$$P_1 = \frac{2{,}41}{\delta}(f + 25)\sqrt{\frac{r}{S}} \cdot (U - U_к)^2 \cdot 10^{-3}\ \text{kW/km}.$$

Эта формула определяет потери на 1 km линии и на 1 провод. Поэтому, если мы желаем определить потери на 3 провода и на длине линии в l km, мы должны полученную величину помножить на $3\,l$.

Напряжение U представляет собою рабочее напряжение линии относительно нейтрали, а $U_к$ — критическое коронное напряжение относительно нейтрали. Величина f представляет частоту.

Определим рабочее напряжение U:

$$U = \frac{115}{\sqrt{3}} = 66{,}5\ \text{kV}.$$

Критическое коронное напряжение равно:

$$U_к = g_к \delta m_0 r \ln\frac{S}{r}\ \text{kV}.$$

Радиус провода (по стандарту) равен $r = 0{,}5425$ cm. Плотность воздуха равна

$$\delta = \frac{3{,}92 \cdot 71}{273} = 1{,}02.$$

Поэтому

$$U_к = 21{,}2 \cdot 1{,}02 \quad 0{,}85 \cdot 0{,}5425 \ln\frac{300}{0{,}5425} = 63{,}0\ \text{kV}.$$

Подставляя численные значения величин в формулу Пика, получим:

$$P = 3 \quad 120 \cdot \frac{2{,}41}{1{,}02}(50 + 25)\sqrt{\frac{0{,}5425}{300}}(66{,}5 - 63{,}0)^2 \cdot 10^{-3} = 33{,}2\ \text{kW}.$$

№ 139. Определить потери на корону для линии длиною 250 km, работающей при напряжении 165 kV, сечении провода 150 mm², расстоянии между проводами 4 m, температуре воздуха минус 2° и частоте 50 Hz, для случаев а) хорошей погоды ($m_1 = 1$) и б) бурной погоды ($m_1 = 0{,}8$). Коэфициент негладкости провода $m_0 = 0{,}85$.

Примечание. Для учета влияния погоды вводим коэфициент m_1 в формулу для критического коронного напряжения.

№ 140. Определить потери на корону для линии длиною 130 km, имеющей сечение проводов 120 mm², расстояние между проводами 4,0 m, напряжение 160 kV и частоту 50 Hz. Температура воздуха +5°, давление 745 mm, коэфициент негладкости провода $m_0 = 0{,}85$.

№ 141. Найти коронное напряжение для конденсатора Петерсена, имеющего размеры: $d = 22$ cm и $D = 60$ cm. Плотность воздуха равна 1.

Решение. Коронное напряжение в системе из двух концентрических цилиндров определяется уравнением

$$U = gr \ln \frac{R}{r},$$

где

$$g = 31\delta \left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r\delta}}\right) \text{kV}_{\text{m}}/\text{cm}.$$

Коронное напряжение совпадает с разрядным, если

$$\frac{R}{r} \leqslant e$$

(основание натуральных логарифмов).

В этом случае, следовательно, короны не будет. По условию задачи

$$\frac{R}{r} = 2{,}728 \cong 2{,}718 = e.$$

Таким образом, в данном случае коронное напряжение совпадает с разрядным и короны в конденсаторе не будет. В момент достижения коронного напряжения сразу произойдет разряд. Величина этого напряжения будет равна

$$U = 31\delta r\left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r\delta}}\right) \ln \frac{R}{r} =$$

$$= 31 \cdot 11 \left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{11}}\right) \ln 2{,}728 = 374 \text{ kV}$$

или

$$U = 264 \text{ kV}.$$

№ 142. Установка для очистки газов представляет собою металлическую трубу диаметром $D = 56$ cm, по оси которой натянут провод диаметром $d = 3$ mm. Найти коронное напряжение этого устройства при $\delta = 0{,}95$.

IV. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ МАСЛА.

№ 143. Электрическая прочность масла при 15°C была равна 110 kV/cm. Найти электрическую прочность масла при 50°C.

Решение. При изменении температуры масла в пределах от 0 до 50° электрическая прочность масла не очень высокой сухости возрастает приблизительно по линейному закону:

$$g_t = g_0(1 + 0{,}0092t). \qquad (1$$

Пользуясь этим соотношением, получим

$$g_{15} = g_0(1 + 0{,}0092 \cdot 15) = 110 \text{ kV/cm}.$$

Отсюда найдем

$$g_0 = \frac{110}{1 + 0{,}0092 \ 15} = 96{,}7 \text{ kV/cm}.$$

Подставляя это значение g_0 в уравнение (1), определим пробивной градиент масла при 50°:

$$g_{50} = 96{,}7(1 + 0{,}0092 \cdot 50) = 141 \text{ kV/cm}.$$

№ 144. Электрическая прочность масла при 15° равна 95 kV/cm. Определить прочность масла при 40°.

№ 145. На сколько градусов надо нагреть масло, имеющее температуру $+10°$, для того, чтобы повысить его прочность на 25%?

№ 146. Найти, на сколько процентов изменится электрическая прочность масла при изменении давления от 0,9 до 1,1 at.

Примечание. Воспользоваться формулой Фризе:

$$g = 121{,}7 + 86\mathrm{p} \, \mathrm{kV_m/cm}.$$

№ 147. Найти отношение электрической прочности масла при давлениях 1,05 и 0,95 at.

№ 148. Определить электрическую прочность масла при содержании влаги в 0,001 и 0,01%.

Решение. Зависимость электрической прочности масла, не подвергнутого специальной лабораторной обработке, от влажности может быть выражена уравнением

$$g = 22\left(1 + \frac{0{,}033}{\sqrt[1{,}5]{w}}\right) \text{ kV/cm},$$

где w — влажность масла в процентах (т. е. количество воды, находящейся в масле, в процентах от веса масла). Подставляя значения w, данные в условии задачи, получим

$$1)\quad g = 22\left(1 + \frac{0{,}033}{\sqrt[1{,}5]{0{,}001}}\right) = 94{,}6\ \text{kV/cm},$$

$$2)\quad g = 22\left(1 + \frac{0{,}033}{\sqrt[1{,}5]{0{,}01}}\right) = 37{,}6\ \text{kV/cm}.$$

№ 149. Найти электрическую прочность масла при влажности в 0,0016%, если прочность его при $w = 0{,}01\%$ равна 45 kV/cm.

Примечание. Воспользоваться формулой

$$g = g_0\left(1 + \frac{0{,}033}{\sqrt[1{,}5]{w}}\right).$$

№ 150. Трансформатор имеет 6 t масла, пробивное напряжение которого в стандартном разряднике равно 12 kV. При сушке масла его пробивное напряжение доведено до 35 kV. Определить, какое количество воды было удалено из масла при сушке.

Примечание. Стандартный разрядник состоит из двух плоских дисков с закругленными краями диаметром 25 mm, расположенных на расстоянии 2,5 mm.

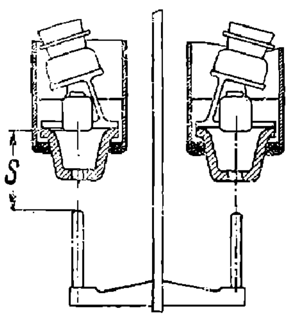

Рис. 21.

№ 151. Найти пробивное напряжение масла между двумя иглами при расстоянии $s = 15$ cm.

Решение. Для определения пробивного напряжения между двумя иглами Майнер дал формулу:

$$U_d = 27{,}6 s^{0,7}\ \text{kV}.$$

Пользуясь этой формулой, находим:

$$U_d = 27{,}6\ \ 15^{0,7} = 183{,}5\ \text{kV}.$$

№ 152. Найти расстояние, при котором будет пробито масло между сближающимися контактами масляного выключателя на 220 kV (рис. 21), предполагая, что каждая фаза имеет 2 разрывных промежутка.

Примечание. Воспользоваться формулой Майнера.

№ 153. Найти пробивное напряжение масла между иглою и плоскостью при расстоянии 8 cm.

Примечание. См. задачу № 105.

№ 154. Контакты масляного выключателя отстоят от стенки бака на 10 cm. Определить пробивное напряжение с контактов на стенку, считая приближенно, что оно равно пробивному напряжению между иглою и плоскостью.

№ 155. Найти расстояние между сходящимися контактами масляного выключателя на 110 kV, при котором будет пробит слой масла между ними во время включения выключателя, если контакты его клинового типа.

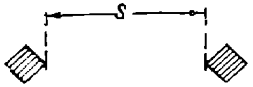

Рис. 22.

Примечание. Применить формулу Дрейфуса для пробоя между электродами квадратного сечения (рис. 22):

$$U_d = 53{,}6\sqrt[3]{s^2}\ \mathrm{kV_m}.$$

№ 156. Определить пробивное напряжение масла между острыми кромками при расстоянии 5 cm.

№ 157. Определить пробивное напряжение между острой кромкой и плоскостью, если расстояние между ними равно 5 cm.

№ 158. Определить предельное напряжение, до которого может быть использован пластинчатый масляный конденсатор с расстоянием между пластинами 5 mm (рис. 23) считая коэфициент запаса равным 1,5.

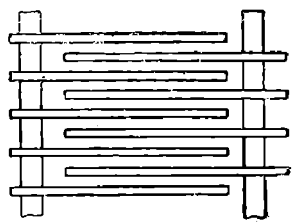

Рис. 23.

Примечание. Электрическая прочность масла между параллельными тонкими пластинами при расстоянии между ними до 15 mm может быть определена эмпирической формулой

$$U_d = 61{,}5s^{0{,}7}\ \mathrm{kV_m},$$

где s — в сантиметрах.

№ 159. Расстояние между пластинами масляного конденсатора радиотелеграфного типа равно 0,8 cm. Найти его пробивное напряжение.

№ 160. До какого напряжения можно использовать вольтметр Чернышева, если поместить его в масло? Расстояние между пластинами 2 cm. Диски имеют закругленные края.

Примечание. Пробивной градиент масла в равномерном поле равен

$$g = 31\left(1 + \frac{2{,}2}{\sqrt{s}}\right)\ \mathrm{kV_m/cm},$$

где s — расстояние между электродами в сантиметрах.

№ 161. Найти пробивное напряжение масла между двумя концентрическими цилиндрами (разрядник Циппа, рис. 24), имеющими диаметры $d = 0{,}8$ cm и $D = 2{,}8$ cm.

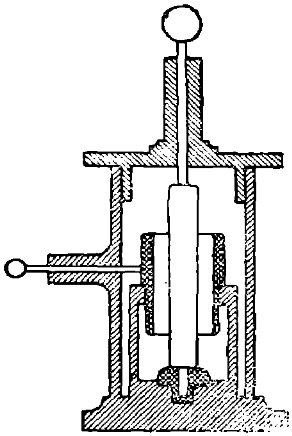

Рис. 24.

Примечание. Пробивной градиент масла между цилиндрическими электродами (при радиусе $r \leqslant 6$ cm) определяется уравнением:

$$g = 25\left(1 + \frac{2{,}2}{\sqrt{r}}\right) \text{kV}_m/\text{cm}.$$

№ 162. Найти пробивное напряжение масла между двумя концентрическими цилиндрами, имеющими радиусы 30 mm и 40 mm.

№ 163. Определить пробивное напряжение изолятора с масляным заполнением, имеющего диаметр стержня $d = 5$ cm и диаметр фланца $D = 35$ cm (рис. 25), не учитывая действия барьеров.

№ 164. Изолятор с масляным заполнением имеет диаметр сердечника $d = 4$ cm, а диаметр фланца $D = 22$ cm. Определить пробивное напряжение, считая, что электрическая прочность масла на 25% ниже средней (см. задачу № 161).

№ 165. Изолятор с масляным заполнением имеет диаметр сердечника $d = 4{,}6$ cm. Найти диаметр фланца, при котором пробивное напряжение изолятора будет равно 200 kV, предполагая, что изолятор снабжен барьерами, повышающими его электрическую прочность на 12%.

№ 166. Какое напряжение между витками может кратковременно выдержать обмотка трансформатора, выполненная из плоской проволоки, изолированной пряжей, толщиною 0,32 mm, предполагая, что коэфициент импульса равен 6.

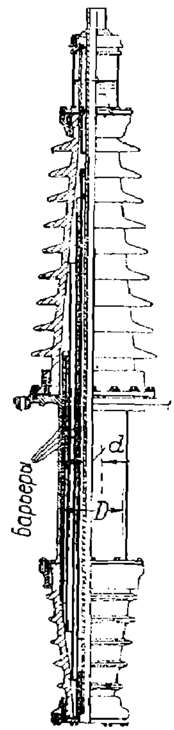

Рис. 25.

Примечание. Изоляция из пряжи напряжения не держит. Поэтому пробивное напряжение между витками трансформатора определяется исключительно маслом, пропитывающим пряжу. При плоской проволоке можно считать, что пробой происходит в равномерном поле.

№ 167 Определить напряжение между витками обмотки, которое может кратковременно выдержать трансформатор, если обмотка состоит из круглой проволоки диаметром 6 mm, изолированной пряжей толщиною 0,25 mm. Коэфициент импульса равен 5.

Примечание. Пробивной градиент масла между двумя параллельными цилиндрами можно приближенно приравнять пробивному градиенту при концентрических цилиндрах (см. задачу № 161).

№ 168. Найти напряжение, которое может быть кратковременно допущено между витками обмотки трансформатора, если обмотка имеет витки из круглой проволоки диаметром $d = 3$ mm, с изоляцией толщиною 0,3 mm, принимая коэфициент запаса равным 1,5 и коэфициент импульса равным 5.

V. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ.

№ 169. Пробивное напряжение слюды при толщине образца $s = 1$ mm было найдено равным $U_d = 25$ kV. Найти пробивное напряжение этой же слюды при толщине ее $s_1 = 0{,}1$ mm и $s_2 = 2$ mm. Испытание производится между дисковыми электродами под маслом.

Решение. Пробивное напряжение твердых диэлектриков при неуничтоженном краевом эффекте и при ионизационном характере пробоя может быть определено эмпирической формулой:

$$U_d = U_0 \sqrt{s}.$$

Отсюда находим

$$\frac{U_{d_1}}{U_d} = \sqrt{\frac{s_1}{s}}$$

или

$$U_{d_1} = U_d \sqrt{\frac{s_1}{s}}.$$

Поэтому получаем:

$$U_{d_1} = 25 \sqrt{\frac{0{,}1}{1}} = 7{,}9 \text{ kV},$$

$$U_{d_2} = 25 \sqrt{2} = 35{,}4 \text{ kV}.$$

№ 170. Определить пробивное напряжение и пробивной градиент пресшпана при испытании его между пластинами, зная его толщину $s_1 = 1{,}5$ mm, если известно, что пресшпан толщиною $s = 0{,}8$ mm в аналогичных условиях пробивается при $U_d = 3{,}5$ kV.

№ 171. Выводный изолятор масляного выключателя на 4000 A имеет прямоугольное сечение и толщину стенок $s = 7$ mm (рис. 26). Определить его пробивное напряжение, зная, что он выполнен из бакелита, имеющего при толщине 1 mm электрическую прочность

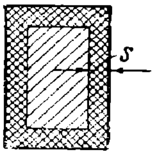

Рис. 26.

$$U_d = 80 \text{ kV/cm}.$$

№ 172. Определить одноминутное пробивное напряжение изоляции обмотки генератора на 11 kV, имеющего миканитовую изоляцию толщиною 2,2 mm, зная, что пробивное напряжение миканита при толщине 1 mm равно 22 kV.

Примечание. „Одноминутным" пробивным напряжением называется напряжение, которое получается при испытании напряжением, повышающимся ступенями по 10% от пробивного, причем каждая ступень выдерживается по 1 минуте, пока не произойдет пробой. Пробой изоляции обмотки генератора можно рассматривать, как пробой между плоскими электродами при неуничтоженном краевом эффекте.

№ 173. Определить пробивное напряжение одножильного кабеля, зная диаметр жилы $d = 18$ mm, толщину изоляции $s = 11$ mm и пробивной градиент кабельной изоляции $g_d = 200$ kV/cm.

Решение. Одножильный кабель мы можем рассматривать как цилиндрический конденсатор, для которого зависимость между напряжением и градиентом выражается уравнением:

$$U = gr \ln \frac{R}{r} \cdot$$

Так как диаметр жилы кабеля равен 18 mm, то

$$r = 0{,}9 \text{ cm}.$$

Наружный диаметр изоляции кабеля равен

$$R = r + s = 0{,}9 + 1{,}1 = 2{,}0 \text{ cm}.$$

Подставляя эти величины, а также значение пробивного градиента g_d, определим пробивное напряжение:

$$U_d = 200 \cdot 0{,}9 \ln \frac{2}{0{,}9} = 143{,}7 \text{ kV}.$$

№ 174. Определить пробивное напряжение одной жилы трехфазного кабеля ленинградской 35-kV сети, зная, что кабель состоит из трех изолированных жил, заключенных каждая в отдельную свинцовую оболочку (рис. 27). Диаметр жилы — 15,3 mm толщина изоляции — 10 mm, пробивной градиент изоляции 300 kV/cm.

№ 175. Найти пробивное напряжение кабеля на 130 kV, зная диаметр его жилы $d = 17$ mm, толщину изоляции $s = 15$ mm и пробивной градиент $g = 500$ kV/cm. Кабель состоит из трех изолированных жил, имеющих каждая отдельную свинцовую оболочку.

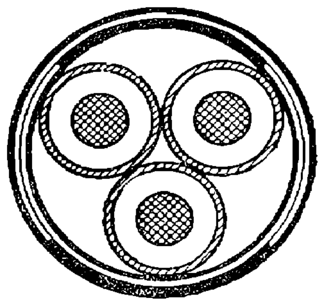

Рис. 27.

№ 176. Какой пробивной градиент должна иметь изоляция кабеля на 220 kV, если он имеет диаметр жилы $d = 36$ mm, толщину изоляции $s = 19$ mm, и если его пробивное напряжение должно быть не меньше 700 kV?

№ 177. Определить пробивное напряжение при тепловом пробое изоляции генератора на 3 500 V, имеющего толщину изоляции 1,3 mm и окружную скорость $v = 10$ m/sec. Материал изоляции — миканит, для которого коэфициент теплопроводности $k = 1{,}5 \ 10^{-3}$, коэфициент потерь $p_0 = 8 \ 10^{-3}$, коэфициент возрастания потерь $a = 0{,}045$. Температура генератора — максимально допустимая для миканита (115° C).

Решение. При тепловом пробое, в случае одностороннего охлаждения, пробивное напряжение, если не учитывать нагрева меди джоулевыми потерями, может быть вычислено по уравнению:

$$U_d = \sqrt{\frac{2k}{ap_0}} e^{-0{,}5a\,(T-40^\circ)} \cdot f(c) \cdot 10^{-3} \text{ kV},$$

где T — начальная температура диэлектрика и $f(c)$ — функция величины c, равной, при плоском поле и одностороннем охлаждении,

$$c \cong \frac{\lambda s}{k}.$$

В этом выражении λ — коэфициент теплоотвода в окружающую среду и s — толщина диэлектрика. Функция $f(c)$ имеет очень сложное параметрическое выражение, а потому она обычно задается в виде таблицы или кривой. Эта кривая приведена на рис. 28. В наиболее важных практически пределах от $c = 0{,}25$ до $c = 4{,}0$ можно выразить эту кривую сравнительно простым уравнением

$$f(c) = 0{,}37 + 0{,}284 \lg c.$$

Коэфициент теплоотвода в окружающую среду λ в электрических машинах сильно зависит от быстроты вращения ротора, и его приближенно можно выразить уравнением

$$\lambda = \lambda_0 (1 + 0{,}1 v),$$

где λ_0 — коэфициент теплоотвода при неподвижном роторе, а v — окружная скорость в m/sec λ_0 можно принять в среднем равным 0,001.

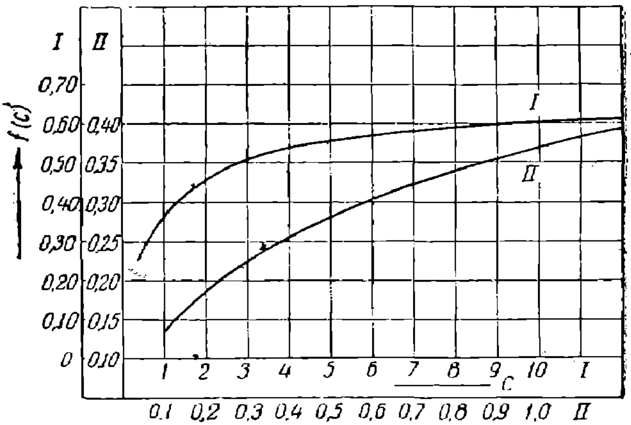

Рис. 28.

Определим величину c, рассматривая обмотку генератора как плоский конденсатор, образованный медью обмотки, с одной стороны, и железом статора, с другой.

$$c = \frac{0{,}001\,(1 + 0{,}1\ \ 10) \cdot 0{,}13}{1{,}5 \cdot 10^{-3}} = 0{,}173.$$

По кривой рис. 28 находим:

$$f(c) = 0{,}174.$$

Теперь мы можем определить пробивное напряжение:

$$U_d = \sqrt{\frac{2 \cdot 0{,}0015}{4{,}5 \cdot 8 \cdot 10^{-15}}} \cdot e^{-0{,}5\,(115-40)\,0{,}045} \cdot 0{,}174 \cdot 10^{-3} = 9{,}36\ \mathrm{kV}.$$

№ 178. Найти пробивное напряжение при тепловом пробое для изоляции генератора на 3 500 V, если толщина его изоляции равна 1,5 mm и окружная скорость ротора $v = 10$ m/sec. Машина изолирована микафолием, для которого $k = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 1{,}6 \cdot 10^{-12}$, $a = 0{,}05$. Температура генератора 95°

№ 179. Определить одноминутную и длительную прочность изоляции генератора на 6 kV. Изоляция состоит из миканитовой гильзы толщиной 2 mm с постоянными $k = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 1{,}8 \cdot 10^{-12}$ $a = 0{,}05$, $U_0 = 65$. Окружная скорость 12 m/sec, $T = 115°$

Примечание. Одноминутная прочность определяется в предположении ионизационного пробоя (см: задачу № 169), а длительная — в предположении теплового пробоя.

№ 180. Определить одноминутную и длительную прочность изоляции генератора на 6,6 kV. Толщина изоляции, выполненной из миканита, равна 3 mm. Характеристики изоляции: $k = 1{,}3 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 1{,}5 \cdot 10^{-12}$, $a = 0{,}05$, $U_0 = 65$. Окружная скорость 12 m/sec, $T = 115°$.

№ 181. Найти длительное пробивное напряжение изоляции генератора на 11 kV, имеющего миканитовую изоляцию толщиною 2,8 mm, если известны постоянные миканита: $k = 10^{-3}$, $p_0 = 10^{-12}$, $a = 0{,}05$. Окружная скорость равна $v = 15$ m/sec, температура 95°.

№ 182. Определить допустимую температуру обмотки генератора на 11 kV с миканитовой изоляцией толщиною 2,6 mm, если пробивное напряжение должно быть в 3 раза больше его рабочего напряжения. Постоянные миканита $k = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 1{,}3 \cdot 10^{-12}$, $a = 0{,}05$· $v = 12$ m/sec.

№ 183. Найти одноминутное и длительное пробивное напряжение генератора на 16 kV, имеющего изоляцию из миканита толщиною 5 mm, если $k = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 0{,}9 \cdot 10^{-12}$, $a = 0{,}048$, $v = 15$ m/sec, $T = 95°$ и $U_0 = 75$.

184. № Определить пробивное напряжение изоляции обмотки генератора на 30 kV, если толщина изоляции его—6 mm, $v = 26$ m/sec, $k = 1{,}15 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 8 \cdot 10^{-13}$, $a = 0{,}04$ и $T = 95°$ C.

№ 185. Определить допустимую температуру обмотки генератора на 30 kV, если толщина изоляции обмотки равна 6 mm, $v = 26$ m/sec, $k = 1{,}15 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 1{,}1 \cdot 10^{-13}$, $a = 0{,}045$ и если пробивное напряжение должно быть не ниже 45 kV.

№ 186. Проходной бакелитовый изолятор на 6 kV имеет радиус сердечника $r_0 = 2{,}15$ cm, внутренний радиус фланца $r_1 = 3{,}0$ cm и наружный радиус фланца $r_2 = 4{,}0$ cm. Постоянные бакелита: $k = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$, $a = 0{,}045$, $p_0 = 1{,}5 \cdot 10^{-12}$. Найти пробивное напряжение изолятора при $T = 90°$ и $\lambda = 0{,}001$.

Примечание. Воспользоваться решением задачи № 177, положив

$$c = \frac{\lambda r_2 \ln \frac{r_1}{r_0}}{k}.$$

№ 187. Проходной бакелитовый изолятор имеет радиус сердечника $r_0 = 2{,}15$ cm, внутренний радиус фланца $r_1 = 4{,}0$ cm и наружный радиус $r_2 = 4{,}5$ cm. Постоянные бакелита: $k = 1{,}5 \cdot 10^{-3}$, $a = 0{,}06$, $p_0 = 3 \cdot 10^{-12}$. Найти пробивное напряжение изолятора, если $T = 90°$ и $\lambda = 0{,}001$.

№ 188. Бакелитовый изолятор трансформатора напряжения на 20 kV имеет размеры: $r_0 = 1{,}75$ cm, $r_1 = 3{,}75$ cm, $r_2 = 3{,}95$ cm. Найти пробивное напряжение изолятора при рабочей температуре 60° С, зная постоянные бакелита: $a = 0{,}05$, $k = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 2{,}0 \cdot 10^{-12}$, $\lambda = 0{,}001$.

№ 189. Втулка вольтметра на 30 kV имеет внутренний диаметр 8 mm, толщину бакелита — 1 cm и толщину фланца — 1 mm. Постоянные бакелита: $a = 0{,}05$, $k = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 2{,}7 \cdot 10^{-12}$ Определить температуру, при которой произойдет тепловой пробой втулки, считая $\lambda = 10^{-3}$

№ 190. Вольтметр на 30 kV имеет фарфоровую втулку с внутренним диаметром 8 mm, наружным — 28 mm и толщиною фланца—1 mm. Определить температуру, при которой произойдет тепловой пробой втулки, если фарфор имеет постоянные $a = 0{,}025$, $k = 10{,}5 \cdot 10^{-2}$, $p_0 = 3{,}2 \cdot 10^{-12}$ и $\lambda = 10^{-3}$.

№ 191. Вольтметр на 6,6 kV, 100 000 Hz имеет фарфоровые втулки с размерами $r_0 = 0{,}1$ cm, $r_1 = 2{,}1$ cm, $r_2 = 2{,}2$ cm. Постоянные фарфора: $a = 0{,}025$, $k = 10{,}5 \cdot 10^{-3}$, $p_0 = 2{,}2 \cdot 10^{-9}$. Определить пробивное напряжение втулок при 30° С, если $\lambda = 10^{-3}$.

№ 192. Потери в образце бакелита при температуре 50° С оказались равными $6 \cdot 10^{-12}$ W/cm,V², а при температуре 90° С — равными $30 \cdot 10^{-12}$ W/cm, V². Определить коэфициент возрастания потерь.

Примечание. Коэфициентом возрастания потерь называется коэфициент a в уравнении потерь

$$p = p_0 e^{a(T - T_0)}.$$

№ 193. Потери в образце бакелита при температуре 50° С оказались равными 3,5 10^{-12} W/cm,V², а при температуре 80° С — 15 10^{-12} W/cm,V². Определить коэфициенты a и p_0 в уравнении потерь.

VI. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИЗОЛЯТОРЫ.

№ 194. Вычислить напряжение скользящего разряда для генератора на 6,6 kV, имеющего гильзы из миканита толщиною 2,5 mm (диэлектрическая постоянная $\varepsilon = 7$), а также наименьшую длину выступающей из железа части гильзы

Решение. Гильзы обмотки генераторов при больших мощностях обычно имеют плоские стороны. Поэтому мы можем определить напряжение скользящего разряда по приближенной формуле Рота:

$$U = 91\sqrt{\frac{s}{\varepsilon}} = 91\sqrt{\frac{0,25}{7}} = 17,2 \text{ kV}.$$

Испытательное напряжение генератора определяется формулой:

$$U_i = 2U_n + 1 = 2 \cdot 6,6 + 1 = 14,2 \text{ kV}.$$

По нормам, при испытательном напряжении на изоляции генератора не должно быть заметно скользящих разрядов. Мы видим, что в данном случае это положение осуществляется, так как напряжение скользящего разряда превышает испытательное напряжение на

$$\left(\frac{17,2}{14,2} - 1\right) 100 = 21\%.$$

Запас в 20% для напряжения скользящих разрядов по изоляции генератора можно считать достаточным. Поэтому мы можем определить длину выступающей части гильзы l, считая ее равной той длине, на которую может распространиться корона до момента появления скользящих разрядов. Эта длина определяется уравнением:

$$l = \frac{U - U_0}{5},$$

где U_0 — напряжение начала короны. По Роту U_0 при плоских электродах определяется уравнением:

$$U_0 = \frac{g_0 s}{\varepsilon} = \frac{11 \cdot 0,25}{7} = 0,393 \text{ kV} \cong 0,4 \text{ kV}.$$

Таким образом, длина l равна:

$$l = \frac{17,2 - 0,4}{5} = 3,36 \text{ cm}.$$

№ 195. Найти напряжение скользящего разряда и наименьшую длину выступающей части гильзы генератора на 11 kV, если толщина стенки гильзы — 4 mm, диэлектрическая постоянная микафолия — 5 и коэфициент запаса по отношению к испытательному напряжению — 1,25.

Примечание. Для определения допустимой длины выступающей части гильзы следует длину, полученную по напряжению скользящих разрядов, увеличить пропорционально 4-й степени коэфициента запаса.

№ 196. Найти напряжение скользящих разрядов для втулки вольтметра, имеющей размеры: $r_0 = 3$ mm, $r_1 = 9$ mm, предполагая втулку сделанной из бакелита ($\varepsilon = 4$).

Решение. Напряжение скользящих разрядов при любой форме электродов может быть определено по формуле:

$$U = \frac{1{,}355 \cdot 10^{-4}}{C^{0{,}44}}\ \text{kV}, \qquad (1)$$

где C — емкость одного cm^2 поверхности диэлектрика в том месте, где начинается скользящий разряд. В случае цилиндрического изолятора величина емкости равна:

$$C = \frac{8{,}84\varepsilon \cdot 10^{-14}}{r_1 \ln \frac{r_1}{r_0}} = \frac{8{,}84 \cdot 4 \cdot 10^{-14}}{0{,}9 \ln \frac{9}{3}} = 3{,}57 \quad 10^{-13}\ F.$$

Подставляя это значение в уравнение (1), получим:

$$U = \frac{1{,}355 \cdot 10^{-4}}{(3{,}57 \quad 10^{-13})^{0{,}44}} = \frac{1{,}355 \quad 10^{-4}}{3{,}57^{0{,}44} \quad 10^{-5{,}72}} = 40{,}25\ \text{kV}.$$

№ 197. Найти напряжение скользящих разрядов для цилиндрического фарфорового изолятора диаметром 7 cm, если диаметр сердечника его равен 3 cm. Диэлектрическая постоянная фарфора равна 5,5.

№ 198. Изолятор с масляным заполнением имеет диаметр сердечника 4 cm, наружный диаметр — 12 cm и толщину фарфора — 25 mm. Диэлектрическая постоянная масла — 2,35, фарфора — 5,7. Определить напряжение скользящих разрядов

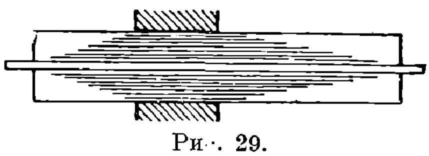

Рис. 29.

№ 199. Изолятор конденсаторного типа имеет восемь слоев бакелита толщиною по 2,5 mm со станиолевыми прокладками между ними (рис. 29) Найти напряжение скользящих разрядов, зная диэлектрическую постоянную бакелита — 4,5 и предполагая, что напряжение между прокладками распределяется равномерно.

Примечание. При решении задачи приближенно считать, что емкость 1 cm^2 поверхности одного слоя изолятора равна емкости плоского конденсатора такой же толщины.

№ 200. Коронное напряжение изолятора типа Хьюлет (рис. 30) равно 14 kV. Найти коронное напряжение гирлянды из 8 изоляторов Хьюлета.

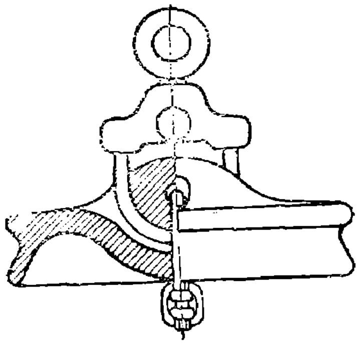

Рис. 30.

Решение. Вследствие неравномерного распределения напряжения в гирлянде изоляторов, приходящееся на первый элемент от линии напряжение составляет для изоляторов типа Хьюлет около 30% при числе изоляторов в гирлянде $\geqslant 6$. Очевидно, что коронное напряжение гирлянды будет достигнуто тогда, когда 30% от напряжения гирлянды станет равным 14 kV. Поэтому

$$U_k = \frac{14}{0,3} = 46,7 \text{ kV}.$$

№ 201. Найти коронное напряжение гирлянды изоляторов типа Хьюлет, состоящей из 8 элементов, если она снабжена щитом, понижающим коэфициент неравномерности до $k = 1,6$. (Коэфициентом неравномерности называется отношение наибольшего напряжения на изоляторе к среднему, определяемому делением напряжения гирлянды на число элементов). Коронное напряжение элемента — 14 kV.

№ 202. Изолятор типа Голиаф имеет коронное напряжение, равное 22 kV Найти коронное напряжение гирлянды из 10 элементов этого типа, снабженной кольцевым щитом, при котором коэфициент неравномерности равен 1,7.

№ 203. Определить сухое и мокрое разрядное напряжение штыревого изолятора типа Дельта (рис. 31), зная его размеры $D = 240$ mm и $H = 255$ mm.

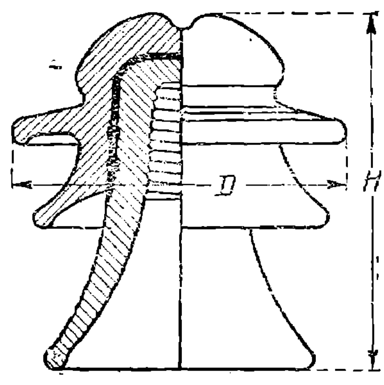

Рис. 31.

Решение. Если разделить сухое или мокрое разрядное напряжение штыревого изолятора на его „средний геометрический размер“ (т. е.

корень квадратный из произведения наибольшего диаметра на высоту изолятора — $\sqrt{DH}$), то полученная величина

$$k_c = \frac{U_c}{\sqrt{DH}}$$

или

$$k_r = \frac{U_r}{\sqrt{DH}},$$

называемая сухой (или мокрой) разрядной постоянной изолятора, представляет собою величину, почти не зависящую от размеров изоляторов и определяемую его типом. Для изоляторов типа Дельта можно принять:

$$k_c = 5{,}6,$$

$$k_r = 4{,}0.$$

Отсюда определим U_c и U_r:

$$U_c = k_c\sqrt{DH} =$$

$$= 5{,}6\sqrt{24 \quad 25{,}5} = 139{,}5 \text{ kV},$$

$$U_r = k_r\sqrt{DH} =$$

$$= 4\sqrt{24 \cdot 25{,}5} = 99 \text{ kV}.$$

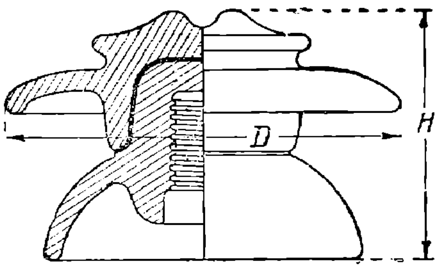

Рис. 32.

№ 204. Определить сухое и мокрое разрядное напряжение изолятора типа Фарадоид (рис. 32), зная его размеры $D = 290$ mm и $H = 191$ mm и его разрядные постоянные: $k_c = 5{,}8$, $k_r = 3{,}7$.

№ 205. Зная сухое разрядное напряжение для изолятора типа Фарадоид $U_c = 95$ kV и отношение диаметра к высоте изолятора $\frac{D}{H} = 1{,}5$, найти его размеры. Постоянная $k_c = 5{,}8$.

№ 206. При рабочем напряжении линии, равном 22 kV, разрядные напряжения изоляторов должны быть не ниже: $U_c = 80$ kV, $U_r = 52$ kV. Каковы должны быть размеры изолятора, если известно, что у него $\frac{D}{H} = 0{,}9 k_c = 5{,}6$, $k_r = 4{,}0$.

№ 207. При испытании изолятора были получены следующие данные: $U_c = 125$ kV, $U_r = 82$ kV, $U_d = 200$ kV. Для какого напряжения пригоден изолятор? (U_d — пробивное напряжение).

Примечание. Для решения задачи воспользоваться стандартом на изоляторы ОСТ-3370.

№ 208. Проходной изолятор ребристого типа (см. рис. 25) имеет высоту от фланца $H = 95$ cm. Определить сухое и мокрое разрядное напряжение изолятора.

Решение. Зависимость сухого разрядного напряжения проходного ребристого изолятора от его высоты приближенно можно выразить уравнением:

$$U_c = 30 + 2{,}9H \text{ kV}.$$

Подставляя сюда $H = 95$ cm, получим:

$$U_c = 30 + 2{,}9 \cdot 95 = 306 \text{ kV}.$$

Мокрое разрядное напряжение рассматриваемого типа изоляторов составляет от 75 до 78% от сухого разрядного напряжения. Беря нижний предел, получим:

$$U_r = 0{,}75 \quad 306 = 229 \text{ kV}.$$

№ 209. Проходной изолятор на 220 kV ребристого типа имеет высоту $H = 1{,}9$ m. Определить его сухое и мокрое разрядное напряжение.

№ 210. Проходной изолятор конденсаторного типа на 100 kV имеет высоту 95 cm. Определить сухое разрядное напряжение.

Примечание. Для изоляторов конденсаторного типа с большим числом слоев можно принять:

$$U_c = 50 + 3{,}3H \text{ kV}.$$

№ 211. Подобрать гирлянду изоляторов для линии на 220 kV, предполагая ее сухое разрядное напряжение равным 850 kV.

Решение. Разрядное напряжение длинных гирлянд мало зависит от размеров и типа изоляторов, но определяется почти исключительно полной длиной гирлянды. Зависимость разрядного напряжения гирлянды изоляторов от ее длины такова:

$$U_c = 382 l_s^{0{,}885}, \tag{1}$$

$$U_r = 273 l_s^{0{,}915}, \tag{2}$$

где l_s — длина гирлянды в метрах.

Из уравнения (1) получим:

$$l_s = \left(\frac{U_c}{382}\right)^{1{,}13} = 2{,}47 \text{ m}.$$

Предполагая, что гирлянда составлена из стандартных изоляторов типа П-4,5, имеющих высоту $H = 170$ mm, найдем число изоляторов в гирлянде:

$$n = \frac{2470}{170} = 14{,}5 \cong 15.$$

№ 212. Определить длину гирлянды и число элементов для линии на 150 kV, если ее сухое разрядное напряжение должно быть не меньше 630 kV, а мокрое разрядное напряжение — не меньше 480 k V.

№ 213. Подобрать гирлянду для линии с напряжением 115 kV, предполагая, что ее сухое разрядное напряжение равно 425 kV.

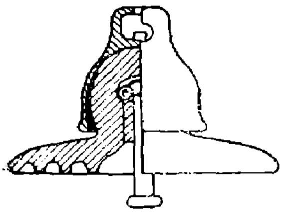

Рис. 33.

№ 214. Определить пробивное напряжение изолятора типа Кугельринг (рис. 33), если внутренний диаметр гнезда изолятора $d = 5{,}7$ cm, толщина фарфора $s = 2{,}3$ cm и электрическая прочность фарфора определяется уравнением

$$g = 70\left(1 + \frac{0{,}7}{\sqrt{s}}\right) \text{ kV/cm.}$$

Примечание. При решении задачи изолятор можно рассматривать как шаровой конденсатор.

№ 215. Электрическая прочность фарфора подвесного изолятора типа *OB* (рис. 34) равна 119,5 kV/cm. Найти его пробивное напряжение, если известен диаметр его гнезда $d = 32$ mm и толщина фарфора $s = 20$ mm.

№ 216. Определить пробивное напряжение изолятора с шаровой головкой (см. рис. 8), зная диаметр его внутреннего гнезда $d = 45$ mm и толщину фарфора $s = 18$ mm. Определить коэфициент запаса на пробой, считая сухое разрядное напряжение изолятора равным 80 kV. Электрическая прочность фарфора равна 130 kV/cm.

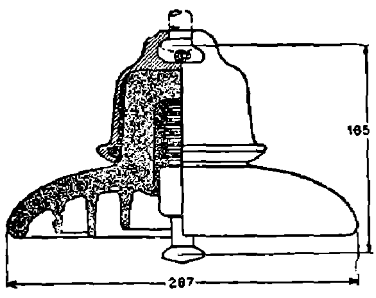

Рис. 34.

№ 217. Определить пробивное напряжение и коэфициент запаса на пробой для изолятора с шаровой головкой (см. рис. 8), зная диаметр гнезда $d = 55$ mm, толщину фарфора $s = 22{,}5$ mm и сухое разрядное напряжение изолятора, равное 95 kV. Электрическая прочность фарфора определяется уравнением

$$g = 80\left(1 + \frac{0{,}7}{\sqrt{s}}\right) \text{ kV/cm.}$$

№ 218. Определить пробивное напряжение изолятора типа *OB* (рис. 34), у которого диаметр гнезда равен 35 mm, а толщина фарфора — 22,5 mm. Электрическая прочность фарфора — 117,2 kV/cm.

№ 219. Определить пробивное напряжение изолятора типа *OB*, у которого диаметр гнезда равен 32 mm, а толщина фарфора равна 20 mm. Электрическая прочность фарфора определяется уравнением:

$$g = 90\left(1 + \frac{0,6}{\sqrt{s}}\right) \text{ kV/cm}.$$

№ 220. Изолятор типа Фарадоид на 6 kV имеет диаметр гнезда для штыря, равный 32 mm. Толщина фарфора равна 16 mm. Определить его пробивное напряжение, считая электрическую прочность фарфора соответствующей материалу среднего качества (см. задачу № 217).

П р и м е ч а н и е. Штыревый изолятор можно приближенно рассчитывать на пробой, как сферический конденсатор, толщина диэлектрика в котором равна толщине фарфора в головке, причем предполагается, что толщина фарфора в шейке изолятора не меньше, чем в головке.

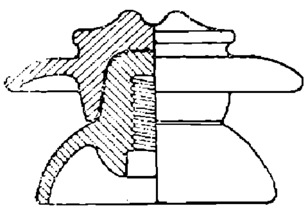

Рис. 35.

№ 221. Изолятор типа Фарадоид на 22 kV (рис. 35) состоит из двух фарфоровых частей, соединенных цементом. Толщина каждой части — 17,5 mm. Диаметр отверстия для штыря — 38 mm. Определить пробивное напряжение изолятора, предполагая фарфор среднего качества (см. задачу № 217).

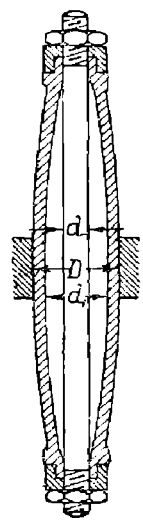

Рис. 36.

№ 222. Цилиндрический фарфоровый изолятор имеет внутренний диаметр фарфора, равный 3 cm, а наружный — 6 cm. Найти его пробивное напряжение, предполагая фарфор среднего качества (см. задачу № 217).

№ 223. Определить пробивное напряжение фарфора изолятора, имеющего сердечник диаметром 3 cm, воздушный зазор между сердечником и фарфором — 3 cm и толщину фарфора — 2,3 cm (рис. 36). Диэлектрическая постоянная фарфора — 5, а его электрическая прочность — 73 kV/cm.

Решение. Из рис. 36 видно, что изолятор представляет собой двухслойный цилиндрический конденсатор. Градиент в любой точке такого конденсатора равен

$$g_x = \frac{U}{r_x \varepsilon_i \sum_1^n \frac{1}{\varepsilon_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}}.$$

Максимальный градиент будет у поверхности сердечника, где

$$g_x = g_{max} \text{ и } r_x = r_0.$$

Поэтому

$$g_{max} = \frac{U}{r_0 \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1} \ln \frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2} \ln \frac{r_2}{r_1} \right)} =$$

$$= \frac{U}{1{,}5 \cdot 1 \cdot \left(1 \cdot \ln \frac{3}{1{,}5} + \frac{1}{5} \ln \frac{5{,}3}{3} \right)} = \frac{U}{1{,}21}.$$

Отсюда

$$U = g_{max} \cdot 1{,}21.$$

Пробивной градиент для воздуха в цилиндрическом конденсаторе определяется формулой Пика:

$$g_1 = 21{,}9 \left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{r}} \right) = 21{,}9 \left(1 + \frac{0{,}308}{\sqrt{1{,}5}} \right) = 27{,}4 \text{ kV/cm}.$$

Поэтому напряжение, при котором начнется ионизация воздуха. будет равно:

$$U = 1{,}21 \quad 27{,}4 = 33{,}2 \text{ kV}.$$

После того как напряжение достигнет этой величины, воздух внутри изолятора становится ионизированным, и все напряжение прикладывается к фарфору. Определим градиент в фарфоре при этом напряжении:

$$g_2 = \frac{U}{r_1 \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{33{,}2}{3 \ln \frac{5{,}3}{3}} = 19{,}46 \text{ kV/cm}.$$

Полученный градиент меньше пробивного градиента фарфора (73 kV/cm). Поэтому пробой изолятора произойдет только при дальнейшеи повышении напряжения, именно, при таком напряжении, при котором градиент в фарфоре станет равным $g_2 = 73$ kV/cm.

Это напряжение будет равно:

$$U_d = 33{,}2 \cdot \frac{73}{19{,}46} = 124{,}5 \text{ kV}.$$

№ 224. Фарфоровый изолятор с масляным заполнением имеет диаметр сердечника $d_0 = 3{,}3$ cm, внутренний диаметр фарфора $d_1 = 7{,}4$ cm и толщину фарфора $s = 2{,}3$ cm. Диэлектрическая постоянная фарфора $\varepsilon_2 = 5$, его электрическая прочность $g_2 = 73$ kV/cm. Диэлектрическая постоянная масла $\varepsilon_1 = 2{,}5$, а его электрическая прочность $g_1 = 68$ kV/cm. Определить его пробивное напряжение.

№ 225. Определить пробивное напряжение изолятора, имеющего диаметр сердечника 4 cm, внутренний диаметр фарфора 9,8 cm и наружный диаметр фарфора 13,8 cm. Изолятор залит маслом с диэлектрической постоянной 2,4 и электрической прочностью 90 kV/cm. Электрическая прочность фарфора равна 63 kV/cm, а его диэлектрическая постоянная — 5,5.

№ 226. Выводной изолятор для трансформатора на 35 kV имеет наружный диаметр фарфора $d_2 = 23$ cm. Толщина фарфора равна $s = 2$ cm, диаметр сердечника $d_0 = 2$ cm. Внутри изолятор заполнен маслом. Определить его пробивное напряжение, считая электрическую прочность масла равной 80 kV/cm, а фарфора — 65 kV/cm. Диэлектрическая постоянная масла — 2,3, фарфора — 5,3.

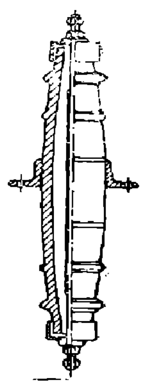

Рис. 37.

№ 227. На сердечник проходного изолятора (рис. 37), имеющий диаметр 25 mm, посажена трубка из гетита толщиною 5 mm. Наружный диаметр изолятора — 20 cm, толщина фарфора 2 cm. Внутри изолятор заполнен маслом с электрической прочностью 74 kV/cm и диэлектрической постоянной 2,35. Найти пробивное напряжение изолятора, зная диэлектрические постоянные гетита — 4,5 и фарфора — 5,5, а также электрическую прочность гетита — 85 kV/cm и фарфора — 75 kV/cm.

Решение. Определим напряжение, при котором максимальный градиент у поверхности сердечника будет равен пробивному градиенту гетита:

$$U = g_1 r_0 \varepsilon_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_1}\ln\frac{r_1}{r_0} + \frac{1}{\varepsilon_2}\ln\frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{\varepsilon_3}\ln\frac{r_3}{r_2}\right) =$$

$$= 85 \quad 1{,}25 \quad 4{,}5\left(\frac{1}{4{,}5}\ln\frac{1{,}75}{1{,}25} + \frac{1}{2{,}35}\ln\frac{8{,}0}{1{,}75} + \frac{1}{5{,}5}\ln\frac{10}{8}\right) = 365 \text{ kV}.$$

Посмотрим, какой градиент будет при этом напряжении в масле

$$g_2 = \frac{U}{1{,}75 \cdot 2{,}35\left(\frac{1}{4{,}5}\ln\frac{1{,}75}{1{,}25} + \frac{1}{2{,}35}\ln\frac{8{,}0}{1{,}75} + \frac{1}{5{,}5}\ln\frac{10}{8}\right)} =$$

$$= 116{,}4 \text{ kV/cm} > 74 \text{ kV/cm}.$$

Полученная величина значительно превосходит пробивной градиент масла. Таким образом, масло будет пробито раньше, чем гетит. Найдем напряжение, при котором будет пробито масло. Оно равно:

$$U = 365 \cdot \frac{74}{116{,}4} = 232 \text{ kV}.$$

Как только на поверхности гетита будет достигнут пробивной градиент масла, оно будет ионизировано, и все напряжение будет приложено к гетиту и фарфору. При этом, в гетите получится градиент:

$$g_1' = \frac{232}{1{,}25 \cdot 4{,}5\left(\frac{1}{4{,}5}\ln\frac{1{,}75}{1{,}25} + \frac{1}{5{,}5}\ln\frac{10}{8}\right)} =$$

$$= 355 \text{ kV/cm} > 85 \text{ kV/cm}.$$

Этот градиент значительно больше, чем пробивной градиент гетита. Поэтому гетит будет пробит также, а после пробоя гетита неизбежно пробьется и фарфор. Таким образом, напряжение 232 kV является пробивным напряжением изолятора.

№ 228. Проходной изолятор имеет сердечник диаметром 22 mm, окруженный трубкой из гетита толщиною 8 mm. Наружный диаметр изолятора 135 mm, толщина фарфора 20 mm. Изолятор заполнен маслом, электрическая прочность которого равна 80 kV/cm, а диэлектрическая постоянная — 2,3. Электрическая прочность гетита — 60 kV/cm, его диэлектрическая постоянная — 4,6. Диэлектрическая постоянная фарфора — 6. Найти пробивное напряжение изолятора.

№ 229. Ввод высоковольтного трансформатора имеет сердечник, диаметром 20 mm, заключенный в бакелитовую трубку толщиною 5 mm, обмотанную снаружи пропитанным лаком полотном толщиною 3 mm. Наружный диаметр фарфора равен 23 mm, толщина фарфора 20 mm. Внутри изолятор залит маслом, электрическая прочность которого равна 60 kV/cm, а диэлектрическая постоянная — 2,3. Найти пробивное напряжение изолятора, если электрическая прочность бакелита равна 70 kV/cm, его диэлектрическая постоянная — 4,5, электрическая прочность полотна — 65 kV/cm, его диэлектрическая постоянная — 4,3 и диэлектрическая постоянная фарфора — 5.

№ 230. Ввод масляного выключателя имеет сердечник диаметром 5 cm и фланец, внутренний диаметр которого равен 25 cm. Промежуток между сердечником и фланцем заполнен маслом, в котором расположено 3 тонких бакелитовых цилиндра (барьеры). Определить его пробивное напряжение, зная электрическую прочность масла $g_1 = 72$ kV/cm.

Примечание. Наличие в масле барьеров повышает пробивное напряжение изолятора приблизительно на 10%.

№ 231. Изолятор с масляным заполнением имеет диаметр сердечника $d = 4{,}6$ cm. Найти диаметр фланца, при котором пробивное напряжение изолятора будет равно 300 kV, предполагая, что изолятор снабжен барьерами, повышающими его пробивное напряжение на 12%, и что электрическая прочность масла определяется уравнением

$$g = 28\left(1 + \frac{2,2}{\sqrt{r}}\right) \text{ kV/cm}.$$

№ 232. Определить основные размеры проходного изолятора конденсаторного типа на 35 kV, предполагая, что он должен иметь сухое разрядное напряжение 125 kV и пробивное напряжение не ниже 188 kV Средняя толщина слоев бакелита — 3 mm, пробивной градиент его—90 kV cm.

Решение. При решении задачи воспользуемся методом, предложенным Хумбургом. Хумбург ввел в расчет некоторую среднюю прокладку изолятора, определяемую так, чтобы ее длина удовлетворяла условию

$$l_c = \sqrt{\frac{2CU}{\varepsilon g}}.$$

Здесь C — емкость изолятора, U — напряжение, ε — диэлектрическая постоянная материала и g — приведенный осевой градиент. Он определяется уравнением

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2},$$

где g_1 — осевой градиент верхней части и g_2 — осевой градиент нижней части изолятора, предполагаемые постоянными. При этих условиях наивыгоднейшие размеры изолятора определяются следующими соотношениями:

$$\frac{r_0}{r_c} = 0,4, \qquad \frac{r_n}{r_c} = 1,53,$$

$$\frac{l_0}{l_c} = 1,70, \qquad \frac{l_n}{l_c} = 0,4,$$

где r_0 — радиус сердечника изолятора, r_c — радиус средней прокладки, l_0 — его рабочая длина, r_n — радиус фланца изолятора и l_n — его рабочая длина. Если известны сухое разрядное напряжение U_c и приведенный осевой градиент g, соответствующий U_c, то l_c может быть определено из уравнения

$$l_в = \frac{U_c}{g\left(\frac{l_0}{l_c} - \frac{l_n}{l_c}\right)} = \frac{U_c}{1,3g}.$$

Так как разрядное напряжение нам задано, то для определения l_c необходимо найти g. Для этого надо знать g_1 и g_2. Величина g_1

определяется равенством

$$g_1 = \frac{U_c}{H_1},$$

где H_1 — высота воздушного конца изолятора. Эту высоту можно определить, пользуясь следующим уравнением:

$$U_c = a + 3{,}3H_1.$$

Коэфициент a при небольших размерах изолятора можно принять равным 30. При увеличении размеров он возрастает до 50. В наших условиях можно принять $a = 30$. Тогда

$$H_1 = \frac{U_c - 30}{3{,}3} = \frac{125 - 30}{3{,}3} = 28{,}8 \text{ cm}.$$

Отсюда

$$g_1 = \frac{U_c}{H_1} = \frac{125}{28{,}8} = 4{,}35 \text{ kV/cm}.$$

Градиент по поверхности масляного конца можно принимать в пределах $(1{,}7 \div 2{,}5)g_1$. Положим

$$g_2 = 1{,}75g_1 = 7{,}62 \text{ kV/cm}.$$

Определим приведенный осевой градиент:

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_1} + \frac{1}{g_2} = \frac{1}{4{,}35} + \frac{1}{7{,}62} =$$
$$= 0{,}23 + 0{,}131 = 0{,}361,$$
$$g = 2{,}75 \text{ kV/cm}.$$

Тогда

$$l_c = \frac{U_c}{1{,}3g} = \frac{125}{1{,}3 \cdot 2{,}75} = 35 \text{ cm}.$$

Для определения r_c Хумбург дает зависимость

$$r_c = \frac{gl_c}{g_{\min}},$$

где

$$g_{\min} = \frac{g_c}{1{,}57}$$

и g_c — максимальный радиальный градиент, соответствующий сухому разрядному напряжению. Так как пробивной градиент равен $g_d = 90$ kV/cm и отношение пробивного напряжения к сухому разрядному равно

$$\frac{188}{125} = 1{,}504,$$

то

$$g_c = \frac{g_d}{1,504} = \frac{90}{1,504} = 59,9 \text{ kV/cm}.$$

Отсюда

$$g_{\min} = \frac{g_c}{1,57} = \frac{55,9}{1,57} = 38,1 \text{ kV/cm}$$

и

$$r_c = \frac{g l_c}{g_{\min}} = \frac{2,75 \cdot 35}{38,1} = 2,52 \text{ cm}.$$

Определив l_c и r_c, мы можем найти и основные размеры изолятора:

$$r_0 = 0,4 r_c = 0,4 \cdot 2,52 = 1,01 \text{ cm},$$
$$r_n = 1,53 r_c = 1,53 \cdot 2,52 = 3,86 \text{ cm},$$
$$l_0 = 1,7 l_c = 1,7 \cdot 35 = 59,5 \text{ cm},$$
$$l_n = 0,4 l_c = 0,4 \quad 35 = 14,0 \text{ cm}.$$

Число прокладок равно

$$n = \frac{r_n - r_0}{0,3} = \frac{3,86 - 1,01}{0,3} = 9,5 \cong 10.$$

Длина одной ступени равна

$$l_1 = \frac{l_0}{n} = \frac{59,5}{10} = 5,95 \text{ cm}.$$

Положим, что последняя прокладка перекрывается бакелитом на одну ступень. Тогда полная длина изолятора будет равна

$$l = 59,5 + 5,95 = 65,45 \cong 66 \text{ cm}.$$

№ 233. Найти основные размеры проходного изолятора конденсаторного типа на 22 kV, предполагая, что его сухое разрядное напряжение равно 82 kV, пробивное напряжение равно 123 kV. Средняя толщина слоев бакелита равна 2,5 mm, пробивной градиент $g_d = 85$ kV/cm. Отношение $\frac{g_2}{g_1}$ принять равным 1,8.

№ 234. Найти основные размеры проходного изолятора конденсаторного типа, имеющего сухое разрядное напряжение $U_c = 600$ kV и пробивное напряжение $U_d = 780$ kV. Средняя толщина слоев бакелита — 3,5 mm, пробивной градиент — 100 kV/cm. Отношение $\frac{g_2}{g_1}$ принять равным 2.

VII. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ.

№ 235. Найти выражение для силы притяжения дисков в вольтметре А. А. Черны ева.

Решение. Сила притяжения между подвижной и неподвижной частью в электростатическом вольтметре определяется уравнением:

$$F = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{ds},$$

где C — емкость прибора и s — расстояние между дисками. Емкость между дисками равна

$$C = \frac{\varepsilon A}{4\pi s} = \frac{\varepsilon \pi d^2}{16\pi s} = \frac{\varepsilon d^2}{16 s},$$

где d — диаметр подвижного диска.

Беря производную от этого выражения, получим:

$$\frac{dC}{ds} = -\frac{\varepsilon a^2}{16 s^2}.$$

Поэтому

$$F = -\frac{U^2 \varepsilon d^2}{32 s^2}.$$

№ 236. Найти силу притяжения между дисками вольтметра Чернышева при напряжении $U = 100$ kV, если подвижной диск имеет диаметр $d = 7$ cm, расстояние между дисками $s = 15$ mm и окружающей средой является масло с диэлектрической постоянной 2,35.

Примечание. Воспользоваться решением задачи № 235. Иметь в виду, что входящее в формулу напряжение U должно быть подставлено в абсолютных электростатических единицах.

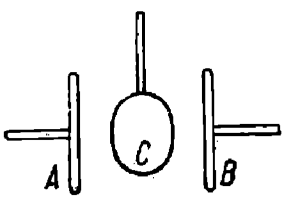

Рис. 38а.

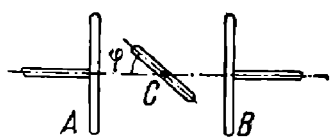

Рис. 38б.

№ 237. Найти зависимость между напряжением и углом отклонения подвижной части высоковольтного вольтметра А. А. Смурова (рис. 38), если его емкость выражается уравнением

$$C = \frac{A}{2} \cos 2\alpha,$$

а вращающий момент нити подвеса равен

$$M = k(\alpha_0 - \alpha).$$

Здесь α — угол отклонения подвижной части, и α_0 — начальный угол.

Примечание. Вращающий момент электростатического вольтметра в данном случае равен

$$M = \frac{1}{2} U^2 \frac{dC}{d\alpha}.$$

№ 238. Определить коронное напряжение электростатического вольтметра Гартмана и Брауна с плоскими электродами (рис. 39) при расстоянии между электродами 4 mm.

Примечание. Коронное напряжение двух параллельных пластин с острыми краями равно

$$U_k = 9{,}6\, s^{0{,}75}\ \mathrm{kV_m}.$$

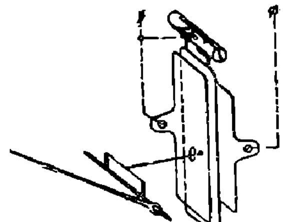

Рис. 39.

№ 239. Вольтметр Кельвина имеет расстояние между бисквитом и квадрантами, равное 1,8 cm. При каком напряжении произойдет разряд между ними?

Примечание. Разрядное напряжение между двумя пластинами, параллельными, но сдвинутыми одна относительно другой, при расстоянии между пластинами не более 2 cm, может быть определено уравнением:

$$U_d = 15 \sqrt[1{,}8]{s}\ \mathrm{kV_m}.$$

№ 240. Какое расстояние должно быть взято между пластинами и бисквитом вольтметра Кельвина на 6 kV, если коэфициент запаса на разряд должен быть не меньше 1,25?

№ 241. Коронный вольтметр Уайтхеда имеет размеры: $d = 2$ mm, $D = 20$ cm. Корона была обнаружена при давлении 516 mm Hg и температуре 22° C. Определить измеряемое вольтметром напряжение.

№ 242. Найти предельное напряжение, которое можно измерить при помощи вольтметра Уайтхеда, имеющего размеры: $d = 2$ mm, $D = 30$ cm, если наибольшее давление, которое может быть в нем получено, равно 10 at, а наименьшая температура опыта — 15° C.

№ 243. Определить предельное напряжение, которое можно измерить при помощи шарового разрядника с шарами диаметром 250 mm, если оба шара изолированы. $\delta = 1$.

Примечание. См. задачу № 110.

№ 244. Какого диаметра шары необходимо применить для того, чтобы можно было измерять напряжения до 5000 kV при заземлении одного из шаров и при $\delta = 1$.

Примечание. См. задачу № 110.

№ 245. Определить поправку на плотность воздуха для разрядника с шарами диаметром 5 cm, если $b = 700$ mm и $t = 30°$ C.

Примечание. Поправка на плотность воздуха при δ, близком к 1, обычно принимается равной относительно плотности воздуха. Если δ не близко к 1, следует вычислять поправку по формуле Пика:

$$a = \sqrt{\delta}\,\frac{\sqrt{r\delta} + 0{,}54}{\sqrt{r} + 0{,}54}.$$

№ 246. Определить поправку на плотность воздуха для разрядника с шарами диаметром 75 cm, если $b = 700$ mm и $t = 30°$ C.

№ 247. Найти ошибку, получаемую при вычислении разрядного напряжения по формуле Пика для шаров диаметром $d = 10$ cm при $s = 10$ cm, когда один из шаров заземлен и когда оба шара изолированы.

№ 248. Заданы емкость вольтметра $C_2 = 100$ cm и емкость последовательного конденсатора $C_1 = 1000$ cm. Определить, при каком сопротивлении утечки конденсатора R_1 ошибка вольтметра достигнет 5%, если $R_2 = \infty$ и частота $f = 50$ Hz.

Решение. При последовательном соединении двух конденсаторов, обладающих утечкой, отношение их напряжений определяется уравнением:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2\sqrt{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}}{R_1\sqrt{1 + \omega^2 R_2^2 C_2^2}}.$$

Если $R_2 = \infty$, то

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\sqrt{1 + \omega^2 R_1^2 C_1^2}}{\omega R_1 C_2}.$$

Так как второй член под корнем значительно больше первого, то мы можем извлечь корень приближенно:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega R_1 C_1 + \dfrac{1}{2\omega R_1 C_1}}{\omega R_1 C_2} = \frac{C_1}{C_2} + \frac{1}{2\omega^2 R_1^2 C_1 C_2}.$$

Если бы утечки на конденсаторе не было, мы получили бы:

$$\frac{U_2'}{U_1'} = \frac{C_1}{C_2}.$$

Так как измеряемое напряжение неизменно, то

$$\frac{U_2}{U_1+U_2}=\frac{U_2}{U}=\frac{C_1+\frac{1}{2\omega^2R_1^2C_1}}{C_1+C_2+\frac{1}{2\omega^2R_1^2C_1}}=\frac{C_1+\frac{1}{A}}{C_1+C_2+\frac{1}{A}},$$

$$\frac{U_2'}{U_1'+U_2'}=\frac{U_2'}{U}=\frac{C_1}{C_1+C_2}.$$

Относительная ошибка равна

$$0{,}05\cong\frac{U_2-U_2'}{U}=\frac{C_1+\frac{1}{A}}{C_1+C_2+\frac{1}{A}}-\frac{C_1}{C_1+C_2}=$$

$$=\frac{C_2}{A\,(C_1+C_2)^2+C_1+C_2}=\frac{1}{2\omega^2R_1^2\,\frac{C_1}{C_2}(C_1+C_2)^2+\frac{C_1}{C_2}+1}$$

Отсюда

$$R=\frac{\sqrt{\dfrac{20-1-\frac{C_1}{C_2}}{2\,\frac{C_1}{C_2}}}}{\omega\,(C_1+C_2)}=\frac{\sqrt{\dfrac{20-1-10}{20}}}{314\cdot1100\cdot1{,}111\cdot10^{-12}}=1{,}75\cdot10^6\,\Omega.$$

№ 249. Электростатический вольтметр с емкостью $C_2=60$ cm включен последовательно с конденсатором, имеющим емкость $C_1=15$ cm. Сопротивление утечки вольтметра — $3\cdot10^{10}\ \Omega$, а конденсатора — $5\cdot10^8\ \Omega$. Найти погрешность прибора.

№ 250. Электростатический делитель напряжения состоит из двух конденсаторов емкостью $C_1=1122$ cm и $C_2=10\,000$ cm. Найти коэфициент деления, если емкость вольтметра равна $C_3=100$ cm.

№ 251. Доказать, что электростатический ваттметр, включенный по схеме рис. 40, будет давать показания, пропорциональные мощности приемника.

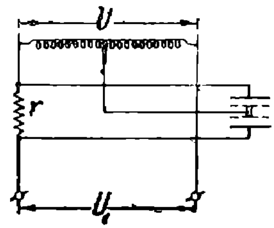

Рис. 40.

Решение. Сила, притягивающая верхний подвижной диск к верхнему неподвижному, равна

$$F_1=k\frac{U^2}{4}.$$

Сила, притягивающая нижний подвижной диск к нижнему неподвижному, равна

$$F_2=k\left(\frac{U}{2}-Ir\right)^2.$$

На коромысло прибора будет действовать разность этих сил, равная

$$F_1 - F_2 = k\frac{U^2}{4} - k\frac{U^2}{4} - kI^2r^2 + kIUr = kIr(U - Ir) =$$
$$= krU_1I = k_1P.$$

№ 252. Доказать, что при включении электростатического ваттметра по схеме рис. 41, его показания будут пропорциональны мощности приемника, сложенной с половиной потерь в сопротивлении r.

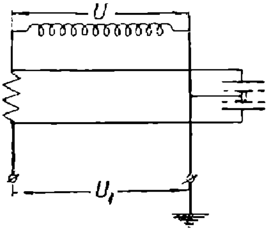

Рис. 41.

№ 253. Определить ошибку при измерении мощности ваттметром Чернышева, включенным по схеме рис. 41, если пренебречь величиной $\frac{I^2r}{2}$. Дано: $U = 150$ kV, $I = 0{,}2$ A, $r = 50\,000\ \Omega$.

№ 254. Постоянные ваттметра Чернышева равны: $k = 5{,}78 \cdot 10^{-9}$, $k_2' = 0{,}19$. Ваттметр включен по схеме рис. 40, причем сопротивление $r = 200\,000\ \Omega$, а токи в катушках электродинамометра равны $i_1 = 3{,}04$ A, $i_2 = 5{,}2$ A. Определить мощность приемника.

№ 255. Емкость временной цепи катодного осциллографа равна $C = 6000$ cm. Найти постоянную времени цепи при $r = 450\ \Omega$.

Примечание. Постоянная времени в данном случае выражается произведением rC.

№ 256. Емкость временной цепи катодного осциллографа равна $C = 6000$ cm. Найти сопротивление, при котором постоянная времени цепи будет равна 1 μ sec; 5 μ sec.

VIII. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ СИЛЫ.

№ 257. Определить электродинамическую силу, возникающую между двумя параллельными шинами, расположенными на расстоянии 30 cm друг от друга, если ток в них равен 1) 10 kA и 2) 100 kA. Силу рассчитать на 1 m длины шин.

Решение. Если поперечные размеры сечения шины малы по сравнению с расстоянием между шинами, электродинамическая сила между ними, отнесенная к единице длины шин, может быть определена уравнением

$$F = 2{,}04 \cdot 10^{-8}\frac{I^2}{s}\ \text{kG/cm},$$

где I — в амперах и s — в сантиметрах.

Подставляя в это уравнение условия задачи, получим:

$$1)\quad F = 2{,}04 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10^8}{30} \cdot 100 = 6{,}8 \text{ kG},$$

$$2)\quad F = 2{,}04 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{10^{10}}{30} \cdot 100 = 680 \text{ kG}.$$

№ 258. Определить электродинамическую силу, возникающую между двумя параллельными шинами, расположенными на расстоянии 60 cm друг от друга, если ток в них равен 50 kA. Силу рассчитать на 1 m длины шины.

№ 259. Определить электродинамическую силу, действующую на шинный изолятор, если расстояние между шинами равно 40 cm, ток в шинах — 18 000 A и пролет между изоляторами — 1,2 m.

№ 260. На каком расстоянии необходимо расположить две шины для того, чтобы при токе $I = 35\,000$ A электродинамическая сила на 1 m шины не превзошла 50 kG?

№ 261. Провода, подводящие ток к трансформатору тока, делают петлю, расстояние между сторонами которой равно 20 cm. Подобрать сечение проводов так, чтобы напряжение в материале их не превосходило 500 kG/cm^2, если расстояние между изоляторами равно 1,8 m, а ток—25 000 A. Влияние резонанса не учитывается. Провода — круглые.

№ 262. Прямой и обратный провода от трансформатора тока идут на расстоянии 13 cm друг от друга. Подобрать сечение проводов так, чтобы напряжение в материале их не превосходило 6 kG/mm^2, предполагая сечение прямоугольным с меньшей стороной, равной 1 cm и лежащей в плоскости, нормальной плоскости проводов. Расстояние между изоляторами 1,5 m, ток — 30 000 A, влияние резонанса не учитывается.

№ 263. Определить наибольшую электродинамическую силу на 1 m длины шин трехфазной установки, если шины расположены в одной горизонтальной плоскости на расстоянии 40 cm, а ток трехфазного короткого замыкания равен 50 kA.

Решение. При горизонтальном расположении проводов трехфазной цепи наибольшая электродинамическая сила действует на средний провод. Она равна

$$F = \frac{1{,}77\, I^2}{s} \cdot 10^{-8} \text{ kG/cm}.$$

Подставляя условия задачи, получим

$$F = \frac{1{,}77 \cdot 25 \cdot 10^8}{40} \cdot 100 \cdot 10^{-8} = 110{,}6 \text{ kG}.$$

№ 264. Найти наибольшую электродинамическую силу, действующую на 1 cm средней и крайней шин трехфазной цепи при вертикальном расположении шин и при расстоянии между ними 80 cm, если ток в шинах равен 25 000 A.

№ 265. Найти наибольшую электродинамическую силу, действующую на 1 cm средней и крайней шин трехфазной установки при расположении шин в одной плоскости и расстоянии между ними 25 cm, если ток в них равен 80 kA.

№ 266. Шины расположены по вершинам равностороннего треугольника. Пролет между изоляторами — 2,25 m, сила тока — 16 000 A. Найти наибольшую электродинамическую силу, действующую на изолятор, если расстояние между шинами — 20 cm.

Решение. При расположении шин равносторонним треугольником действующая между ними электродинамическая сила выражается уравнением:

$$F = 1{,}02 \cdot 10^{-8} \frac{\sqrt{3}\, I^2}{s} \sin \omega t \text{ kG/cm}.$$

Эта сила достигает при $\sin \omega t = 1$ максимума, равного

$$F_{max} = 1{,}77 \cdot 10^{-8} \frac{I^2}{s} \text{ kG/cm}.$$

Подставляя условия задачи, находим:

$$F_{max} = 1{,}77\ \ 10^{-8} \frac{1{,}6^2 \cdot 10^8}{20} \cdot 225 = 51 \text{ kG}.$$

№ 267. Определить наибольшую электродинамическую силу, действующую на 1 m жилы трехфазного кабеля, если диаметр жилы $d = 14{,}2$ mm, толщина изоляции между жилами — 8 mm и если по кабелю идет ток короткого замыкания, равный 10 kA.

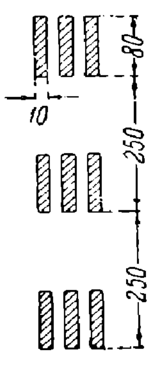

Рис. 42.

№ 268. Трехфазный кабель имеет диаметр жил 20,1 mm и толщину изоляции — 8 mm. Найти наибольшую электродинамическую силу, действующую на 1 m длины жилы, если по кабелю идет двухфазный ток короткого замыкания, равный 45 kA.

№ 269. Шины трехфазной установки (рис. 42) расположены в одной вертикальной плоскости на расстоянии 25 cm друг от друга. Каждая шина состоит из 3 полос сечением 10×80 mm, расположенных вертикально с промежутками по 10 mm. Определить наибольшую электродинамическую силу на 1 m, действующую между шинами при токе 85 kA.

Решение. Заменим приближенно реальные шины, состоящие из полос, фиктивными сплошными, имеющими ту же высоту, а по ширине равными суммарной ширине трех полос и двух промежутков между ними. Тем самым мы сведем расчет к определению электродинамической силы между двумя параллельными шинами с поперечными размерами 5×8 cm.

Для такого случая электродинамическая сила может быть определена равенством

$$F = \frac{2{,}04 \cdot I^2}{b}\left[x + (y+1)\ln(1+x) + (y-1)\ln(1-x) - \right.$$
$$\left. - \frac{x^2(y+1)^2}{2(1+x)} + \frac{x^2(y-1)^2}{2(1-x)}\right] \cdot 10^{-8} \text{ kG/cm},$$

где

$$x = \frac{b}{h+s}, \quad y = \frac{s}{b},$$

b — толщина шины в плоскости шин,
h — высота шины и
s — расстояние между осями шин.

Эта сложная формула может быть значительно упрощена, если принять во внимание, что x всегда значительно меньше 1. Разлагая логарифмы в ряд и беря по два члена этого ряда, разлагая также в ряд дроби $\frac{1}{1+x}$ и $\frac{1}{1-x}$ и беря по три члена этих рядов, мы получим следующее выражение:

$$F \cong \frac{2{,}04\, I^2}{b} \cdot 3x\left(1 - xy + \frac{x^2y^2}{3} + \frac{x^2}{6} - \frac{2x^3y}{3}\right) \cdot 10^{-8} \text{ kG/cm}.$$

В этом выражении обычно можно отбросить два последних члена вследствие их малости, и тогда мы придем к следующему приближенному равенству:

$$F \cong \frac{6{,}12\, I^2 x}{b}\left(1 - xy + \frac{x^2y^2}{3}\right) \cdot 10^{-8} \text{ kG/cm}.$$

Подставляя данные в условии задачи величины и предполагая, что ток идет только в двух шинах, найдем:

$$x = \frac{b}{h+s} = \frac{8}{25+5} = 0{,}267,$$

$$y = \frac{s}{b} = \frac{25}{8} = 3{,}125,$$

$$F = \frac{6{,}12 \cdot 8{,}5^2 \cdot 10^8 \cdot 0{,}267 \cdot 10^{-6}}{8}\left(1 - 0{,}267 \cdot 3{,}125 + \frac{0{,}267^2 \cdot 3{,}125^2}{3}\right) =$$
$$= 587 \text{ kG}.$$

№ 270. Шины трехфазной установки (рис. 43) расположены в одной горизонтальной плоскости на расстоянии 25 cm друг от друга. Каждая шина состоит из трех полос сечением 10×80 mm, расположенных вертикально с промежутками по 10 mm. Определить наибольшую электродинамическую силу на 1 m, действующих между шинами при токе 85 kA.

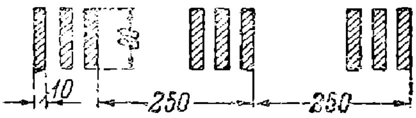

Рис. 43.

Примечание. Принять случай двухфазного короткого замыкания.

№ 271. Каждая шина трехфазной системы (рис. 44) состоит из трех медных полос, имеющих толщину 8 mm и высоту 65 mm, с промежутками по 8 mm. Найти давление, оказываемое шинами на изоляторы, если шины расположены в горизонтальной плоскости так, что их большая сторона находится в плоскости шин. Пролет между изоляторами равен 1,30 m, и ток двухфазного короткого замыкания, текущий по шинам, равен 35 kA. Расстояние между шинами — 20 cm.

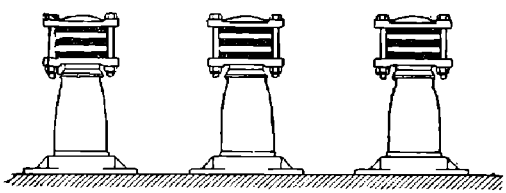

Рис. 44.

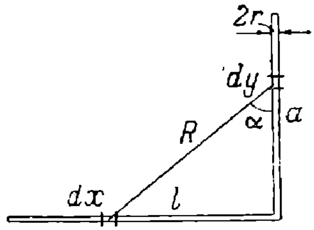

Рис. 45.

№ 272. Определить электродинамическую силу, действующую между частями провода, согнутого под прямым углом (рис. 45), если длина одной стороны угла l, второй стороны — a и радиус провода — r

Решение. Обозначим через dx элемент провода, взятый на стороне l, и через dy — элемент провода, взятый на стороне a. Расстояние между элементами dx и dy пусть будет равно R, и угол между R и a — равен α. Тогда электродинамическая сила между проводами l и a будет равна

$$F = \iint \frac{I^2 \sin\alpha \, dx \, dy}{R^2}. \qquad (1)$$

Выразим R и y через x и α: $R = \frac{x}{\sin\alpha}$, $y = R\cos\alpha = x \operatorname{ctg}\alpha$,

$$dy = -\frac{x d\alpha}{\sin^2\alpha}.$$

Подставляя значения R и dy в уравнение (1), получим

$$F = -\int\int \frac{I^2 \sin\alpha \, \dfrac{x\,d\alpha}{\sin^2\alpha}\, dx}{\dfrac{x^2}{\sin^2\alpha}} = -\iint \frac{I^2 \sin\alpha \, d\alpha \, dx}{x}. \qquad (2)$$

Произведем интегрирование по α:

$$F = -\int \frac{I^2}{x}\left[\int \sin\alpha d\alpha\right] dx = \int \frac{I^2}{x}\Big[\cos\alpha\Big]_{\frac{\pi}{2}}^{\alpha_1} dx =$$

$$= \int \frac{I^2}{x} \cos\alpha_1 \, dx$$

Величина $\cos\alpha_1$ равна:

$$\cos\alpha_1 = \frac{a}{\sqrt{a^2+x^2}}.$$

Отсюда:

$$\sin\alpha_1 = \frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}},$$

$$\operatorname{tg}\alpha_1 = \frac{x}{a},$$

$$x = a \operatorname{tg}\alpha_1,$$

$$dx = \frac{a d\alpha_1}{\cos^2\alpha_1}.$$

Поэтому

$$F = \int \frac{I^2 \cos\alpha_1 \dfrac{a d\alpha_1}{\cos^2\alpha_1}}{a \operatorname{tg}\alpha_1} = \int \frac{I^2 d\alpha_1}{\sin\alpha_1} = \left[I^2 \ln\left(\operatorname{tg}\frac{\alpha_1}{2}\right)\right]_{\alpha'}^{\alpha_1''}.$$

Далее,

$$\operatorname{tg}\frac{\alpha_1}{2} = \frac{\sin\alpha_1}{1+\cos\alpha_1} = \frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}\left(1+\dfrac{a}{\sqrt{a^2+x^2}}\right)} = \frac{x}{a+\sqrt{a^2+x^2}},$$

откуда

$$F = I^2\left[\ln\frac{x}{a+\sqrt{a^2+x^2}}\right]_r^l = I^2 \ln\frac{l\,(a+\sqrt{a^2+r^2})}{r\,(a+\sqrt{l^2+a^2})} \text{ dn}.$$

Нижним пределом интегрирования мы должны взять здесь r, так как уравнение (1) справедливо только для $x \geqslant r$. Если бы мы взяли за нижний предел 0, т. е. пренебрегли бы размерами проводника, мы получили бы $F = \infty$. Очевидно, в данном случае пренебрегать размерами проводника нельзя.

№ 273. Шины имеют П-образную форму, причем длинная сторона П равна 20 m, а короткая — 6 m. Определить силу, с которой длинная сторона действует на короткую, предполагая диаметр шины равным 4 cm и ток 15 000 A.

№ 274. Провода от трансформатора идут вверх, а затем изгибаются под прямым углом и идут к проходным изоляторам. Определить электродинамическую силу, с которой действует вертикальная часть шины на горизонтальную, если ток равен 30 kA, длина горизонтальной части шины $a = 2{,}1$ m, длина вертикальной части шины $l = 0{,}9$ m и диаметр шины $d = 6$ cm.

№ 275. Найти вращающий момент, создаваемый электродинамическими силами на вертикальной части провода, изогнутого под прямым углом, если длина горизонтальной части — l, а вертикальной — a.

Примечание. Вращающий момент может быть определен из уравнения

$$M = \iint \frac{I^2 \sin\alpha\, x dx dy}{R^2}.$$

Размерами поперечного сечения провода можно пренебречь.

№ 276. Провода от масляного выключателя поднимаются вверх, а затем идут горизонтально к проходным изоляторам. Определить вращающий момент от электродинамических сил в горизонтальной части проводов, принимая во внимание только действие вертикальной части каждого провода на его горизонтальную часть. Длина вертикальной части проводов — 0,7 m, горизонтальной — 1,2 m, ток — 20 kA.

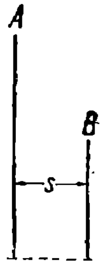

Рис. 46.

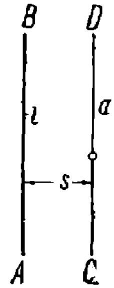

Рис. 47.

№ 277. Определить электродинамическую силу, с которой проводник A (рис. 46) действует на проводник B. Длина проводника A — 2 m, проводника B — 0,8 m, расстояние между ними — 28 cm, ток — 12 000 A.

Примечание. При расположении проводов по рис. 46 электродинамическая сила может быть вычислена по методу, данному в задаче № 272. Она равна

$$F = I^2\left[\sqrt{1+\left(\frac{a}{s}\right)^2} + \sqrt{1+\left(\frac{l}{s}\right)^2} - \sqrt{1+\left(\frac{l-a}{s}\right)^2} - 1\right]\text{dn}.$$

№ 278. Найти момент, создаваемый проводником AB в верхней части проводника CD (рис. 47), закрепленного в точке O, если длина проводника AB равна $l = 120$ cm, длина OD равна $a = 70$ cm, расстояние между проводниками равно 30 cm и ток равен 18 000 A.

№ 279. Найти момент, с которым траверса масляного выключателя AB действует на верхнюю часть ввода CD (рис. 48), предполагая длину траверсы $s = 50$ cm, полную длину ввода $l = 180$ cm и высоту ввода над фланцем $a = 90$ cm. Ток равен $I = 10\,000$ A.

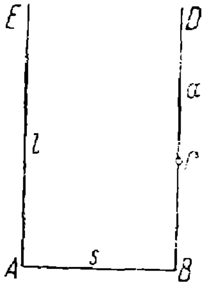

Рис. 48.

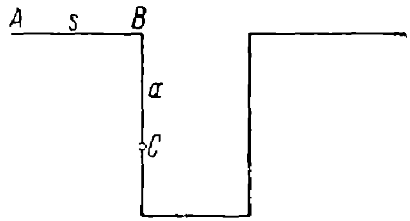

Рис. 49.

№ 280. Найти момент, с которым часть подводящего провода масляного выключателя AB, длиною $s = 50$ cm, действует на верхнюю часть ввода BC, длина которой $a = 90$ cm (рис. 49), если ток равен $I = 10\,000$ A. Момент взят относительно точки C. Радиус подводящего провода равен 2 cm.

№ 281. Определить силу, вырывающую нож разъединителя при токе $I = 150\,000$ A, если размеры разъединителя таковы, как показано на рис. 50.

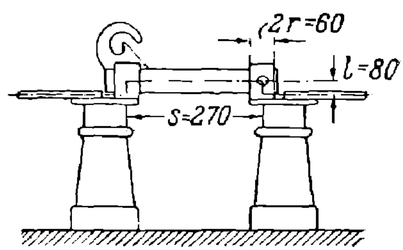

Рис. 50.

Примечание. Для определения силы, действующей на нож разъединителя, можно воспользоваться уравнением

$$F = 2{,}04\, I^2 \cdot 10^{-8}\left(\ln \frac{l + \sqrt{l^2 + r^2}}{r} - \frac{l}{2s} - 1\right) \text{kG}.$$

Сила, вырывающая нож разъединителя, равна половине F.

№ 282. Определить вращающий момент, действующий на нож разъединителя, имеющего размеры, показанные на рис. 51, при токе $I = 67\,000$ A.

№ 283. Определить силу, действующую на траверсу CD масляного выключателя в момент короткого замыкания, если ток короткого замыкания равен 38 000 A, а размеры траверсы и сердечников вводов даны на рис. 52.

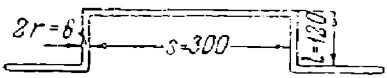

Рис. 51.

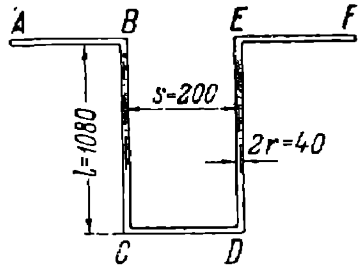

Рис. 52.

Примечание. Приближенно силу, действующую на траверсу масляного выключателя, можно определить по уравнению:

$$F = 2{,}04 \cdot 10^{-8} I^2 \left[\ln \frac{s}{r} + \frac{s^2}{4l^2} - \frac{s}{l}\right] \text{ kG}.$$

IX. ТОКИ В ЗЕМЛЕ.

№ 284. Определить сопротивление заземления полушара, расположенного так, что его плоская поверхность совпадает с плоскостью земли.

Решение. При решении этой задачи возможно принять, что линии тока идут по радиусам от центра шара. Поэтому плотность тока на расстоянии r от центра шара будет равна

$$j = \frac{I}{2\pi r^2},$$

где I — ток через заземлитель.

Умножая плотность тока на удельное сопротивление грунта ρ, мы получим падение напряжения на единицу длины, т. е. градиент потенциала:

$$g = j\rho = \frac{I\rho}{2\pi r^2}.$$

Потенциал в точке, отстоящей на r от центра шара, равен

$$U = \int_r^\infty g\,dr = \frac{I\rho}{2\pi} \int_r^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{I\rho}{2\pi r}.$$

Потенциал на поверхности шара получим, положив

$$r = \frac{D}{2},$$

где D — диаметр шара:

$$U_{\max} = \frac{I\rho}{\pi D}.$$

С другой стороны, мы можем написать:

$$U_{\max} = IR,$$

где R — сопротивление заземления. Сравнивая два последние уравнения, найдем

$$R = \frac{\rho}{\pi D}.$$

№ 285. Найти сопротивление заземления фундамента стальной опоры, имеющей глубину заложения $h = 2{,}2$ m. Удельное сопротивление почвы $\rho = 8 \cdot 10^3$ Ω cm.

Примечание. Для определения сопротивления заземления приближенно можно заменить реальный фундамент полушаром, радиус которого равен глубине заложения фундамента.

№ 286. Определить сопротивление заземления железобетонного фундамента опоры, имеющего глубину заложения $h = 1{,}85$ m. Удельное сопротивление почвы $\rho = 12 \cdot 10^3$ Ω cm.

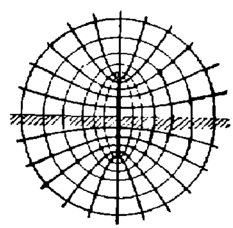

Рис. 53.

№ 287. Определить сопротивление заземления стальной трубы диаметром $2r$, забитой в землю на глубину l, если удельное сопротивление грунта равно ρ.

Решение. На рис. 53 изображена труба, забитая в землю, ее линии тока с эквипотенциальными поверхностями и зеркальное изображение этой картины над поверхностью земли. Не трудно видеть, что эта картина вполне аналогична картине электростатического поля около заряженного цилиндра. Математически эту аналогию можно выразить следующим образом.

Градиент, создаваемый током в земле, равен

$$\frac{dU}{dr} = -j\rho.$$

Умножая это выражение на элемент dS какой-либо замкнутой поверхности и интегрируя по всей поверхности, получим

$$\int\limits_S \frac{dU}{dr}\,dS = -\int j\rho dS = -I\rho = -\frac{U}{R}\,\rho, \qquad (1)$$

где R — сопротивление заземления трубы.

Градиент потенциала аналогичного электрического поля будет равен

$$\frac{dU}{dr} = -\frac{4\pi D}{\varepsilon},$$

где D — электрическое смещение и ε — диэлектрическая постоянная, которую мы можем положить равной 1. Умножая это выражение на dS и интегрируя по замкнутой поверхности, получим

$$\int\limits_S \frac{dU}{dr} dS = -\int 4\pi D dS = -4\pi Q = -4\pi UC, \qquad (2)$$

где Q — заряд цилиндра и C — его емкость.

Сравнивая уравнения (1) и (2), найдем зависимость между сопротивлением заземления R и емкостью C:

$$R = \frac{\rho}{4\pi C}.$$

Здесь R представляет собою сопротивление забитой в землю трубы, определенное в предположении, что ток распространяется во всем пространстве вокруг трубы и ее зеркального изображения. В действительности ток идет только в земле, отчего сопротивление удваивается. Поэтому

$$R = \frac{\rho}{2\pi C}.$$

Емкость цилиндра, имеющего длину $2l$ и диаметр $2r$, равна

$$C = \frac{\sqrt{l^2 - r^2}}{\ln \frac{l + \sqrt{l^2 - r^2}}{r}}.$$

Поэтому

$$R = \frac{\rho \ln \frac{l + \sqrt{l^2 - r^2}}{r}}{2\pi \sqrt{l^2 - r^2}}.$$

Так как обычно $l \gg r$, то

$$R \cong \frac{\rho \ln \frac{2l}{r}}{2\pi l}.$$

№ 288. Найти сопротивление заземления стальной трубы диаметром 5 cm и длиною 3 m, если удельное сопротивление грунта $\rho = 10^4\ \Omega$ cm.

№ 289. Определить сопротивление заземления стальной трубы диаметром 3 cm и длиною 3 m, если удельное сопротивление грунта $\rho = 10^4\ \Omega$ cm.

№ 290. Найти сопротивление заземления стальной трубы диаметром 4 cm и длиною 2 m, если удельное сопротивление грунта равно $\rho = 8 \cdot 10^3\,\Omega$ cm.

№ 291. Найти сопротивление заземления стальной трубы диаметром 4 cm и длиною 4 m, если удельное сопротивление грунта равно $12 \cdot 10^4\,\Omega$ cm.

№ 292. Определить сопротивление заземления стальной трубы диаметром 4 cm и длиною 3 m при удельном сопротивлении грунта $\rho = 10^4\,\Omega$ cm, в случае, когда верхний конец трубы находится на поверхности земли и когда он находится на глубине $a = 0{,}5$ m.

Решение. Сопротивление заземления трубы, забитой в уровень с поверхностью земли, равно

$$R = \frac{\rho \ln \frac{2l}{r}}{2\pi l} = \frac{10^4 \ln \frac{600}{2}}{2\pi 300} = 29{,}3\,\Omega.$$

Если конец трубы находится ниже уровня земли, ее сопротивление заземления может быть вычислено по формуле:

$$R \cong \frac{\rho}{2\pi l}\left[\ln\frac{l}{r} + \frac{l+a}{l}\ln 2(l+a) + \frac{a}{l}\ln 2a - \frac{l+2a}{l}\ln(l+2a)\right].$$

Подставляя в эту формулу численные значения входящих в нее величин, получим:

$$R = \frac{10^4}{2\pi \cdot 300}\left[\ln\frac{300}{2} + \frac{350}{300}\ln 700 + \frac{50}{300}\ln 100 - \frac{400}{300}\ln 400\right] = 28{,}7\,\Omega.$$

Сравнение этой величины с полученной выше показывает, что влияние опускания верхнего конца трубы под поверхность земли составляет 2%.

№ 293. Найти сопротивление заземления трубы, имеющей диаметр 3 cm, длину 3 m и зарытой так, что ее верхний конец находится на глубине 1 m. Удельное сопротивление грунта равно $2{,}6 \cdot 10^4\,\Omega$ cm.

№ 294. Определить сопротивление заземления полосы, имеющей ширину $b = 3$ cm, толщину $s = 0{,}4$ cm и длину $l = 5$ m, зарытой в землю на глубину $a = 0{,}8$ m. Удельное сопротивление грунта $\rho = 1{,}5 \cdot 10^4\,\Omega$ cm.

Решение. Для упрощения решения мы можем заменить плоскую полосу цилиндром, радиус которого равен среднему геометрическому радиусу полосы. Последний определяется уравнением:

$$r = 0{,}2235\,(s + b) = 0{,}2235\,(3 + 0{,}4) = 0{,}76 \text{ cm}.$$

Сопротивление заземления цилиндрической трубы, лежащей в плоскости земной поверхности, определяется тем же уравнением, что и для вертикально забитой трубы, с тою только разницей, что вместо длины трубы l надо вставить половину этой длины. Поэтому

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi l} \ln \frac{l}{r}.$$

При зарывании полосы в землю ее сопротивление заземления изменяется. Это изменение можно учесть добавлением второго члена следующего вида:

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln \frac{l}{2a} + \frac{2a}{l} - \ln \frac{l}{r} - \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}\right).$$

Суммируя эти два выражения, получим полное сопротивление заземления полосы:

$$R = R_1 + R_2 = \frac{\rho}{2\pi l}\left(\ln \frac{l^2}{2ar} + \frac{2a}{l} - \sqrt{1 + \frac{4a^2}{l^2}}\right).$$

Подставляя сюда данные в условии задачи величины, найдем:

$$R = \frac{1{,}5 \cdot 10^4}{2\pi \cdot 500}\left(\ln \frac{500^2}{2 \cdot 80 \cdot 0{,}76} + \frac{160}{500} - \sqrt{1 + \frac{4 \cdot 80^2}{500^2}}\right) = 33{,}1\ \Omega.$$

№ 295. Найти сопротивление заземления троса, имеющего диаметр 1 cm и длину 20 m, зарытого на глубину 1 m в землю, удельное сопротивление которой равно $3 \cdot 10^4\ \Omega$ cm.

№ 296. Найти сопротивление заземления полосы проложенной вокруг опор двухцепной линии на глубине 0,6 m, если полоса образует прямоугольный контур со сторонами 10 m и 30 m. Толщина полосы — 4 mm, ширина ее — 5 cm. Удельное сопротивление грунта $\rho = 1{,}2 \cdot 10^4\ \Omega$ cm.

Примечание. При расчете пренебречь влиянием экранирования и рассчитывать контур, как прямолинейную полосу.

№ 297. Найти сопротивление заземления кольца из троса, имеющего диаметр 4 m и зарытого в землю на глубину 0,75 m. Диаметр троса — 1 cm. Удельное сопротивление грунта $8 \cdot 10^3\ \Omega$ cm.

Примечание. Приближенно можно рассчитывать такое кольцо, как полосу равной длины.

№ 298. Заземлитель образован 6 трубами, забитыми на расстоянии 3 m одна от другой. Диаметр труб — 3 cm, длина их — 3 m. Определить сопротивление заземления заземлителя, если удельное сопротивление грунта равно $10^4\ \Omega$ cm.

Решение. Сопротивление заземления заземлителя, образованного несколькими симметрично расположенными трубами, можно рассчитать по формуле для одиночной трубы, если вместо радиуса трубы ввести некоторый эквивалентный радиус заземлителя, определяемый уравнением

$$R_c = R_0 \sqrt[n]{n \frac{r}{R_0}},$$

где R_0 — радиус окружности, по которой расположены трубы, n — их число и r — радиус трубы.

По условию задачи заземлитель образован 6 трубами, забитыми по окружности. Очевидно, они образуют правильный шестиугольник, следовательно, $R_0 = 3$ m. Так как $r = 1{,}5$ cm, то

$$R_c = 300 \sqrt{6 \frac{1{,}5}{300}} = 167{,}4 \text{ cm}.$$

Поэтому сопротивление заземления будет равно

$$R = \frac{\rho \ln \frac{2l}{R_c}}{2\pi l} = \frac{10^4 \ln \frac{600}{167{,}4}}{600\pi} = 6{,}78\ \Omega.$$

№ 299. Заземлитель состоит из 4 труб, забитых по углам квадрата со стороною 4 m. Диаметр труб — 2,5 cm, длина — 3,5 m, удельное сопротивление грунта $1{,}3 \cdot 10^4\ \Omega$ cm. Определить сопротивление заземления.

№ 300. Заземлитель состоит из 5 труб, забитых по вершинам правильного пятиугольника на расстоянии 3 m одна от другой. Диаметр труб — 4 cm, длина — 2,5 m, удельное сопротивление грунта — $7{,}5 \cdot 10^3\ \Omega$ cm. Определить сопротивление заземления.

№ 301. Сопротивление заземления опоры должно быть не более 5 Ω. Определить, какое число труб необходимо взять для этой цели, предполагая длину труб равной 2,7 m, их диаметр — 3 cm и удельное сопротивление грунта — $1{,}2 \cdot 10^4\ \Omega$ cm. Расстояние между трубами взять равным их длине.

Примечание. Определив необходимую величину эквивалентного радиуса заземлителя, рекомендуется далее находить число труб подбором.

№ 302. Сопротивление заземления опоры должно быть не более 10 Ω. Определить число труб заземлителя, полагая длину труб 3,2 m, их диаметр 3 cm и удельное сопротивление грунта $1{,}5 \cdot 10^4\ \Omega$ cm. Расстояние между трубами — 3 m.

№ 303. Сопротивление заземления опоры должно быть не более 10 Ω. Определить длину заземлителя, выполненного в виде кольца из полосы $3 \times 0{,}5$ cm, если удельное сопротивление грунта $1{,}5 \cdot 10^4\ \Omega$ cm. Полоса зарывается на глубину 1 m.

Примечание. Задачу решить подбором.

№ 304. Найти напряжение прикосновения для заземлителя, выполненного в виде трубы диаметром $d = 4$ cm и длиной $l = 3{,}5$ m, забитой в грунт с удельным сопротивлением $\rho = 10^4\ \Omega$ cm, если ток равен $I = 500$ A и расстояние прикосновения $S = 0{,}8$ m.

Решение. Потенциал в земле, окружающей трубчатый заземлитель определяется формулой:

$$U = \frac{I\rho}{2\pi l} \ln \frac{\sqrt{l^2 + r^2} + l}{r},$$

где r — расстояние рассматриваемой точки от оси трубы. Напряжение прикосновения мы получим, если найдем разность потенциалов $U_1 - U_2$ между точками, радиусы которых равны $\frac{d}{2}$ и $\frac{d}{2} + S$. Обозначая

$$\frac{d}{2} = r_0$$

и

$$\frac{d}{2} + S = r_1,$$

получим:

$$U_1 - U_2 = \frac{I\rho}{2\pi l}\left(\ln \frac{\sqrt{l^2 + r_0^2} + l}{r_0} - \ln \frac{\sqrt{l^2 + r_1^2} + l}{r_1}\right) =$$

$$= \frac{I\rho}{2\pi l} \ln \frac{(\sqrt{l^2 + r_0^2} + l)\, r_1}{(\sqrt{l^2 + r_1^2} + l)\, r_0}.$$

Подставляя численные значения входящих в эту формулу величин, найдем:

$$U_1 - U_2 = \frac{500 \cdot 10^4}{2\pi \cdot 350} \ln \frac{(\sqrt{350^2 + 2^2} + 350)\, 82}{(\sqrt{350^2 + 82^2} + 350)\, 2} = 8410\ \text{V}.$$

№ 305. Найти шаговое напряжение для заземлителя, выполненного в виде трубы диаметром $d = 3$ cm и длиною $l = 3$ m, если ток равен 200 A, удельное сопротивление грунта равно $\rho = 8{,}5 \cdot 10^3\ \Omega$ cm, длина шага равна 0,82 m, и точка, для которой определяется шаговое напряжение, находится на расстоянии 5 m от оси трубы.

№ 306. Определить шаговое напряжение для полосового заземлителя, проложенного по окружности с диаметром $2R = 6$ m, на расстояниях $r = 0{,}4$ m и $r = 2{,}0$ m от заземлителя. Полоса имеет сечение $0{,}4 \times 3{,}5$ cm, удельное сопротивление грунта $\rho = 1{,}3 \cdot 10^4\ \Omega$ cm, длина шага $S = 0{,}8$ m, ток — 700 A.

Примечание. Ввести в расчет средний геометрический радиус полосы (см. задачу № 294). Потенциал для кольцевого заземлителя выражается уравнением

$$U = \frac{I\rho}{\pi^2 (r + R)} \ln 8 \frac{R}{r_0},$$

где r_0 — средний геометрический радиус полосы.

№ 307. Заземлитель выполнен в виде 6 труб длиною 3,2 m, диаметром 3,6 cm, забитых симметрично по окружности, радиус которой равен 2,8 m. Трубы соединены между собой полосою, имеющей сечение $0,4 \times 4$ cm. Определить наибольшее шаговое напряжение такого заземлителя, предполагая длину шага $S = 0,8$ m и удельное сопротивление грунта — $8 \cdot 10^3\ \Omega$ cm. Полоса зарыта на 0,6 m в землю. Ток $I = 800$ A.

Примечание. Решить задачу приближенно, предполагая, что ток делится между заземлителями обратно пропорционально их сопротивлениям, и пренебрегая взаимным экранированием кольца и труб.

№ 308. Заземлитель выполнен в виде 8 труб длиною 3 m, диаметром 3 cm, забитых симметрично по окружности, имеющей диаметр 8 m. Трубы соединены между собой полосою, имеющей сечение $0,35 \times 3,5$ cm. Найти наибольшее шаговое напряжение заземлителя, предполагая длину шага $S = 0,8$ m и удельное сопротивление грунта $\rho = 10^4\ \Omega$ cm. Полоса зарыта на 0,7 m в землю. Ток $I = 200$ A.

№ 309. Линия передачи снабжена тросом, имеющим сопротивление 6 Ω/km. Сопротивление заземления опор равно 12 Ω. Определить суммарное сопротивление троса и заземления, а также часть тока, которая пройдет через заземление опоры, если пролет между опорами равен 200 m.

Решение. Распределение тока между опорами и тросом зависит от отношения $\frac{R}{r}$, где R — сопротивление заземления опоры и r — сопротивление троса между двумя соседними опорами. Величина R задана в условии задачи, а величина r равна

$$r = 6\,\frac{200}{1000} = 1,2\ \Omega.$$

Если отношение $\frac{R}{r}$ велико, как в данном случае, то сопротивление троса и заземления определяется формулой:

$$R_a = \frac{R}{\sqrt{1+4\frac{R}{r}}} = \frac{12}{\sqrt{1+4\frac{12}{1,2}}} = 1,873\ \Omega.$$

Часть тока, идущая через заземление, будет равна

$$\frac{I_0}{I_e} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{r}{R}} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{1,2}{12}} = 0,158.$$

№ 310. Линия передачи имеет два троса, соединенные между собою и заземленные на каждой опоре. Сопротивление каждого троса между двумя соседними опорами равно 1,2 Ω, сопротивление заземлении опоры — 12 Ω. Найти часть тока, идущую через опору, и эквивалентное сопротивление тросов и заземления опоры.

№ 311. Линия передачи имеет два троса, соединенные между собой и заземленные на каждой опоре. Сопротивление троса — 0,4 Ω/km, сопротивление заземления опоры 16 Ω. Найти часть тока, идущую через опору, и эквивалентное сопротивление тросов и заземления опоры, если расстояние между опорами равно 250 m.

№ 312. Сопротивление заземления опор равно 10 Ω. Найти сопротивление, которое должен иметь трос для того, чтобы проходящий через опору ток был не больше 100 A, если полный ток замыкания на землю равен 600 A. Расстояние между опорами равно 230 m.

X. ВЛИЯНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ НА СОСЕДНИЕ ЛИНИИ.

№ 313. Линия передачи на 100 kV имеет провода диаметром 14,2 mm, расположенные горизонтально на расстоянии 3,5 m, подвешенные на высоте 7 m от земли. Определить потенциал, индуктируемый этой линией на однопроводной телефонной линии, расположенной на расстоянии 20 m от оси линии передачи, при нормальном режиме работы линии передачи и при замыкании на землю фазы, ближайшей к линии связи. Нейтраль трансформаторов не заземлена.

Решение. Модуль потенциала, индуктируемого линией передачи на соседнем проводе при нормальном режиме, приближенно равен

$$U_4=\frac{U_1}{a_{11}-a_{12}}\sqrt{a_{14}{}^2+a_{24}{}^2+a_{34}{}^2-a_{14}a_{24}-a_{14}a_{34}-a_{24}a_{34}}\,,$$

где U_1 — потенциал относительно земли первого провода линии передачи и a_{11}, $a_{12}\ldots$ — потенциальные коэфициенты. Найдем эти коэфициенты.

$$a_{11}=2\ln\frac{2h_1}{r_1}=2\ln\frac{2\cdot 700}{0{,}71}=15{,}16,$$

$$a_{12}=2\ln\frac{\sqrt{(2h_1)^2+S_{12}{}^2}}{S_{12}}=\ln\frac{2h_1{}^2+S_{12}{}^2}{S_{12}{}^2}=\ln\frac{14^2+3{,}5^2}{3{,}5^2}=2{,}835,$$

$$a_{14}=2\ln\sqrt{\frac{(S_{24}+S_{12})^2+(h_1+h_4)^2}{(S_{24}+S_{12})^2+(h_1-h_4)^2}}\cong\frac{4h_1h_4}{(S_{24}+S_{12})^2+h_1{}^2+h_4{}^2}=$$

$$=\frac{4\cdot 7\cdot 5}{23{,}5^2+7^2+5^2}=0{,}224,$$

$$a_{24}\cong\frac{4h_1h_4}{S_{24}{}^2+h_1{}^2+h_4{}^2}=\frac{140}{20^2+74}=0{,}295,$$

$$a_{34}\cong\frac{4h_1h_4}{(S_{24}-S_{12})^2+h_1{}^2+h_4{}^2}=\frac{140}{16{,}5^2+74}=0{,}405.$$

Подставляя полученные числа в приведенную выше формулу, получим:

$$U_4 = \frac{100}{\sqrt{3}\,(15{,}16 - 2{,}835)} \sqrt{0{,}224^2 + 0{,}295^2 + 0{,}405^2 - 0{,}224 \cdot 0{,}295 - 0{,}224 \cdot 0{,}405 - 0{,}295 \cdot 0{,}405} = 0{,}742 \text{ kV}.$$

При замыкании на землю фазы линии передачи, ближайшей к линии связи (фазы 3 по нашему обозначению), индуктированный потенциал на линии связи будет равен:

$$U_4 \cong \left[\frac{1{,}5\,(a_{24} + a_{34})}{a_{11} - a_{12}} - \frac{3a_{12}\,(a_{14} + a_{24} + a_{34})}{(a_{11} - a_{12})\,(a_{11} + 2a_{12})}\right] \frac{U}{\sqrt{3}} =$$

$$= \left[\frac{1{,}5\,(0{,}295 + 0{,}405)}{15{,}16 - 2{,}835} - \frac{3 \cdot 2{,}835\,(0{,}224 + 0{,}295 + 0{,}405)}{(15{,}16 - 2{,}835)\,(15{,}16 + 5{,}67)}\right] \frac{100}{\sqrt{3}} =$$

$$= (0{,}0852 - 0{,}0305)\,57{,}7 = 3{,}16 \text{ kV}.$$

Заметим, что обычно пользуются более простой, но менее точной формулой:

$$U_4 \cong \frac{3aU}{\sqrt{3}\,(a_{11} + 2a_{12})} = \frac{3 \cdot 0{,}308 \cdot 100}{\sqrt{3}\,(15{,}16 + 5{,}67)} = 2{,}56 \text{ kV}.$$

$$\left(a = \frac{a_{14} + a_{24} + a_{34}}{3}\right).$$

Мы видим, что ошибка равна 19%. При большем расстоянии между линией передачи и линией связи ошибка уменьшается.

№ 314. Трехфазная линия передачи на 120 kV идет параллельно однопроводной телефонной линии на расстоянии 150 m от последней. Провода линии передачи расположены в горизонтальной плоскости на расстоянии 3,6 m друг от друга. Диаметр проводов 12,6 mm, высота от земли — 7 m. Высота от земли провода телефонной линии — 6 m. Найти потенциал, индуктированный на телефонной линии при нормальном режиме и при замыкании на землю одной из фаз линии передачи. Нейтраль трансформаторов не заземлена.

№ 315. Трехфазная линия передачи на 220 kV имеет провода, расположенные в одной горизонтальной плоскости на расстоянии 7 m. Диаметр проводов — 25 mm, высота их над землей—8,5 m. Определить, на каком расстоянии должна быть проложена телефонная линия, идущая параллельно линии передачи на высоте 5 m, для того, чтобы индуктируемый в ней потенциал при замыкании на землю одного из проводов линии передачи не превзошел 125 V. Нейтраль трансформаторов не заземлена.

№ 316. Определить потенциал, индуктируемый трехфазной линией передачи на проводе телефонной линии, подвешенной на тех же опорах, что и линия передачи. Провода линии передачи расположены на расстоянии 3,5 m друг от друга, имеют диаметр 14,2 mm и подвешены на высоте 7 m от земли. Телефонный провод подвешен на расстоянии 2,1 m от оси линии и на высоте 5,5 m от земли. Линия передачи работает при напряжении 110 kV в нормальном режиме.

№ 317. Линия передачи на 150 kV идет параллельно с линией связи на расстоянии 85 m. Линия передачи имеет провода, расположенные, как показано на рис. 54. Диаметр проводов — 17,0 mm. Линия связи подвешена на высоте 5 m. Определить потенциал, индуктируемый на линии связи при аварийном режиме линии передачи, предполагая, что обе линии проложены в лесу. Нейтраль трансформаторов не заземлена.

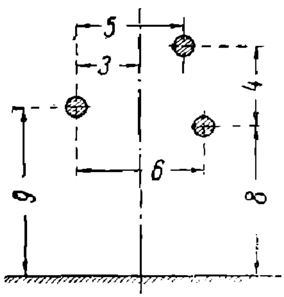

Рис. 54.

Примечание. Наличие деревьев, близких к линии передачи, снижает индуктированный потенциал на 30%. Такое же снижение получается при наличии деревьев вблизи линии связи.

За потенциальные коэфициенты a_{11} и a_{12} следует взять средние для всех трех проводов.

№ 318. Трехфазная линия передачи на 115 kV имеет провода диаметром 12,6 mm, расположенные в горизонтальной плоскости на расстоянии 3,2 m, и снабжена двумя заземленными тросами. Параллельно ей на расстоянии 130 m идет линия связи, подвешенная на высоте 6 m и имеющая 6 проводов. Определить наибольший потенциал, который может быть индуктирован на каждом проводе линии связи, предполагая высоту подвеса линии передачи равной 7,5 m. Нейтраль трансформаторов не заземлена.

Примечание. Наличие на линии передачи двух заземленных тросов уменьшает индуктированный потенциал на 25%. Если линия связи имеет несколько проводов, то индуктированный потенциал изменяется в отношении $\frac{4}{z+3}$, где z — число проводов.

№ 319. Трехфазная линия передачи на 100 kV имеет провода диаметром 12,6 mm, расположенные в горизонтальной плоскости на расстоянии 3,2 m и подвешенные на высоте 7,5 m. Параллельно ей на расстоянии 75 m идет двухпроводная линия связи, подвешенная на высоте 6 m. Определить разность потенциалов между проводами линии связи при нормальном режиме работы линии передачи, предполагая расстояние между проводами линии связи равным 60 m.

Примечание. Воспользоваться указанием, данным в примечании к предыдущей задаче.

№ 320. Определить потенциал, индуктированный трехфазной линией передачи на 115 kV с заземленной нейтралью на телефонной линии, подвешенной на высоте 5 m и расположенной на расстоянии 120 m от линии передачи. Провода линии передачи расположены в горизонтальной плоскости на высоте 7,5 m и на расстоянии 4 m друг от друга. Диаметр их 11,7 mm. Линия передачи работает в аварийном режиме.

Примечание. На потенциал при нормальном режиме заземление нейтрали не влияет. При аварийном режиме заземление нейтрали уменьшает индуктированный потенциал приблизительно в 3 раза.

№ 321. Трехфазная линия на 35 kV идет параллельно телефонной линии на расстоянии 60 m от последней, причем длина параллельного пробега равна 12 km. Провода трехфазной линии расположены равносторонним треугольником со сторонами по 2,5 m, одна сторона которого (ближайшая к линии связи) нормальна к поверхности земли. Диаметр проводов линии передачи — 8,3 mm, высота нижнего провода над землей — 7 m. Высота телефонной линии — 5 m, диаметр провода — 5 mm. Определить индуктированный в линии связи ток при замыкании на землю одной из фаз линии передачи, предполагая, что линия связи соединена с землей через телефонный аппарат. Нейтраль линии передачи не заземлена.

Примечание. Ток может быть определен из равенства

$$i_4 = \frac{j\omega l U_4}{9 \cdot 10^6 \cdot a_{44}},$$

где ω — угловая частота линии передачи, l — длина параллельного пробега линий в km и U_4 — напряжение провода связи в вольтах.

№ 322. Линия передачи имеет провода диаметром 12,6 mm, подвешенные на высоте 7 m и расположенные на расстоянии 4 m в горизонтальной плоскости. На участке в 15 km параллельно ей идет телефонная линия с 6 проводами, средняя высота которых — 5,6 m, а диаметр — 6 mm. Определить ток, индуктированный в одном из телефонных проводов семнадцатой гармоникой напряжения, предполагая, что она составляет 0,6% от основной волны и считая провод на конце заземленным. Расстояние между линиями — 80 m, напряжение линии передачи — 115 kV.

№ 323. Решить предыдущую задачу при условии, что обе линии идут параллельно на участке 5 km, на следующем участке в 5 km линия связи отходит от линии передачи на расстояние 160 m и далее обе линии снова идут параллельно на участке в 5 km.

Примечание. При „косом сближении" влияние можно рассчитывать, пользуясь средним геометрическим расстоянием между линиями, определяемым как корень квадратный из произведения наименьшего и наибольшего расстояния.

№ 324. Линия передачи на 35 kV имеет провода диаметром 9,9 mm, расположенные горизонтально на расстоянии 3 m друг от друга и подвешенные на высоте 7,7 m от земли. Параллельно ей на расстоянии 45 m идет двухпроводная телефонная линия с проводами диаметром 4 mm, подвешенными на высоте 6 m. Определить ток, проходящий через телефон, если длина сближения 7 kV и одна из фаз линии передачи заземлена. Расстояние между проводами телефонной линии — 0,6 m.

Примечание. Ток через телефон в этом случае определяется равенством

$$i_{45}=\frac{\omega U l h_4 S_{45}}{3{,}6\cdot 10^7 (a_{44}+a_{55}-2a_{45})(S_{14}{}^2+h_1{}^2+h_4{}^2)},$$

где U — линейное напряжение линии передачи и S_{14} — расстояние между осями линий.

№ 325. Определить ток, через телефон двухпроводной телефонной линии с проводами диаметром 6 mm, подвешенными на высоте 5 m, идущей на расстоянии 92 m от линии передачи на 220 kV, имеющей провода диаметром 27,8 mm, расположенные в горизонтальной плоскости на расстоянии 6,5 m и подвешенные на высоте 9 m. Длина сближения — 15 km, расстояние между проводами телефонной линии — 50 cm. Линия работает при нормальном режиме.

№ 326. Найти разность напряжений, индуктированных в телефонном проводе линией передачи при наличии и отсутствии заземленного троса.

Решение. Будем решать задачу приближенно, предполагая, что потенциальные коэфициенты всех трех проводов (1, 2, 3) и троса (4) одинаковы. Общее решение задачи при отсутствии троса имеет следующий вид:

$$U_5=\frac{a_{15}U_1+a_{25}U_2+a_{35}U_3}{a_{11}-a_{12}}-\frac{3U_0a_{12}(a_{15}+a_{25}+a_{35})}{(a_{11}-a_{12})(a_{11}+2a_{12})},$$

где

$$U_0=\frac{1}{3}(U_1+U_2+U_3).$$

При наличии троса для определения индуктированного напряжения в телефонном проводе U_5 воспользуемся уравнениями Максвелла.

$$U_1 = a_{11}q_1 + a_{12}q_2 + a_{13}q_3 + a_{14}q_4 + a_{15}q_5,$$

$$\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots$$

$$U_5 = a_{15}q_1 + a_{25}q_2 + a_{35}q_3 + a_{45}q_4 + a_{55}q_5.$$

Заряд q_5 очень мал по сравнению с зарядами $q_1 \dots q_4$, и мы можем пренебречь им в этих уравнениях. Принимая во внимание, что по нашему допущению

$$a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44},$$

$$a_{12} = a_{13} = a_{23} = a_{14} = a_{24} = a_{34},$$

мы можем переписать первые 4 уравнения в следующем виде:

$$U_1 = a_{11}q_1 + a_{12}(q_2 + q_3 + q_4),$$

$$U_2 = a_{11}q_2 + a_{12}(q_1 + q_3 + q_4),$$

$$U_3 = a_{11}q_3 + a_{12}(q_1 + q_2 + q_4),$$

$$U_4 = a_{11}q_4 + a_{12}(q_1 + q_2 + q_3) = 0.$$

Складывая эти уравнения, получим:

$$U_1 + U_2 + U_3 = a_{11}(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) + 3a_{12}(q_1 + q_2 + q_3 + q_4) =$$

$$= (a_{11} + 3a_{12})(q_1 + q_2 + q_3 + q_4).$$

Отсюда

$$q_1 + q_2 + q_3 + q_4 = \frac{U_1 + U_2 + U_3}{a_{11} + 3a_{12}} = \frac{3U_0}{a_{11} + 3a_{12}}$$

Определим из этого равенства сумму $(q_2 + q_3 + q_4)$ и подставим ее в первое из уравнений Максвелла:

$$U_1 = a_{11}q_1 + \frac{3U_0a_{12}}{a_{11} + 3a_{12}} - a_{12}q_1 = (a_{11} - a_{12})q_1 + \frac{3U_0a_{12}}{a_{11} + 3a_{12}}$$

Отсюда найдем q_1:

$$q_1 = \frac{U_1}{a_{11} - a_{12}} - \frac{3U_0a_{12}}{(a_{11} - a_{12})(a_{11} + 3a_{12})}$$

Подобным же образом найдем q_2, q_3 и q_4:

$$q_2 = \frac{U_2}{a_{11} - a_{12}} - \frac{3U_0a_{12}}{(a_{11} - a_{12})(a_{11} + 3a_{12})},$$

$$q_3 = \frac{U_3}{a_{11} - a_{12}} - \frac{3U_0a_{12}}{(a_{11} - a_{12})(a_{11} + 3a_{12})},$$

$$q_4 = \frac{U_4}{a_{11} - a_{12}} - \frac{3U_0a_{12}}{(a_{11} - a_{12})(a_{11} + 3a_{12})} = \frac{3U_0a_{12}}{(a_{11} - a_{12})(a_{11} + 3a_{12})}$$

Подставляя эти значения в последнее из уравнений Максвелла, мы получим:

$$U_5' = \frac{a_{15}U_1 + a_{25}U_2 + a_{35}U_3}{a_{11} - a_{12}} - \frac{3U_0a_{12}(a_{15} + a_{25} + a_{35} + a_{45})}{(a_{11} - a_{12})(a_{11} + 3a_{12})}$$

Вычитая U_5' из U_5, получим:

$$U_5 - U_5' = \frac{3U_0 a_{12}}{a_{11} - a_{12}} \left(\frac{a_{15} + a_{25} + a_{45} + a_{45}}{a_{11} + 3a_{12}} - \frac{a_{15} + a_{25} + a_{35}}{a_{11} + 2a_{12}} \right).$$

Не трудно выяснить, что эта разность положительна. Мы можем положить:

$$a_{15} \cong a_{25} \cong a_{35} \cong a_{45}.$$

Тогда

$$U_5 - U_5' \cong \frac{3U_0 a_{12}}{a_{11} - a_{12}} \left[\frac{4a_{15}a_{11} + 8a_{15}a_{12} - 3a_{15}a_{11} - 9a_{15}a_{12}}{(a_{11} + 3a_{12})(a_{11} + 2a_{12})} \right] =$$

$$= \frac{3U_0 a_{12} a_{15}}{a_{11} - a_{12}} \left[\frac{a_{11} - a_{12}}{(a_{11} + 3a_{12})(a_{11} + 2a_{12})} \right] = \frac{3U_0 a_{12} a}{(a_{11} + 3a_{12})(a_{11} + 2a_{12})}$$

Таким образом, наличие троса уменьшает индуктированное на линии связи напряжение. Уменьшение тем больше, чем больше потенциал нулевой точки U_0. При симметричной системе напряжений ($U_0 = 0$) влияние троса (в пределах точности нашего расчета) обращается в нуль.

№ 327. Линия передачи на 154 kV имеет провода, расположенные на расстоянии 5 m в горизонтальной плоскости. Диаметр проводов 24,4 mm, высота их над землей — 8 m. Над проводами на стойках П-образных опор расположены 2 троса диаметром 12,6 mm, высота которых над землей 13 m. Определить напряжение, индуктированное этой линией в телефонной линии, расположенной на расстоянии 100 m от линии передачи и подвешенной на высоте 5 m, предполагая, что нейтраль системы не заземлена и что на линии произошло замыкание на землю одной из фаз.

№ 328. Трехфазная линия передачи идет на расстоянии 50 m от однопроводной телефонной линии на участке в 5 km. Провода линии передачи расположены горизонтально на расстоянии 4 m и на высоте 8 m. Высота подвеса телефонного провода — 5 m. Найти напряжение, индуктированное в телефонном проводе при замыкании на землю фазы, ближайшей к нему, если амплитуда тока в фазах 1 и 2 равна 300 A, а в фазе 3 — 1800 A.

Решение. Индуктированная электромагнитным путем ЭДС в проводе телефонной линии определяется равенством

$$U_4 = -j\omega l (M_{14} I_1 + M_{24} I_2 + M_{34} I_3),$$

где M_{14}, M_{24} и M_{34} — коэфициенты взаимной индукции проводов линии передачи и линии связи, а I_1, I_2 и I_3 — токи в фазах линии передачи. Коэфициенты взаимной индукции M_{14} и M_{24} вычисляются по уравнениям:

$$M_{14} = \frac{2}{10^4} \left(\ln \frac{2l}{S_{14}} - 1 \right) = \frac{2}{10^4} \left(\ln \frac{10\,000}{54{,}09} - 1 \right) = 8{,}42\ 10^{-4}\ \mathrm{H/km},$$

$$M_{24} = \frac{2}{10^4} \left(\ln \frac{2l}{S_{24}} - 1 \right) = \frac{2}{10^4} \left(\ln \frac{10\,000}{50{,}09} - 1 \right) = 8{,}58\ 10^{-4}\ \mathrm{H/km}.$$

Коэфициент взаимной индукции для фазы, замкнувшейся на землю, вычисляется по очень сложным формулам, данным Майром, Оллендорфом и Карсоном. Эти формулы достаточно хорошо могут быть представлены следующей приближенной формулой:

$$M_{34} = 1{,}9 \quad 10^{-4} \ln \frac{1800}{S} \quad \text{H/km}.$$

Определяя по этой формуле коэфициент взаимной индукции для третьей фазы, получим:

$$M_{34} = 1{,}9 \quad 10^{-4} \ln \frac{1800}{46{,}09} = 6{,}96 \quad 10^{-4} \text{ H/km}.$$

Обозначим

$$\frac{I_{3m}}{I_{1m}} = k = \frac{1800}{300} = 6.$$

Тогда

$$U_4 = -j\omega l (M_{14}I + M_{24}I_2 + M_{34}I_3) =$$
$$= -I\omega l(M_{14}I_1 + M_{24}a^2I_1 + M_{34}akI_1) =$$
$$= -j\omega lI_1 \left[M_{14} + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)M_{24} + k\left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right)M_{34}\right] =$$
$$= -j\omega lI_1 \left[M_{14} - \frac{1}{2}\left(M_{24} + kM_{34}\right) + j\frac{\sqrt{3}}{2}\left(M_{24} - kM_{34}\right)\right].$$

Модуль этого напряжения будет равен

$$|U_4| = \omega lI_1 \sqrt{M_{14}^2 - M_{14}M_{24} - kM_{14}M_{34} + \frac{1}{2}kM_{24}M_{34} + \frac{1}{4}M_{24}^2 + \frac{1}{4}k^2M_{34}^2 + \frac{3}{4}M_{24}^2 + \frac{3}{4}k^2M_{34}^2 - \frac{3}{2}kM_{24}M_{34}} =$$
$$= \omega lI_1\sqrt{M_{14}^2 + M_{24}^2 + k^2M_{34}^2 - M_{14}M_{24} - kM_{14}M_{34} - kM_{24}M_{34}} =$$
$$= \frac{314 \cdot 5 \cdot 300}{10^4}\sqrt{8{,}42^2 + 8{,}58^2 + 36 \cdot 6{,}96^2 - 8{,}42 \quad 8{,}58 - 6 \cdot 8{,}42 \cdot 6{,}96 - 6 \quad 8{,}58 \quad 6{,}96} = 1559 \ V_{max}.$$

Заметим, что эту задачу можно решить весьма просто приближенным способом. Положим, что

$$M_{14} \cong M_{24} \cong M_{34} = M_k = 6{,}96 \cdot 10^{-4}.$$

Тогда

$$U_4 = -j\omega lI_1 \left[M_{14} - \frac{1}{2}\left(M_{24} + kM_{34}\right) + j\frac{\sqrt{3}}{2}\left(M_{24} - kM_{34}\right)\right] \cong$$
$$\cong -j\omega lI_1 \left[\frac{1}{2}M_k(1-k) + j\frac{\sqrt{3}}{2}M_k(1-k)\right] =$$
$$= -j\omega lI_1 \frac{M_k(1-k)}{2}(1 + j\sqrt{3}) = \omega lI_1 \frac{M_k(k-1)}{2}(j - \sqrt{3}).$$

$$|U_4| = \frac{1}{2}\,\omega l I_1 M_k (k-1)\quad \sqrt{1+3} = \omega l I_1 M_k (k-1) =$$

$$= 314 \cdot 5 \cdot 300 \cdot 6{,}96 \cdot 10^{-4}\quad 5 = 1\,597\ V_{max}.$$

Расхождение с точным расчетом составляет около $2{,}5\%$.

№ 329. Определить напряжение, индуктированное в однопроводной телефонной линии трехфазной линией передачи в случае однофазного замыкания на землю одной из фаз последней. Заданы токи в проводах линии передачи $I_1 = 250e^{j\omega t}$ A, $I_2 = 250e^{j\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)}$ A и $I_3 = 1250e^{j\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right)}$ A, и коэфициенты взаимной индукции $lM_{14} = 0{,}01823$ H, $lM_{24} = 0{,}01837$ H и $lM_{34} = 0{,}01496$ H.

№ 330. На какой длине можно допустить параллельное сближение линии передачи и телефонной линии, чтобы индуктированное напряжение в телефонной линии не превысило 300 V_m, если нормальный ток линии передачи $I = 200$ A, ток однофазного короткого замыкания $I_k = 700$ A и расстояние между линиями 600 m?

> Примечание. Решить задачу, пользуясь приближенной формулой, данной в задаче № 328.

№ 331. На какое расстояние нужно отнести телефонную линию от линии передачи для того, чтобы индуктированное на первой напряжение не превзошло 300 V_m, если длина параллельного сближения линии 4 km, нормальный ток линии передачи — 420 A, а ток однофазного короткого замыкания — 860 A?

XI. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ КАБЕЛЬ.

№ 332. Найти емкость и индуктивность 1 km кабеля типа ОСБ, если жила кабеля имеет сечение 150 mm², толщина изоляции—10 mm, толщина свинца — 2,5 mm и диэлектрическая постоянная изоляции — 3,6.

> Примечание. Кабель типа ОСБ имеет свинцовую оболочку поверх изоляции каждой жилы, но не имеет общей свинцовой оболочки. При решении можно воспользоваться формулами гл. I для определения емкости. Индуктивность кабеля определяется уравнением:
>
> $$L = \left(2\ln\frac{S}{r} + 0{,}5\right)10^{-4}\ \frac{\text{H}}{\text{km}}.$$

№ 333. Найти емкость и индуктивность 1 km кабеля типа ОСБ, если жила кабеля имеет сечение 70 mm^2, толщина изоляции 9 mm, толщина свинца — 2 mm и диэлектрическая постоянная изоляции 3,4.

№ 334. Найти емкость и индуктивность 1 km кабеля типа Н, если жила кабеля имеет сечение 120 mm^2, толщина изоляции 13 mm и диэлектрическая постоянная изоляции 3,5.

№ 335. Определить емкость и индуктивность 1 km кабеля нормальной конструкции, если жила кабеля имеет сечение 25 mm^2, толщина изоляции жилы 3 mm и диэлектрическая постоянная изоляции $\varepsilon = 3{,}6$.

Решение. Емкость кабеля нормальной конструкции можно выразить формулой

$$C \cong \frac{0{,}0555\varepsilon}{\ln \dfrac{\sqrt{3}\,a\,(R^2 - a^2)}{r\sqrt{a^4 + a^2R^2 + R^4}}}\ \frac{\mu F}{km},$$

где ε — диэлектрическая постоянная,

r — радиус жилы кабеля,

R — внутренний радиус свинцовой оболочки,

a — расстояние от центра кабеля до центра жилы.

Эту формулу можно значительно упростить, выразив R и a через толщину фазовой изоляции s и радиус жилы r, в случае, когда толщины фазовой и поясной изоляции одинаковы:

$$C \cong \frac{0{,}0555\,\varepsilon}{\ln\left(1{,}263 + 1{,}732\,\dfrac{s}{r}\right)}\ \frac{\mu F}{km}.$$

Подставляя значения ε, s и r, получим

$$C = \frac{0{,}0555 \cdot 3{,}6}{\ln\left(1{,}263 + 1{,}732\,\dfrac{3}{3{,}2}\right)} = 0{,}1887\ \frac{\mu F}{km}.$$

Индуктивность кабеля выражается формулой:

$$L = \left(2\ln\frac{S}{r} + 0{,}5\right)10^{-4}\ \frac{H}{km},$$

где S — расстояние между жилами.

Так как

$$S = d + 2s = 6{,}4 + 6 = 12{,}4\ \text{mm},$$

то

$$L = \left(2\ln\frac{12{,}4}{3{,}2} + 0{,}5\right)10^{-4} = 3{,}20\quad 10^{-4}\ \frac{H}{km}.$$

№ 336. Определить емкость и индуктивность 1 km кабеля нормальной конструкции, если жила кабеля имеет сечение 95 mm^2, толщина изоляции жилы 5,5 mm и диэлектрическая постоянная изоляции 3,5.

№ 337. Определить емкость и индуктивность 1 km кабеля нормальной конструкции, имеющего жилы, сечением по 185 mm^2, толщину изоляции жил 3 mm и диэлектрическую постоянную 3.45.

№ 338. Найти емкость и индуктивность 1 km кабельной линии на 115 kV, состоящей из 3 одножильных кабелей, проложенных рядом на расстоянии 15 cm. Диаметр жил кабеля — 2,4 cm, толщина изоляции — 15 mm, диэлектрическая постоянная — 3,6.

Примечание. При расположении жил кабеля в одной плоскости их емкость и индуктивность могут быть определены по формулам:

$$C_1 = \frac{3A_1}{\Delta} = \frac{6\ \ln\frac{S_{23}}{r}}{\Delta\cdot 9\cdot 10^{11}}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{km}},$$

$$C_2 = \frac{3A_2}{\Delta} = \frac{6\ \ln\frac{S_{31}}{r}}{\Delta\cdot 9\cdot 10^{11}}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{km}},$$

$$C_3 = \frac{3A_3}{\Delta} = \frac{6\ \ln\frac{S_{12}}{r}}{\Delta\cdot 9\cdot 10^{11}}\ \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{km}},$$

где $\Delta = 4A_1A_2 - (A_1 + A_2 - A_3)^2$.

Если $S_{12} = S_{23}$, то $A_1 = A_3$, $\Delta = A_2(4A_1 - A_2)$ и $C_1 = C_3$.

$$L_1 = \left(2\ln\frac{\sqrt{S_{12}S_{13}}}{r} + 0{,}5\right)\cdot 10^{-4}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{km}},$$

$$L_2 = \left(2\ln\frac{\sqrt{S_{23}S_{21}}}{r} + 0{,}5\right)\ 10^{-4}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{km}},$$

$$L_3 = \left(2\ln\frac{\sqrt{S_{13}S_{23}}}{r} + 0{,}5\right)\ 10^{-4}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{km}}.$$

Если $S_{12} = S_{23}$, то $L_1 = L_3$.

№ 339. Найти емкость и индуктивность 1 km кабеля ленинградской 35-kV сети (тип ССБ), зная диаметр жилы — 15,3 mm, толщину изоляции — 10 mm, толщину свинца — 2,5 mm и диэлектрическую постоянную изоляции — 3,5.

№ 340. Определить емкость и индуктивность 1 km кабельной линии на 220 kV, состоящей из трех одножильных кабелей, имеющих диаметр жилы 36 mm, толщину изоляции 19 mm, диэлектрическую постоянную 3,4 и расположенных на расстоянии 15 cm один от другого в горизонтальной плоскости.

№ 341. Кабель с масляным наполнением проложен в городе с холмистой поверхностью, причем наибольшая разность уровней прокладки кабеля составляет 40 m. Расширительный бак дает добавочное давление в 1 at. Определить толщину свинцовой оболочки, если наружный диаметр изоляции кабеля — 47 mm, а допускаемое напряжение для свинца — 0,2 kG/mm². Удельный вес масла — 0,9.

Примечание. Расчет ведется, как для трубы, подверженной внутреннему давлению.

№ 342. Найти разность уровней, с которой может быть проложен маслонаполненный кабель, имеющий наружный диаметр 42 mm и толщину свинца 3,5 mm, предполагая давление в расширительном баке равным 0,5 at.

№ 343. Найти диэлектрические потери в кабеле типа ОСБ на 35 kV, зная диаметр жилы — 15,9 mm, толщину изоляции 12 mm, угол потерь $\delta = 0{,}008$ и диэлектрическую постоянную 3,65.

Примечание. Потери в одной жиле кабеля равны

$$P = \frac{1}{3}\,\omega U^2 C \operatorname{tg}\delta \quad 10^{-5}\ \mathrm{W/cm},$$

где U — в вольтах и C = в фарадах на km.

№ 344. Определить диэлектрические потери в однофазном маслонаполненном кабеле на 220 kV, имеющем жилу диаметром 18,3 mm, толщину изоляции 24 mm, диэлектрическую постоянную 3,35 и угол потерь $\delta = 0{,}004$.

№ 345. Определить диэлектрические потери в маслонаполненном подводном кабеле на 115 kV, имеющем жилу диаметром 42 mm, толщину изоляции 15 mm, диэлектрическую постоянную 3,5 и угол потерь 0,0027.

№ 346. Найти тепловое сопротивление S_1 кабеля нормальной конструкции на 6,6 kV, имеющего сечение 95 mm², толщину фазовой изоляции — $s = 4$ mm и толщину поясной изоляции — $s_0 = 4$ mm, предполагая удельное тепловое сопротивление изоляции равным $k_1 = 520$ tΩcm.

Примечание. Воспользоваться формулой Саймонса:

$$S_1 = 0{,}128 k_1 \lg\left(6{,}1\,\frac{s + s_0}{d} + 1\right),$$

где d — диаметр жилы кабеля.

№ 347. Найти тепловое сопротивление S_1 кабеля нормальной конструкции на 20 kV, имеющего сечение жил 95 mm², толщину фазовой изоляции $s = 9$ mm и толщину поясной изоляции $s_0 = 9$ mm, предполагая удельное тепловое сопротивление изоляции равным $k_1 = 550$ tΩcm.

№ 348. Определить тепловое сопротивление кабеля типа ОСБ, имеющего жилы диаметром 14,2 mm, толщину изоляции — 12,5 mm, толщину свинца — 2,5 mm и толщину защитных оболочек — 6 mm. Удельное тепловое сопротивление изоляции равно $k_1 = 550$ tΩcm, удельное тепловое сопротивление свинца $k_4 = 2,9$ tΩcm, удельное тепловое сопротивление защитных оболочек $k_2 = 300$ tΩcm.

Решение. Тепловое сопротивление кабеля типа ОСБ от жил до защитной оболочки может быть определено по формуле Саймонса, которая имеет вид:

$$S_1 = \frac{1}{6}\left[\frac{\sqrt{k_1 k_4 R \ln \frac{R}{r}}}{\sqrt{t}\ th\left(\varphi\sqrt{\frac{k_4 R}{k_1 t \ln \frac{R}{r}}}\right)} + \frac{\pi - \varphi}{\pi} \cdot \frac{k_1}{\pi} \ln \frac{R}{r}\right]$$

Здесь R — внутренний радиус свинцовой оболочки, r — радиус проводящей жилы, t — толщина свинца и $2(\pi - \varphi)$ — угол касания экрана с защитными оболочками. Значения k_1 и k_4 даны в условии задачи. Угол φ обычно принимают $165° = 0,917\,\pi$.

Внутренний радиус свинцовой оболочки равен

$$R = \frac{14,2}{2} + 12,5 = 19,6 \text{ mm}.$$

Подставляя численные значения входящих в формулу Саймонса величин, получим:

$$S_1 = \frac{1}{6}\left[\frac{\sqrt{550 \cdot 2,9 \cdot 1,96 \ln \frac{1,96}{0,71}}}{\sqrt{0,25} \cdot \text{th}\left(0,917\pi\sqrt{\frac{2,9 \cdot 1,96}{550 \cdot 0,25 \ln \frac{1,96}{0,71}}}\right)} + \right.$$

$$\left. + 0,083\ \frac{550}{\pi} \ln \frac{1,96}{0,71}\right] =$$

$$= \frac{1}{6}\left[\frac{112,6}{\text{th}\,0,581} + 14,74\right] = 38,3\ \text{t}\Omega.$$

Тепловое сопротивление защитных оболочек определяется уравнением:

$$S_2 = \frac{k_2}{2\pi} \ln \frac{R_3}{R_2},$$

где R_2 и R_3 — внутренний и наружный радиусы защитных оболочек. Первый мы определим следующим образом:

$$R_2 = r + s + t + \frac{2}{\sqrt{3}}(r + s + t) = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\right)(r + s + t),$$

где s — толщина изоляции.

Подставляя значения r, s и t, получим:

$$R_2 = \left(1 + \frac{2}{\sqrt{3}}\right)(0{,}71 + 1{,}25 + 0{,}25) = 4{,}76 \text{ cm}.$$

Далее найдем R_3:

$$R_3 = 4{,}76 + 0{,}6 = 5{,}36 \text{ cm}.$$

Тепловое сопротивление S_2 будет теперь равно:

$$S_2 = \frac{300}{2\pi} \ln \frac{5{,}36}{4{,}76} = 5{,}66 \text{ t}\Omega.$$

Полное тепловое сопротивление кабеля равно:

$$S = S_1 + S_2 = 38{,}3 + 5{,}66 = 43{,}96 \text{ t}\Omega.$$

№ 349. Определить полное тепловое сопротивление кабеля типа H, имеющего жилы диаметром 12,6 mm, толщину изоляции 7 mm, толщину экрана 0,05 mm, толщину свинца 2,7 mm и толщину защитных оболочек 5 mm. Удельное тепловое сопротивление изоляции $k_1 = 530$ tΩcm, экрана — $k_4 = 0{,}23$ tΩcm, защитных оболочек — $k_2 = 300$ tΩcm.

Примечание. Кабель типа H имеет тонкую металлическую ленту, навитую поверх изоляции каждой жилы, и общую свинцовую оболочку. При решении задачи тепловым сопротивлением свинцовой оболочки можно пренебречь.

№ 350. Определить тепловое сопротивление однофазного кабеля маслонаполненного типа, у которого диаметр жилы равен 22 mm, толщина изоляции — 1,8 cm, толщина свинца — 4 mm и толщина защитных оболочек — 4 mm. Удельное тепловое сопротивление изоляции равно $k_1 = 400$ tΩcm, защитных оболочек — $k_2 = 300$ tΩcm.

Примечание. Для однофазного кабеля тепловое сопротивление определяется равенством

$$S_1 = \frac{k_1}{2\pi} \ln \frac{R}{r}.$$

№ 351. Найти тепловое сопротивление окружающей среды для кабеля, имеющего наружный радиус $R_3 = 26$ mm, проложенного на глубине $h = 80$ cm в грунте, удельное тепловое сопротивление которого равно $k_3 = 150$ tΩcm.

Примечание. Тепловое сопротивление среды определяется равенством:

$$G = \frac{k_3}{3\pi} \ln \frac{2h}{R_3}.$$

№ 352. Найти тепловое сопротивление окружающей среды для кабеля, имеющего наружный диаметр 98 mm, проложенного на глубине 1 m в грунте, удельное сопротивление которого равно 120 tΩcm.

№ 353 Определить допускаемую нагрузку кабеля ленинградской 35-kV сети (тип ОСБ), имеющего сечение 120 mm² при диаметре жилы 15,3 mm, толщину изоляции 10 mm, толщину свинца — 2 mm и толщину защитных оболочек — 5 mm. Тепловое сопротивление изоляции равно $k_1 = 550$ tΩcm, свинца — $k_4 = 2{,}9$ tΩcm, грунта — $k_3 = 120$ tΩcm. Диэлектрическими потерями можно пренебречь.

Решение. Допускаемый ток нагрузки кабеля определяется уравнением:

$$I = \sqrt{\frac{T_1}{nR_c(1+\alpha T_2)(S_1+S_2+G) + R_p(S_2+G)\dfrac{\omega^2L^2}{\omega^2L^2+R_p^2}}}$$

Здесь T_1 — разность между температурой токоведущей жилы и температурой окружающей среды, которую мы можем принять равной

$$T_1 = 50° - 15° = 35°;$$

n — число фаз, равное 3;

R_c — сопротивление 1 cm токоведущей жилы, равное

$$R_c = \frac{17{,}60}{120}\ 10^{-5} = 1{,}465 \cdot 10^{-6}\ \Omega;$$

α — термический коэфициент сопротивления меди, равный 0,0043;

T_2 — разность между температурой жилы и 20°, т. е.

$$T_2 = 50° - 20° = 30°;$$

S_1 — тепловое сопротивление изоляции жилы кабеля;

S_2 — тепловое сопротивление защитных оболочек кабеля;

G — тепловое сопротивление грунта;

R_p — сопротивление 1 cm свинцовой оболочки;

ω — угловая частота тока, равная 314;

L — индуктивность свинцовой оболочки кабеля.

Определим тепловые сопротивления S_1, S_2 и G.

$$S_1 = \frac{1}{6}\left[\frac{\sqrt{k_1 k_4 R \ln \frac{R}{r}}}{\sqrt{t}\ \operatorname{th}\left(\varphi \sqrt{\frac{k_4 R}{k_1 t \operatorname{th} \frac{R}{r}}}\right)} + \frac{\pi - \varphi}{\pi} \cdot \frac{k_1}{\pi} \ln \frac{R}{r}\right] =$$

$$= \frac{1}{6}\left[\frac{\sqrt{550 \cdot 2{,}9 \cdot 1{,}765 \cdot \ln \frac{1{,}765}{0{,}765}}}{\sqrt{0{,}2} \cdot \ln\left(2{,}88 \cdot \sqrt{\frac{2{,}9 \cdot 1{,}765}{550 \cdot 0{,}2 \ln \frac{1{,}765}{0{,}765}}}\right)} + \right.$$

$$\left. + \frac{(1 - 0{,}917) \cdot 550}{\pi} \ln \frac{1{,}765}{0{,}765}\right] =$$

$$= \frac{1}{6}\left(\frac{108{,}5}{\operatorname{th} 0{,}678} + 12{,}18\right) = 32{,}7\ \text{t}\Omega.$$

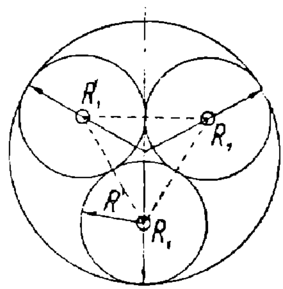

Рис. 55.

Далее,

$$S_2 = \frac{k_2}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}.$$

В этой формуле величину k_2 — тепловое сопротивление защитных оболочек — обычно принимают равным 300. Радиус R_1 представляет собою радиус окружности, описанной около свинцовых оболочек всех трех жил кабеля. Как видно из рис. 55, он равен

$$R_1 = R' + \frac{R'}{\cos 30^\circ} = R' \frac{2 + \sqrt{3}}{\sqrt{3}} = 2{,}155\,(R + 0{,}2) = 4{,}23\ \text{cm}.$$

Радиус R_2 превышает R_1 на толщину защитных оболочек:

$$R_2 = R_1 + 0{,}5 = 4{,}73\ \text{cm}.$$

Поэтому

$$S_2 = \frac{300}{2\pi} \ln \frac{4{,}73}{4{,}23} = 5{,}32\ \text{t}\Omega.$$

Тепловое сопротивление грунта равно

$$G = \frac{k_3}{3\pi} \ln \frac{2h}{k_2}.$$

Предполагая глубину зарытия кабеля равной $h = 100$ cm, получим

$$G = \frac{120}{3\pi} \ln \frac{200}{4{,}73} = 47{,}6 \ \text{t}\Omega.$$

Сопротивление свинцовой оболочки определим следующим образом:

$$R_p = \frac{\rho_p (1 + \alpha T_p)}{q} = \frac{20{,}4 \cdot 10^{-6} (1 + 0{,}004 \cdot 40)}{\pi \cdot 3{,}53 \cdot 0{,}2} = 10{,}67 \quad 10^{-6} \, \Omega$$

(предполагаем температуру свинца равной 40°).

Индуктивность свинцовой оболочки равна

$$L = 2 \ln \frac{S}{R'} 10^{-9} = 2 \ln \frac{2 \cdot 1{,}965}{1{,}965} \cdot 10^{-9} = 1{,}386 \quad 10^{-9} \, \text{H},$$

откуда

$$\omega L = 314 \quad 1{,}386 \cdot 10^{-9} = 0{,}435 \cdot 10^{-6} \, \Omega.$$

Теперь мы можем подставить определенные нами величины в формулу для I:

$$I = \sqrt{\frac{35}{3 \cdot 1{,}465 \cdot 10^{-6} (1 + 0{,}0043 \cdot 30)(32{,}7 + 5{,}32 + 47{,}6) + 10{,}67 \quad 10^{-6} (5{,}32 + 47{,}6) \frac{0{,}435^2}{10{,}67^2 + 0{,}435^2}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{35 \quad 10^6}{425 + 0{,}936}} = 286{,}5 \ \text{A}.$$

Из этого равенства мы, между прочим, видим, что в случае кабеля типа ОСБ потери в свинцовой оболочке играют весьма малую роль при установлении допустимого тока кабеля.

№ 354. Решить предыдущую задачу при условии, что температура почвы равна 0°, а удельное тепловое сопротивление грунта равно $k_3 = 180$ tΩcm.

№ 355. Определить допустимую нагрузку кабеля нормальной конструкции на 6 kV с жилами из меди с сечением 120 mm², ($r = 0{,}147$ Ω/km), имеющего фазовую изоляцию — 4 mm, поясную изоляцию — 4 mm, толщину свинца — 2 mm, толщину защитных оболочек — 6,5 mm. Дано: $k_1 = 500$ tΩcm, $k_2 = 300$ tΩcm, $k_3 = 150$ tΩcm, $h = 0{,}8$ m, $T_1 = 60°$, $T_2 = 55°$. Потерями в диэлектрике и в свинце можно пренебречь.

№ 356. Кабельная линия на 110 kV состоит из трех одножильных кабелей с масляным наполнением, проложенных на глубине 1,5 m на расстоянии 18 cm друг от друга. Сопротивление проводящей жилы кабеля равно 0,1435 Ω km, диаметр жилы — 22 mm, толщина изоляции — 18 mm, толщина свинца — 5 mm, толщина защитной оболочки — 3 mm. Удельные тепловые сопротивления равны: $k_1 = 500$ tΩcm, $k = 300$ tΩcm, $k_3 = 180$ tΩcm. Температура проводящей жилы — 50°, максимальная температура почвы — 20° Угол потерь в диэлектрике кабеля $\delta = 0{,}0059$, емкость кабеля $C = 0{,}21 \frac{\mu F}{km}$. Коэфициент снижения силы тока — 0,80. Определить максимальную мощность, которую можно передать по кабелю.

XII. ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ.

№ 357. Колебательный контур образован защитной катушкой самоиндукции в 5 mH и шинами подстанции, емкость которых относительно земли равна $23 \cdot 10^{-10}$ F. Найти частоту собственных колебаний этого контура.

Примечание. Частота собственных колебаний колебательного контура выражается уравнением:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

где L выражено в генри, а C — в фарадах.

№ 358. Катушка выключающего реле масляного выключателя имеет самоиндукцию 0,5 mH. Емкость ввода масляника равна 10^{-10} F. Найти частоту образуемого ими колебательного контура.

№ 359. Колебательный контур трансформатора Тесла имеет емкость $1{,}6 \cdot 10^{-9}$ F и самоиндукцию 0,5 mH. Определить частоту собственных колебаний контура.

№ 360. Трансформатор защищен катушкой самоиндукции $L = 5$ mH. Считая емкость трансформатора равной $2 \cdot 10^{-10}$ F, найти частоту, при которой произойдет резонанс между самоиндукцией катушки и емкостью трансформатора.

№ 361. Импульсная установка состоит из двух последовательно включенных конденсаторов емкостью по 5000 cm, разряжающихся на сопротивление в 1860 Ω. Выяснить характер разряда, предполагая, что соединительные провода имеют самоиндукцию в $1{,}57 \cdot 10^{-2}$ mH.

Примечание. Разряд становится апериодическим, если выполнено условие

$$R \geqslant 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

№ 362. На кабеле, выключенном из работы в течение длительного времени, сохраняется остаточный заряд. Чтобы дать стечь этому заряду, кабель замыкается на землю. Написать уравнение разряда кабеля и определить время, в течение которого амплитуда напряжения кабеля упадет до 5% ее начальной величины, зная постоянные кабеля: $r = 0{,}6\ \Omega$, $L = 0{,}69$ mH, $C = 0{,}85\ \mu$F, и предполагая, что кабель в данном случае можно заменить сосредоточенной емкостью.

Решение. Ток разряда конденсатора может быть выражен уравнением

$$i = Ie^{-\alpha t}\sin\omega t,$$

где

$$\alpha = \frac{r}{2L} \text{ и } \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}.$$

Напряжение на зажимах конденсатора в нашей цепи равно

$$U_c = \frac{1}{C}\int i\,dt = \frac{I}{C}\int e^{-\alpha t}\sin\omega t\,dt \cong$$

$$\cong I\sqrt{\frac{L}{C}}e^{-\alpha t}\cos(\omega t - \delta) = Ue^{-\alpha t}\cos(\omega t - \delta),$$

где

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\alpha}{\omega}.$$

Определим величины α и ω:

$$\alpha = \frac{r}{2L} = \frac{0{,}6}{2\cdot 0{,}69\cdot 10^{-3}} = \frac{300}{0{,}69} = 435,$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}} = \sqrt{\frac{1}{0{,}69\cdot 0{,}85\cdot 10^{-9}} - 435^2} \cong 4{,}13\cdot 10^4.$$

Поэтому

$$\operatorname{tg}\delta \cong \delta = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{435}{4{,}13\cdot 10^4} = 1{,}053\cdot 10^{-2}$$

Уравнение разряда кабеля получает вид:

$$U_c = Ue^{-435t}\cos(41\,300t - 1{,}053\cdot 10^{-2}).$$

По условиям задачи

$$\frac{U_{cm}}{U} \cong 0{,}05 \cong e^{-435t_1}.$$

Известно, что показательная функция уменьшается до 5% начальной величины, когда время $t_1 = 3T$, где T — постоянная времени. Поэтому

$$t_1 = 3\ \frac{1}{435} = 6{,}9\ \ 10^{-3}\ \text{sec}.$$

№ 363. Определить время, в течение которого амплитуда напряжения на кабеле упадет до 300 V, если кабель был заряжен до напряжения 30 kV и замкнут на землю. Постоянные кабеля: $r = 30\ \Omega$ и $L = 3{,}5 \cdot 10^{-4}$ H.

№ 364. Определить максимальное напряжение, получающееся при включении на напряжение $U = 45$ kV колебательного контура с постоянными $r = 38\ \Omega$, $L = 0{,}025$ H и $C = 1{,}8 \cdot 10^{-7}$ F.

Решение. Установившееся напряжение на конденсаторе будет равно U. Напряжение переходного режима выражается уравнением:

$$U'_c = -\frac{U}{\cos\delta} e^{-\alpha t} \cos(\omega t - \delta),$$

где

$$\alpha = \frac{r}{2L},$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\alpha}{\omega},$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}.$$

Поэтому полное напряжение на конденсаторе будет равно

$$U_c = U\left[1 - \frac{e^{-\alpha t}}{\cos\delta}\cos(\omega t - \delta)\right].$$

Максимальное напряжение будет достигнуто, когда

$$\cos(\omega t - \delta) = -1$$

или

$$\omega t - \delta = \pi.$$

Отсюда

$$t = \frac{\pi + \delta}{\omega}.$$

Определим δ и ω:

$$\alpha = \frac{38}{2 \cdot 2{,}5 \cdot 10^{-2}} = 760,$$

$$\omega \cong \sqrt{\frac{1}{2{,}5 \cdot 1{,}8 \cdot 10^{-9}}} = 1{,}49 \cdot 10^4,$$

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\alpha}{\omega} = \frac{760}{1{,}49 \cdot 10^4} = 0{,}051 \cong \delta.$$

Таким образом,

$$t = \frac{\pi + 0{,}051}{1{,}49 \cdot 10^4} = \frac{3{,}192}{1{,}49 \cdot 10^4} = 2{,}14 \cdot 10^{-4}\ \text{sec}.$$

Теперь мы можем определить напряжение U_c:

$$U_c = 45\left(1 + \frac{e^{-760t}}{\cos 0{,}051}\right) = 45\left(1 + \frac{e^{-0{,}1625}}{\cos 0{,}051}\right) = 83{,}4\ \text{kV}.$$

№ 365. Определить максимальное напряжение, получающееся при включении на напряжение $U = 28$ kV колебательного контура с постоянными $r = 33\ \Omega$, $L = 0{,}028$ H и $C = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ F.

№ 366. Определить максимальное напряжение, получающееся при включении на напряжение $U = 20$ kV колебательного контура с постоянными $r = 3{,}76\ \Omega$, $L = 0{,}03$ H и $C = 1{,}74 \cdot 10^{-7}$ F.

№ 367. Определить наибольшее напряжение, получающееся в колебательном контуре с постоянными $r = 20\ \Omega$, $L = 0{,}004$ H и $C = 1{,}7 \cdot 10^{-7}$ F, при включении его на напряжение $U = 100$ kV.

№ 368. Трансформатор, работавший в холостую, был выключен разъединителем, причем ток прервался в момент перехода его через максимум. Трансформатор имеет сопротивление $r = 0{,}22\ \Omega$, индуктивность $L = 4{,}8$ mH и ток холостого хода, равный $I_0 = 50$ A. Между разъединителем и трансформатором имеются шины с емкостью $C = 2{,}5 \cdot 10^{-9}$ F. Найти уравнение напряжения переходного режима.

Примечание. Воспользоваться решением задачи № 362 и принять во внимание, что зависимость между напряжением и током переходного режима выражается равенством:

$$U = I\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

№ 369. Шины соединены с трансформатором при помощи короткого кабеля, емкость которого равна $C = 0{,}045\ \mu$F. Индуктивность трансформатора равна $L = 7{,}5 \cdot 10^{-3}$ H, сопротивление цепи равно $3\ \Omega$. Найти уравнение свободных колебаний, которые появятся в цепи, если ее выключить. Напряжение в момент выключения равно нулю, а ток — 300 A_{max}. Емкостью шин пренебрегаем.

№ 370. Для защиты от перенапряжений на подстанции поставлен конденсатор, имеющий емкость $C = 0{,}1\ \mu$F. Трансформатор подстанции, индуктивность которого равна 12,5 H, а сопротивление $R = 6\ \Omega$, имеет заземленную нейтраль. Найти наибольшее напряжение, которое появится на конденсаторе при включении вынуждающего напряжения

$$U_s = 30 \sin 314t \text{ kV}.$$

Решение. Индуктивность трансформатора и емкость конденсатора образуют колебательный контур. При включении на него переменного напряжения, если затухание контура мало, как это имеет место в данном случае, процесс протекает по уравнению:

$$U_c = -\frac{U}{z\omega_s C}\Big[\sin(\omega_s t + \psi) - e^{-\alpha t}\sin\psi\cos\omega t - \\ - \frac{\omega_s}{\omega} e^{-\alpha t}\cos\psi\sin\omega t\Big].$$

где ω_s — угловая частота вынужденных колебаний, ψ — фазный угол напряжения, α — коэфициент затухания, ω — угловая частота собственных колебаний контура и z — полное сопротивление контура, равное

$$z = \sqrt{R^2 + \left(\omega_s L - \frac{1}{\omega_s C}\right)^2}$$

Фазный угол может принимать любые значения. Наиболее невыгодное с точки зрения величины получающегося напряжения значение его — $\psi = \frac{\pi}{2}$. При этом получим:

$$U_c = -\frac{U}{z\omega_s C}\left[\cos\omega_s t - e^{-\alpha t}\cos\omega t\right].$$

Определим входящие в это уравнение величины. По условию задачи $U = 30$ kV, $\omega_s = 314$, $C = 10^{-7}$ F. Коэфициент затухания равен:

$$\alpha = \frac{R}{2L} = \frac{6}{2\cdot 12{,}5} = 0{,}24.$$

Угловая частота собственных колебаний равна:

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \alpha^2} = \sqrt{\frac{1}{12{,}5\cdot 10^{-7}} - 0{,}24^2} = 894.$$

Полное сопротивление цепи равно:

$$z = \sqrt{6^2 + \left(314\;\;12{,}5 - \frac{10^7}{314}\right)^2} \cong \frac{10^5}{3{,}14} - 314\;\;12{,}5 = 27\,874\ \Omega.$$

Таким образом, наше уравнение примет вид:

$$U_c = -\frac{30}{27\,874\cdot 314\cdot 10^{-7}}(\cos 314t - e^{-0{,}24t}\cos 894t) =$$

$$= -34{,}3(\cos 314t - e^{-0{,}24t}\cos 894t). \qquad (1)$$

Точное решение о нахождении максимума этого выражения возможно только графическим путем, что очень длительно и кропотливо. Приближенное решение можно найти на основании следующих соображений. Если бы затухание было равно нулю, то максимум уравнения (1) можно было бы найти, положив $\cos 314t = \pm 1$, а $\cos 894t = \mp 1$, так как при достаточно большом промежутке времени это условие может быть осуществлено с достаточной точностью. Так как затухание не равно нулю, то второй член уравнения (1) постепенно уменьшается, и максимум будет достигнут раньше, чем будет осуществлено условие $\cos 314t = \pm 1$ при одновременном равенстве $\cos 894t = \mp 1$. Поэтому, мы можем найти максимум уравнения (1), если вычислим величину U_c для тех моментов времени, когда $\cos 894t = \mp 1$, а $\cos 314t$ близок к ± 1. Эти моменты легко найти, если построить зависимость $n_s = f(n)$, где n — число полупериодов собственных колебаний, а n_s — число полупериодов вынужденных колебаний. Очевидно, что

$$n_s = \frac{314}{894} n = 0{,}351 n.$$

Пользуясь логарифмической линейкой, найдем моменты, когда целому числу полупериодов n отвечает возможно близкая к целому числу величина n_s. Эти условия соблюдаются при следующих значениях n:

$n =$	3;	14;	17;	20;	31;	34;	37;	40;	54;	57;
$n_s =$	1,054;	4,91;	5,97;	7,02;	10,88;	11,94;	12,99;	14,05;	18,96;	20,01.

Из этого ряда мы должны выбросить те случаи, когда n и n_s одновременно четные или нечетные.

Вычисляя для оставшихся значений n величину U_c, получим

$n =$	14	17	20	54	57
$U_c =$	66,8	68,0	68,0	66,85	67,0.

При дальнейшем увеличении n влияние затухания будет все более уменьшать величину U_c. Поэтому мы можем принять величину $U_{c_{max}}$ равной 68,0 kV.

№ 371. Нейтраль трехфазного трансформатора на 120 kV заземлена через трансформатор напряжения, рассчитанный на 70 kV. Кривая намагничивания последнего дана следующей таблицей:

i_n в mA:	5	10	15	20	30	40	50	60
U в kV:	15	28	38,5	46,5	57,5	64,5	70	74.

Вследствие порчи масляного выключателя одна из фаз силового трансформатора осталась включенной на линию, емкость которой равна 0,36 μF. Определить повышение напряжения.

Решение. Пренебрегая активным сопротивлением цепи и индуктивным сопротивлением включенной фазы трансформатора, по сравнению с индуктивным сопротивлением заземляющего трансформатора, мы можем найти, что ЭДС трансформатора уравновешивается индуктивным падением в заземляющем трансформаторе и емкостным падением в линии:

$$U = i\omega L - \frac{i}{\omega C}.$$

Второй член этой разности графически может быть представлен прямой линией, проходящей через начало координат и имеющей угловой коэфициент $\frac{1}{\omega C}$. Произведение $i\omega L$ представляет собою кривую намагничивания заземляющего трансформатора. Поэтому напряжение U мы найдем, графически вычитая из кривой намагничивания прямую $\frac{1}{\omega C}$.

Определим $\frac{1}{\omega C}$:

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{10^6}{314 \cdot 0{,}36} = 8{,}85 \cdot 10^3\ \mathrm{V/A} = 8{,}85\ \mathrm{V/mA}.$$

Построим кривую намагничивания и проведем через ординату $U = 69{,}4$ kV (фазное напряжение) прямую $\frac{1}{\omega C} = 8{,}85i$ (рис. 56). Пересечение этой прямой с кривой намагничивания даст нам решение задачи. Из рис. 56 (в верхней части его пересечение кривых показано в увеличенном масштабе) находим:

$$U \cong 69{,}8\ \mathrm{kV}.$$

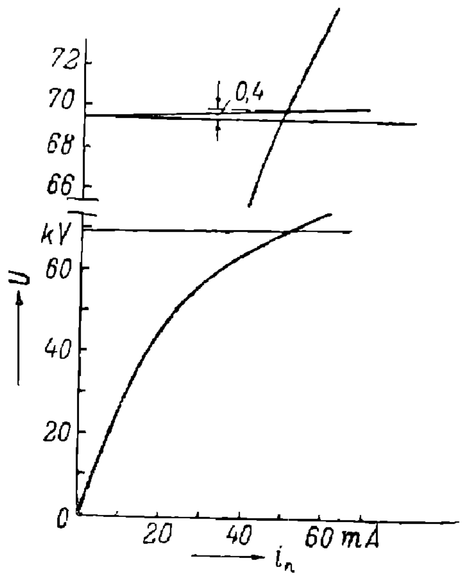

Рис. 56.

Поэтому повышение напряжения равно:

$$\Delta U = 69{,}8 - 69{,}4 = 0{,}4\ \mathrm{kV}.$$

№ 372. Кривая намагничивания трансформатора задана таблицей:

i_n в A:	1	2	4	8	12	16	20
U в kV:	10,4	14,8	18,4	21,1	22,7	23,8	24,8.

Каково будет напряжение на его зажимах, если он включен на отрезок кабеля длиною 1,5 km, имеющего емкость 0,22 μF/km. Фазное напряжение трансформатора равно 20 kV, частота 50 Hz.

№ 373. В условиях предыдущей задачи определить предельную емкость, включенную последовательно с трансформатором, при которой еще не наступает явление опрокидывания фазы.

№ 374. Испытательный трансформатор имеет кривую намагничивания, заданную таблицей:

i_n в mA:	2	4	6	10	15	20	30
U в kV:	12,2	23,8	34,9	55,5	79,0	100,0	136,2.

При помощи трансформатора испытываются одновременно 100 штук изоляторов, имеющих емкость по 35 cm каждый. Определить повышение напряжения трансформатора, если он возбужден до напряжения 80 kV и частота равна 50 Hz.

№ 375. Определить амплитуду волны тока, идущего в момент включения по линии с постоянными $L = 0{,}0013$ H/km и $C = 9{,}0 \cdot 10^{-9}$ F/km, если напряжение равно 100 kV.

Примечание. Связь между напряжением и током волны определяется равенством

$$U = Iw = I\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

№ 376. Прямоугольная волна идет с линии, имеющей волновое сопротивление 435 Ω на подстанцию с тремя фидерами, имеющими волновое сопротивление по 450 Ω. Определить напряжение преломленной и отраженной волны, если напряжение падающей волны равно 500 kV.

Решение. Эквивалентное волновое сопротивление трех фидеров будет равно

$$w_2 = \frac{450}{3} = 150\,\Omega.$$

Поэтому наша задача приводится к определению преломленной и отраженной волны при переходе волны с линии, имеющей $w_1 = 435\,\Omega$ на линию, имеющую $w_2 = 150\,\Omega$. В этом случае напряжение преломленной волны равно:

$$U_2 = \frac{2w_2}{w_1 + w_2} U_1 = \frac{2 \cdot 150}{435 + 150} \cdot 500 = 256 \text{ kV}$$

и напряжение отраженной волны равно:

$$U_1' = \frac{w_2 - w_1}{w_2 + w_1} U_1 = \frac{150 - 435}{150 + 435} 500 = -244 \text{ kV}.$$

№ 377. Определить напряжение преломленной и отраженной волны при переходе волны через разветвление линии. До разветвления имеется одна линия с волновым сопротивлением 400 Ω, после ответвления — две линии того же типа. Напряжение волны 900 kV.

№ 378. Линия состоит из двух участков: первый имеет индуктивность $L = 0{,}00153$ H/km и емкость $C = 0{,}0068$ μ F/km, а второй — индуктивность $L = 0{,}0004$ H/km и емкость $C = 0{,}2$ μ F/km. Волна перенапряжения с амплитудой $U_1 = 200$ kV идет из первого участка во второй и, отразившись от разомкнутого конца второго участка, снова возвращается на первый участок. Определить амплитуду перенапряжения в конце этого процесса, предполагая волну прямоугольной и пренебрегая затуханием. Длина волны не превосходит длины второго участка.

№ 379. Определить сопротивление, необходимое для того, чтобы амплитуда преломленной волны при переходе волны из линии с волновым сопротивлением $w_1 = 40\,\Omega$ в линию с волновым сопротивлением $w_2 = 450\,\Omega$ осталась неизменной. Волну предполагаем прямоугольной.

Примечание. При переходе волны с одной линии на другую, через сопротивление, отношение напряжений выражается равенством:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{2w_2}{w_1 + w_2 + R}.$$

№ 380. Найти напряжение преломленной волны при прохождении прямоугольной волны с амплитудой $U_1 = 100$ kV через сопротивление $R = 1000\,\Omega$, если волновое сопротивление первой линии равно $w_1 = 400\,\Omega$, а волновое сопротивление второй линии равно $w_2 = 350\,\Omega$.

№ 381. Найти напряжение преломленной волны при прохождении прямоугольной волны с амплитудой $U_1 = 100$ kV из кабеля с волновым сопротивлением $w_1 = 39\,\Omega$, через сопротивление $R = 100\,\Omega$ в линию с волновым сопротивлением $w_2 = 450\,\Omega$.

№ 382. Волна идет из линии с волновым сопротивлением w_1 в линию с волновым сопротивлением $w_2 > w_1$. Найти напряжение преломленной и отраженной волны, если в точке раздела между линией и землей включено сопротивление R (рис. 57).

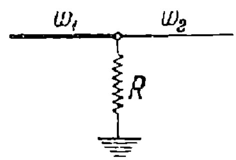

Рис. 57.

Решение. Напряжение падающей волны равно разности напряжений преломленной и отраженной волн, а ток падающей волны равен сумме токов преломленной и отраженной волны. Отсюда мы получаем два уравнения:

$$U_1 = U_2 - U_1', \tag{1}$$

$$i_1 = i_2 + i_1'. \tag{2}$$

Далее, мы можем написать следующие очевидные равенства:

$$\left.\begin{aligned} i_1 w_1 &= U_1 \\ i_1' w_1 &= U_1' \\ i_2 w_2' &= U_2 \end{aligned}\right\}, \tag{3}$$

где

$$w_2' = \frac{w_2 R}{w_2 + R}.$$

Подставим уравнение (3) в уравнение (1), умножим уравнение (2) на w_1 и сложим уравнения (1) и (2):

$$+\left| \begin{array}{l} i_1 w_1 = i_2 \dfrac{w_2 R}{w_2 + R} - i_1' w_1 \\ i_1 w_1 = i_2 w_1 + i_1' w_1 \end{array} \right.$$

$$\overline{2 i_1 w_1 = 2U_1 = i_2 \left(w_1 + \frac{w_2 R}{w_2 + R} \right)}.$$

Отсюда

$$i_2 = \frac{2U_1}{w_1 + \dfrac{w_2 R}{w_2 + R}} = \frac{2U_1 (w_2 + R)}{w_1 w_2 + R(w_1 + w_2)}.$$

Далее, получим:

$$U_2 = i_2 w_2' = \frac{2U_1 w_2 R}{w_1 w_2 + R(w_1 + w_2)}.$$

и

$$U_1' = U_2 - U_1 = \frac{2U_1 w_2 R}{w_1 w_2 + R(w_1 + w_2)} - U_1 =$$

$$= \frac{(w_2 - w_1) R - w_1 w_2}{(w_1 + w_2) R + w_1 w_2} \cdot U_1.$$

№ 383. Определить сопротивление, которое необходимо включить между линией и землей в точке изменения волнового сопротивления, для того, чтобы преломленное напряжение осталось равным падающему. Волна идет с волнового сопротивления $w_1 = 44{,}7\ \Omega$ на волновое сопротивление $w_2 = 407\ \Omega$.

№ 384. Прямоугольная волна переходит с линии, имеющей волновое сопротивление w_1 на линию, имеющую волновое сопротивление w_2, через катушку самоиндукции с индуктивностью L. Определить амплитуду и форму преломленной и отраженной волн.

Решение. I способ. При решении задач, связанных с движением волн по линиям с распределенными постоянными, удобно пользоваться правилом Петерсена. По этому правилу вся совокупность линии рассматривается как цепь, в которой волновые сопротивления заменены сосредоточенными омическими сопротивлениями равной величины и к которой приложено напряжение, равное двойному напряжению падающей волны. Пользуясь этим правилом, мы можем написать:

$$2U_1 = i_2 (w_1 + w_2) + L \frac{di_2}{dt}. \tag{1}$$

Решение этого уравнения имеет вид:

$$i_2 = A e^{\gamma t} + B, \tag{2}$$

где γ определяется уравнением:

$$L\gamma + w_1 + w_2 = 0.$$

Отсюда

$$\gamma = -\frac{w_1 + w_2}{L}.$$

Постоянная B есть частное решение уравнения (1). Найдем его, положив

$$B = \text{const} = i_2.$$

Тогда

$$2U_1 = B(w_1 + w_2),$$

$$B = \frac{2U_1}{w_1 + w_2}.$$

Для определения постоянной A имеем условие, что при $t = 0$,

$$i_2 = 0.$$

Поэтому

$$A + B = 0,$$

$$A = -B = -\frac{2U_1}{w_1 + w_2}.$$

Подставляя значения γ, A и B в уравнение (2), получим

$$i_2 = \frac{2U_1}{w_1 + w_2}\left(1 - e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}\right).$$

Теперь можно найти значение U_2:

$$U_2 = i_2 w_2 = \frac{2U_1 w_2}{w_1 + w_2}\left(1 - e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}\right).$$

Для определения напряжения отраженной волны воспользуемся условием:

$$i_1' = i_1 - i_2,$$

или

$$U_1' = (i_1 - i_2)\, w_1,$$

откуда

$$U_1' = U_1 - i_2 w_1,$$

$$U_1' = U_1 - \frac{2U_1 w_1}{w_1 + w_2} + \frac{2U_1 w_1}{w_1 + w_2} e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t} =$$

$$= \left(\frac{w_2 - w_1}{w_2 + w_1} + \frac{2w_1}{w_2 + w_1} e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}\right)\cdot U_1.$$

II способ. Решим задачу с помощью операционного метода. В этом случае уравнение (1) перепишется так:

$$2U_1 = i_2(w_1 + w_2) + pLi_2.$$

Условное сопротивление нашей цепи равно

$$Z(p) = w_1 + w_2 + pL.$$

Поэтому

$$p=-\frac{w_1+w_2}{L},$$
$$Z(O)=w_1+w_2,$$
$$Z'(p)=L,$$
$$pZ'(p)=pL=-(w_1+w_2).$$

Применяя теорему разложения, получим:

$$i_2=\frac{2U_1}{w_1+w_2}+\frac{2U_1e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}}{-(w_1+w_2)}=\frac{2U_1}{w_1+w_2}\left(1-e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}\right).$$

Далее находим

$$U_2=i_2w_2=\frac{2U_1w_2}{w_1+w_2}\left(1-e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}\right)$$
$$i_1'=i_1-i_2,$$
$$U_1'=(i_1-i_2)w_1=U_1-i_2w_1,$$
$$U_1'=U_1-\frac{2U_1w_1}{w_1+w_2}+\frac{2U_1w_1}{w_1+w_2}e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}=$$
$$=\left(\frac{w_2-w_1}{w_2+w_1}+\frac{2w_1}{w_2+w_1}e^{-\frac{w_1+w_2}{L}\cdot t}\right)U_1.$$

№ 385. Найти отношение амплитуд преломленной и отраженной волн к падающей при прохождении прямоугольной волны из линии с волновым сопротивлением $w_1=290\,\Omega$ в линию с волновым сопротивлением $w_2=39\,\Omega$ через катушку с индуктивностью $L=0{,}005$ H. Длина волны — 3 km.

Примечание. Амплитуду преломленной волны найдем, определив U_2 для момента времени, соответствующего длине волны.

№ 386. Найти отношение амплитуд преломленной и отраженной волн к падающей при переходе прямоугольной волны длиною $10\,\mu$sec с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1=470\,\Omega$, на линию, имеющую волновое сопротивление $w_2=40\,\Omega$, через катушку самоиндукции с индуктивностью $L=3$ mH.

№ 387. Волна с напряжением 300 kV выходит из кабеля ($w_1=$ $=38\,\Omega$) на линию ($w_2=450\,\Omega$). Определить напряжение преломленной волны через $5\,\mu$sec после момента подхода волны к точке раздела, предполагая волну прямоугольной. В точке раздела включена катушка с индуктивностью $L=4$ mH.

№ 388. Волна, определяемая уравнением

$$U_1=887\,(e^{-0{,}085t}-e^{-4{,}12t})\,\text{kV},$$

где t дано в μsec, переходит с линии, имеющей волновое сопротивление

$w_1 = 400\,\Omega$, на линию с волновым сопротивлением $w_2 = 200\,\Omega$, через катушку самоиндукции с индуктивностью $L = 5$ mH. Определить напряжение преломленной и отраженной волн.

Решение. Действие волны, заданной в условии задачи, эквивалентно действию двух волн экспоненциального характера:

$$U' = 887 e^{-0,085t}$$
$$U'' = -887 e^{4,12t}.$$

Формула Хевисайда для случая экспоненциальной волны получает следующий вид:

$$i = \frac{U_m e^{\lambda t}}{Z(\lambda)} + \sum_{p=p_1}^{p=p_n} \frac{U_m e^{pt}}{(p-\lambda)\, Z'(p)}.$$

Условное сопротивление цепи равно:

$$Z(p) = w_1 + w_2 + pL.$$

Поэтому

$$Z(\lambda) = w_1 + w_2 + \lambda L,$$
$$p_1 = -\frac{w_1 + w_2}{L},$$
$$Z'(p) = L.$$

Подставляя эти значения в формулу Хевисайда и применяя одновременно правило Петерсена, получим:

$$i_2 = \frac{2U_m e^{\lambda_1 t}}{w_1 - w_2 + \lambda_1 L} - \frac{2U_m e^{\lambda_2 t}}{w_1 + w_2 + \lambda_2 L} + \frac{2U_m e^{p_1 t}}{(p_1 - \lambda_1) L} - \frac{2U_m e^{p_1 t}}{(p_1 - \lambda_2) L} =$$
$$= \frac{2U_m (e^{\lambda_1 t} - e^{p_1 t})}{w_1 + w_2 + \lambda_1 L} - \frac{2U_m (e^{\lambda_2 t} - e^{p_1 t})}{w_1 + w_2 + \lambda_2 L}. \qquad (1)$$

Подставляя в это уравнение значения λ_1 и λ_2, необходимо помнить, что в условии задачи они даны в соответствии с принятыми в нем единицами времени (микросекунды). В знаменатель уравнения (1) необходимо ввести коэфициенты λ_1 и λ_2, отнесенные к секундам, следовательно, умноженные на 10^6. Производя подстановку, получим:

$$i_2 = \frac{2 \cdot 887 \left(e^{-0,085t} - e^{-\frac{600 \cdot 10^{-6}}{5 \cdot 10^{-3}} t}\right)}{600 - 0,085 \cdot 5 \cdot 10^3} - \frac{1774 (e^{-4,12t} - e^{-0,12t})}{600 - 4,12 \; 5 \cdot 10^3} =$$
$$= 10,13 (e^{-0,085t} - e^{-0,12t}) - 0,0887 (e^{-0,12t} - e^{-4,12t}).$$

Напряжение преломленной волны равно:

$$U_2 = i_2 w_2 = 2026 (e^{-0,085t} - e^{-0,12}) - 17,74 (e^{-0,12t} - e^{-4,12t}).$$

На рис. 58 изображен вид преломленной волны вместе с волной падающей.

Отраженную волну найдем, вычитая из преломленной волны — падающую:

$$U_1' = U_2 - U_1.$$

Отсюда

$$U_1' = 2026\,(e^{-0{,}085t} - e^{-0{,}12t}) - 17{,}74\,(e^{-0{,}12t} - e^{-4{,}12t}) - 887\,(e^{-0{,}085t} - e^{-4{,}12t}) = 1139e^{-0{,}085t} - 2043{,}7e^{-0{,}12t} + 904{,}7e^{-4{,}12t}.$$

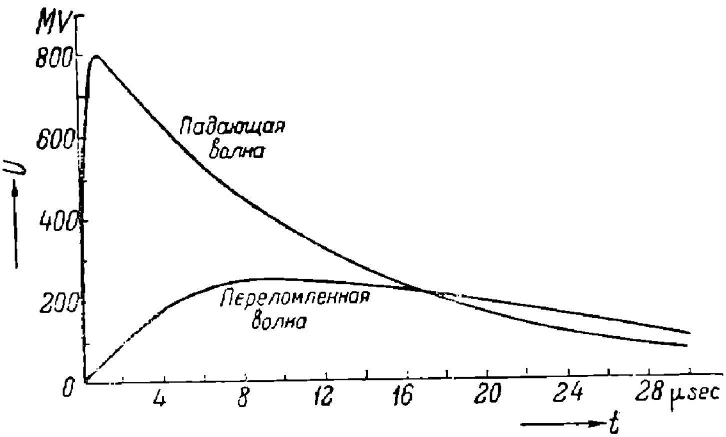

Рис. 58.

№ 389. Волна, определяемая уравнением

$$U_1 = 828\,(e^{-0{,}016t} - e^{-2{,}75t})\ \text{kV},$$

где t дано в μsec, переходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1 = 400\ \Omega$ на линию, имеющую волновое сопротивление $w_2 = 200\ \Omega$, через катушку самоиндукции с индуктивностью $L = 5$ mH. Найти амплитуду напряжения преломленной волны.

№ 390. Волна, определяемая уравнением

$$U = 1042\,(e^{-0{,}202t} - e^{-3{,}03t})\ \text{kV},$$

где t дано в μsec, переходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1 = 400\ \Omega$, на линию, имеющую волновое сопротивление $w_2 = 200\ \Omega$, через катушку самоиндукции с индуктивностью $L = 5$ mH. Найти амплитуду напряжения преломленной волны.

№ 391. Прямоугольная волна проходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1 = 450\ \Omega$, на линию, имеющую волновое сопротивление $w_2 = 300\,\Omega$, мимо емкости $C = 0{,}05\,\mu F$. Найти напряжение преломленной и отраженной волн, если длина волны равна 1500 m, а ее амплитуда — 500 kV.

Решение. Прямоугольную волну конечной длины мы можем рассматривать как разность двух бесконечно длинных волн, из которых вторая появляется через промежуток времени $T = \frac{l}{v}$, где l — длина нашей волны, а v — скорость движения волны. В нашем случае

$$T = \frac{1500}{300} = 5\,\mu\,\text{sec}.$$

Поэтому мы должны рассмотреть отдельно два промежутка времени один в пределах от $t = 0$ до $t = T$, и второй — при $t > T$. Для первого промежутка напряжение преломленной волны выражается уравнением

$$U_2 = \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\left(1 - e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}}\right),$$

а напряжение отраженной волны — уравнением

$$U_1' = \frac{U_1(w_2 - w_1)}{w_1 + w_2} - \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\,e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}t}$$

Для второго промежутка времени получим следующий результат:

$$U_2 = \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\left(1 - e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}t}\right) - \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\left[1 - e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}(t-T)}\right] =$$

$$= \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\left[e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}(t-T)} - e^{-\frac{w_1+w}{w_1w_2C}t}\right] =$$

$$= \frac{2U_1w_2}{w_1+w_2}\,e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}t}\left[e^{\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}T} - 1\right].$$

$$U_1' = \frac{U_1(w_2 - w_1)}{w_1 + w_2} - \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\,e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}t} -$$

$$- \frac{U_1(w_2 - w_1)}{w_1 + w_2} + \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\,e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}(t-T)} =$$

$$= \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\left[e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}(t-T)} - e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}t}\right] =$$

$$= \frac{2U_1w_2}{w_1 + w_2}\,e^{-\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}t}\left[e^{\frac{w_1+w_2}{w_1w_2C}T} - 1\right].$$

Подставляя численные значения в полученные формулы, найдем:

$$U_2 = \frac{2 \cdot 500 \cdot 300}{450 + 300} e^{-\frac{750 \cdot 10^6}{450 \cdot 300 \cdot 5} t} \left(e^{\frac{750 \cdot 10^6}{450 \cdot 300 \cdot 5} \cdot 5 \cdot 10^{-6}} - 1\right) = 300 e^{-\frac{t}{9}},$$

$$U_1' = 300 e^{-\frac{t}{9}}$$

Определим амплитуду преломленной волны. Очевидно, что она соответствует моменту времени $t = T$. Поэтому

$$U_{2\max} = 300 e^{-\frac{5}{9}} = 170{,}5 \text{ kV}.$$

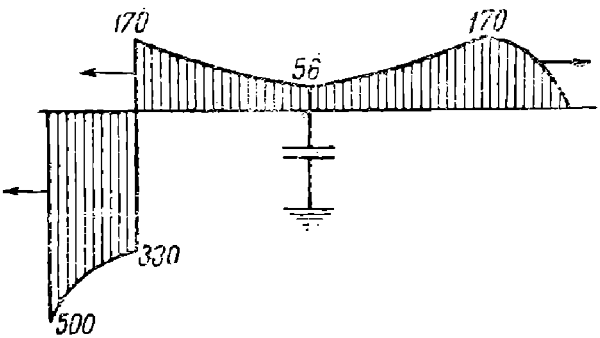

Рис. 59.

Форма волн преломленной и отраженной представлена на рис. 59.

№ 392. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 450$ kV и длиною $l = 600$ m проходит по трем проводам линии мимо анкерной опоры, на которой подвешены сдвоенные гирлянды, имеющие суммарную емкость 150 cm. Волновое сопротивление линии $w = 192\,\Omega$. Определить амплитуду преломленной волны.

№ 393. Волна, определяемая уравнением

$$U_1 = 126\,(e^{-0{,}044t} - e^{-2{,}01t}) \text{ kV},$$

где t — в μsec, переходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1 = 420\,\Omega$, в генератор с волновым сопротивлением $w_2 = 600\,\Omega$, мимо емкости $C = 0{,}5\,\mu$F. Найти амплитуду преломленной волны.

Примечание. Воспользоваться методом решения, данным в задаче № 388.

№ 394. Срезанная волна, определяемая уравнением

$$135\,(e^{-1{,}6t} - e^{-4{,}2t}) \text{ kV},$$

где t — в μsec проходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1 = 380\,\Omega$, в генератор с волновым сопротивлением $w_2 = 720\,\Omega$, мимо емкости $C = 0{,}1\,\mu$F. Найти амплитуду преломленной волны.

№ 395. На подстанцию, имеющую 3 фидера, подходит по одному из этих фидеров волна, определяемая уравнением

$$U_1 = 1000\,(e^{-0{,}02t} - e^{-2{,}6t}) \text{ kV},$$

где t — в μsec. Волновое сопротивление первого из фидеров $w_1 = 390\,\Omega$, а двух остальных по $520\,\Omega$. Фидер, по которому подходит волна, защищен катушкой Кампоса с индуктивностью $L = 3{,}5$ mH и сопротивлением $R = 2000\,\Omega$. (Рис. 60.) Найти амплитуду преломленной волны.

Решение. Приходящая на подстанцию волна переходит с шин на присоединенные к ним 2 фидера и продолжает распространяться по ним. Таким образом, наша задача приводится к рассмотрению перехода волны с волнового сопротивления, представляемого первым фидером, на волновое сопротивление, представляемое включенными параллельно двумя другими фидерами, через катушку Кампоса. Волновое сопротивление двух параллельно включенных фидеров равно

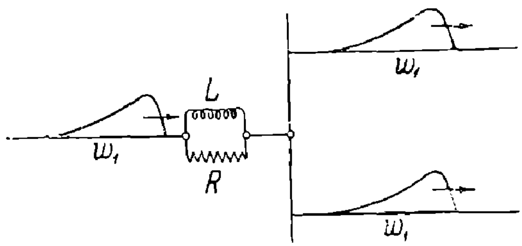

Рис. 60.

$$w_2 = \frac{1}{2} w_1 = 260\,\Omega.$$

Условное сопротивление цепи равно

$$Z(p) = w_1 + w_2 + \frac{RpL}{R + pL} = \frac{R(w_1 + w_2) + pL(R + w_1 + w_2)}{R + pL}.$$

Далее

$$Z'(p) = \frac{(R + pL)(R + w_1 + w_2)L}{(R + pL)^2} - \frac{[R(w_1 + w_2) + pL(R + w_1 + w_2)]L}{(R + pL)^2} = \frac{(R + w_1 + w_2)L}{R + pL} - Z(p)\frac{L}{(R + pL)^2}.$$

Так как в формулу Хевисайда входят только те значения этой производной, которые получаются при подстановке в нее вместо p корней уравнения $Z(p) = 0$, то второй член полученного выражения равен нулю. Поэтому

$$Z'(p_1) = \frac{(R + w_1 + w_2)L}{R + p_1 L}.$$

Определим значение p_1:

$$R(w_1 + w_2) + p_1 L(R + w_1 + w_2) = 0,$$

$$p_1 = -\frac{R(w_1 + w_2)}{L(R + w_1 + w_2)} = -\frac{2000(390 + 260)}{3{,}5 \cdot 10^{-3}(2000 + 390 + 260)} = -0{,}14 \cdot 10^6.$$

Подставляя это значение в выражения для $Z'(p)$, получим:

$$Z'(p_1) = \frac{L(R + w_1 + w_2)}{R - \dfrac{R(w_1 + w_2)}{R + w_1 + w_2}} = \frac{L(R + w_1 + w_2)^2}{R^2}.$$

Подставим полученные значения в формулу Хевисайда для апериодической волны и применим правило Петерсена:

$$U_2 = i_2 w_2 = \frac{2Uw_2\left[e^{\lambda_1 t}(R + \lambda_1 L) - e^{p_1 t}\cdot\dfrac{R^2}{R + w_1 + w_2}\right]}{R(w_1 + w_2) + \lambda_1 L(R + w_1 + w_2)} -$$

$$- \frac{2Uw_2\left[e^{\lambda_2 t}(R + \lambda_2 L) - \dfrac{e^{p_1 t}R^2}{R + w_1 + w_2}\right]}{R(w_1 + w_2) + \lambda_2 L(R + w_1 + w_2)}.$$

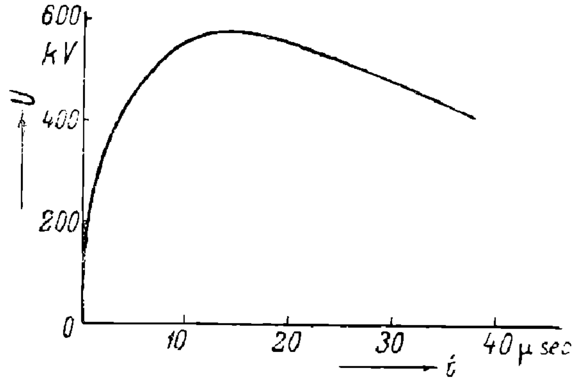

Рис. 61.

Подставим численные значения:

$$U_2 = \frac{2000\cdot 260\left[e^{-0{,}02t}(2000 - 0{,}02\cdot 10^6\cdot 3{,}5\cdot 10^{-3}) - \dfrac{2000^2 e^{-0{,}14t}}{2650}\right]}{2000\cdot 650 - 0{,}02\cdot 10^6\cdot 3{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 2650} -$$

$$- \frac{2000\ 260\left[e^{-2{,}6t}(2000 - 2{,}6\cdot 10^6\cdot 3{,}5\cdot 10^{-3}) - \dfrac{2000^2 e^{-0{,}14t}}{2650}\right]}{2000\cdot 650 - 2{,}6\cdot 10^6\cdot 3{,}5\cdot 10^{-3}\cdot 2650} =$$

$$= 901e^{-0{,}02t} - 739{,}5e^{-0{,}14t} - 161{,}5e^{-2{,}6t} \qquad (1)$$

Строя кривую, изображаемую этим уравнением (рис. 61), найдем ее амплитуду. Она равна

$$U_{2\max} = 580 \text{ kV}.$$

Рассматривая кривую рис. 61, мы можем убедиться в том, что начальная часть ее фронта сравнительно крута, а затем происходит некоторый перелом и далее кривая идет более отлого. В этом сказывается влияние сопротивления R, шунтирующего самоиндукцию, через которое в первые моменты идет большая часть тока.

Заметим, что амплитуду преломленной волны можно приближенно определить, пренебрегая третьим членом в уравнении (1), вследствие его быстрого затухания, и диференцируя остаток.

№ 396. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 1\,000$ kV переходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w_1 = 390\ \Omega$, на линию с волновым сопротивлением $w_2 = 260\ \Omega$, через катушку Кампоса, имеющую индуктивность $L = 3{,}5$ mH и сопротивление $R = 2\,000\ \Omega$. Найти амплитуду преломленной волны, если длина падающей волны равна $l = 12$ km.

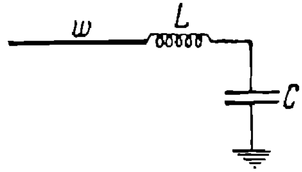

Рис. 62.

№ 397. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 500$ kV приходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w = 450\ \Omega$, через катушку самоиндукции $L = 5 \cdot 10^{-3}$ H на подстанцию. Определить максимальное напряжение на трансформаторах подстанции, предполагая, что емкость шин и входная емкость трансформаторов равны в сумме $3\,000\ \mu\mu$F (рис. 62).

Примечание. При решении задачи рассматривать заданную систему, как колебательный контур с постоянными w, L и C, включаемый на постоянное напряжение $2U_1$.

№ 398. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 650$ kV приходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w = 430\ \Omega$, через катушку самоиндукции $L = 4 \cdot 10^{-3}$ H на подстанцию. Емкость шин подстанции и входная емкость трансформатора составляют $1\,200$ cm. Определить максимальное напряжение на трансформаторе, если катушка шунтирована сопротивлением $R = 1\,500\ \Omega$.

№ 399. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 780$ kV приходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w = 400\ \Omega$ через катушку Кампоса, имеющую $L = 3 \cdot 10^{-3}$ H и $R = 400\ \Omega$, на подстанцию. Емкость шин подстанции и входная емкость трансформаторов составляют $2\,100$ cm. Определить максимальное напряжение на трансформаторе.

№ 400. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 1\,000$ kV приходит с линии, имеющей волновое сопротивление $w = 460\ \Omega$, на подстанцию. При входе на подстанцию имеется катушка Кампоса с индуктивностью $L=5\ 10^{-3}$ H и сопротивлением $R=690\ \Omega$. Емкость шин и входная емкость трансформаторов составляют в сумме $2\ 10^{-9}$ F. Найти наибольшее напряжение на трансформаторе.

Решение. Условное сопротивление цепи в данном случае равно

$$Z(p)=w+\frac{1}{pC}+\frac{pRL}{R+pL}=\frac{p^2LC(R+w)+p(L+RCw)+R}{pC(R+pL)}.$$

Ток в цепи равен

$$i=\frac{2U_1}{Z(p)}=\frac{2U_1pC(R+pL)}{p^2LC(R+w)+p(L+RCw)+R}.$$

Напряжение на конденсаторе (трансформаторе) равно

$$U_c=\frac{i}{pC}=\frac{2U_1(R+pL)}{p^2LC(R+w)+p(L+RCw)+R}.$$

Поэтому условное сопротивление для определения напряжения конденсатора равно

$$H(p)=\frac{p^2LC(R+w)+p(L+RCw)+R}{R+pL}.$$

Находим $H(0)$ и $H'(p)$:

$$H(0)=\frac{R}{R}=1,$$

$$H'(p)=\frac{L+RCw+2pLC(R+w)}{R+pL}.$$

Корни уравнения $H(p)=0$ будут равны:

$$p=\frac{-(L+RCw)\pm\sqrt{(L+RCw)^2-4RLC(R+w)}}{2LC(w+R)}.$$

Подставим численные значения входящих в это уравнение величин:

$$p=\frac{-(5\cdot10^{-3}+690\cdot2\ \ 10^{-9}\cdot460)}{2\ \ 5\cdot2\cdot10^{-12}\ \ 1\,150}\pm$$

$$\pm\frac{\sqrt{5{,}635^2\cdot10^{-6}-4\cdot690\cdot5\ \ 2\ \ 10^{-12}\ \ 1\,150}}{2\cdot5\cdot2\cdot10^{-12}\ \ 1\,150}=$$

$$=\frac{-5{,}635\cdot10^{-3}\pm\sqrt{3{,}175\cdot10^{-5}-3{,}175\cdot10^{-5}}}{2{,}3\cdot10^{-8}}=-2{,}45\cdot10^5.$$

Оба корня получились равными.

В этом случае прямое применение формулы Хевисайда приводит к нелепому результату ($i=\infty$). Для решения вопроса воспользуемся следующим приемом. Положим

$$p_1=-\alpha+\beta,$$
$$p_2=-\alpha-\beta,$$

где

$$\alpha = \frac{L + RCw}{2LC(R + w)}$$

и β — малая величина, стремящаяся к нулю. В пределе β обращается в нуль и оба корня становятся равными друг другу. Воспользуемся теперь формулой Хевисайда:

$$U_c = \frac{2U_1}{H(0)} + 2U_1 \left[\frac{e^{(-\alpha+\beta)t}(R + p_1 L)}{2p_1^2 LC(R + w) + p_1(L + RCw)} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{(-\alpha-\beta)t}(R + p_2 L)}{p_2^2 LC(R + w) + p_2(L + RCw)} \right]_{\beta\to 0} =$$

$$= 2U_1 + 2U_1 \left[\frac{e^{(-\alpha+\beta)t}(R - \alpha L + \beta L)}{(-\alpha + \beta)[L + RwC - 2\alpha LC(R+w) + 2\beta LC(R+w)]} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{(-\alpha-\beta)t}(R - \alpha L - \beta L)}{(-\alpha - \beta)[L + RwC - 2\alpha LC(R+w) - 2\beta LC(R+w)]} \right]_{\beta\to 0} =$$

$$= 2U_1 + 2U_1 \left[\frac{e^{(-\alpha+\beta)t}(R - \alpha L + \beta L)}{(-\alpha + \beta) \cdot 2\beta LC(R + w)} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{(-\alpha-\beta)t}(R - \alpha L - \beta L)}{(-\alpha - \beta) \cdot 2\beta LC(R + w)} \right]_{\beta\to 0} =$$

$$= 2U_1 + \frac{2U_1 e^{-\alpha t}}{2LC(R + w)} \left[\frac{e^{\beta t}(R - \alpha L) + e^{\beta t} \cdot \beta L}{(-\alpha + \beta)\beta} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{-\beta t}(R - \alpha L) - e^{-\beta t} \cdot \beta L}{(-\alpha - \beta)\beta} \right]_{\beta\to 0} =$$

$$= 2U_1 + \frac{U_1 e^{-\alpha t}}{LC(R + w)} \left[\frac{e^{\beta t}(R - \alpha L)(-\alpha - \beta) - e^{-\beta t}(R - \alpha L)(-\alpha + \beta)}{\beta(\alpha^2 - \beta^2)} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{\beta t} \cdot L(-\alpha - \beta) - e^{-\beta t} \cdot L(-\alpha + \beta)}{\alpha^2 - \beta^2} \right]_{\beta\to 0} =$$

$$= 2U_1 + \frac{U_1 e^{-\alpha t}}{LC(R + w)} \left[\frac{-\alpha(R - \alpha L)}{\alpha^2 - \beta^2} \cdot \frac{2\,\mathrm{sh}\,\beta t}{\beta} - \frac{R - \alpha L}{\alpha^2 - \beta^2} 2\,\mathrm{ch}\,\beta t - \right.$$

$$\left. - \frac{\alpha L \cdot 2\,\mathrm{sh}\,\beta t}{\alpha^2 - \beta^2} - \frac{\beta L \cdot 2\,\mathrm{ch}\,\beta t}{\alpha^2 - \beta^2} \right]_{\beta\to 0} =$$

$$= 2U_1 + \frac{2U_1 e^{-\alpha t}}{LC(R + w)} \left[-\frac{R - \alpha L}{\alpha} t - \frac{R - \alpha L}{\alpha^2} \right] =$$

$$= 2U_1 - \frac{2U_1(R - \alpha L)e^{-\alpha t}}{\alpha LC(R + w)} \left(t + \frac{1}{\alpha} \right).$$

Подставляя в эту формулу численные значения входящих в нее величин, получим:

$$U_c = 2000\left[1 - \frac{(690 - 2{,}45\cdot 10^5\cdot 5\cdot 10^{-3})\left(t + \frac{10^{-5}}{2{,}45}\right)}{2{,}45\cdot 10^5\cdot 2\cdot 5\cdot 10^{-12}\cdot 1150} e^{-\alpha t}\right] =$$

$$= 2000\,[1 + 1{,}898\cdot 10^5\,(t + 4{,}08\cdot 10^{-6})\,e^{-\alpha t}].$$

Эта функция имеет максимум при $t = 0$. Следовательно,

$$U_{c_{\max}} = 2000\,(1 + 1{,}898\cdot 10^5\cdot 4{,}08\cdot 10^{-6}) = 3556\ \mathrm{kV}.$$

№ 401. На подстанцию приходит волна, определяемая уравнением

$$U_1 = 600\,(e^{-0{,}03t} - e^{-2{,}5t})\ \mathrm{kV},$$

где t дано в μsec. Волновое сопротивление линии равно $w = 480\,\Omega$ емкость шин вместе со входной емкостью трансформаторов равна 10^{-9} F. На подходе линии поставлена катушка Кампоса с индуктивностью $L = 2{,}5$ mH, шунтированная сопротивлением $R = 1600\ \Omega$. Определить максимальное напряжение на трансформаторе.

Решение. Найдем условное сопротивление цепи. Как показано в предыдущей задаче, оно равно

$$Z(p) = \frac{p^2LC(R + w) + p(L + RCw) + R}{pC(R + pL)}.$$

Поэтому ток при единичной ЭДС равен

$$i = \frac{pC(R + pL)}{p^2LC(R + w) + p(L + RCw) + R}\cdot 1.$$

Напряжение на конденсаторе равно

$$U_c = \frac{i}{pC} = \frac{R + pL}{p^2LC(R + w) + p(L + RCw) + R}\cdot 1.$$

Таким образом, условное сопротивление для нахождения напряжения на трансформаторе (конденсаторе) равно

$$H(p) = \frac{p^2LC(R + w) + p(L + RCw) + R}{R + pL}.$$

Найдем корни уравнения $H(p) = 0$. Они равны в данном случае:

$$p = -\frac{L + RCw}{2LC(R + w)} \pm j\sqrt{\frac{R}{LC(R + w)} - \frac{(L + RCw)^2}{4L^2C^2(R + w)^2}} = -\alpha \pm j\omega.$$

Производная $H'(p)$ равна

$$H'(p) = \frac{L + RCw + 2pLC(R + w)}{R + pL}.$$

Если приложенное к цепи напряжение имеет форму апериодической волны, то формула Хевисайда принимает вид:

$$U_c = \frac{2U_1 e^{\lambda_1 t}}{H(\lambda_1)} - \frac{2U_1 e^{\lambda_2 t}}{H(\lambda_2)} + \sum_{p=p_1}^{p=p_n} \frac{2U_1 e^{pt}}{(p-\lambda_1)H'(p)} \sum_{p=p_1}^{p=p_n} \frac{2U_1 e^{pt}}{(p-\lambda_2)H'(p)}.$$

Так как первые два члена вычисляются легко, займемся определением третьего и четвертого члена:

$$\frac{U'_c}{2U_1} = \frac{e^{p_1 t}}{(p_1-\lambda_1)H'(p_1)} - \frac{e^{p_1 t}}{(p_1-\lambda_2)H'(p_1)} +$$

$$+ \frac{e^{p_2 t}}{(p_2-\lambda_1)H'(p_2)} - \frac{e^{p_2 t}}{(p_2-\lambda_2)H'(p_2)}.$$

Выражения, стоящие в знаменателе дробей правой части равенства, можно преобразовать следующим образом:

$$(p_1-\lambda_1)H'(p_1) =$$

$$= (-\alpha + j\omega - \lambda_1)\,\frac{L + RCw - 2\alpha LC(R+w) + 2j\omega LC(R+w)}{R - \alpha L + j\omega L} =$$

$$= (-\alpha - \lambda_1 + j\omega)\,\frac{2j\omega LC(R+w)}{R - \alpha L + j\omega L} =$$

$$= \frac{2\omega LC(R+w)(-\alpha-\lambda_1+j\omega)(\omega L + jR - j\alpha L)}{(R-\alpha L)^2 + \omega^2 L^2} =$$

$$= \frac{2\omega LC(R+w)[(-\alpha-\lambda_1)\omega L - (R-\alpha L)\omega + j\omega^2 L - j(R-\alpha L)(\alpha+\lambda_1)]}{(R-\alpha L)^2 + \omega^2 L^2} =$$

$$= \frac{2\omega LC(R+w)(A+jB)}{(R-\alpha L)^2 + \omega^2 L^2}.$$

Аналогичным путем получим:

$$(p_2-\lambda_1)H'(p_2) = \frac{2\omega LC(R+w)(A-jB)}{(R-\alpha L)^2 + \omega^2 L^2},$$

$$(p_1-\lambda_2)H'(p_1) = \frac{2\omega LC(R+w)(A_1+jB_1)}{(R-\alpha L)^2 + \omega^2 L^2},$$

$$(p_2-\lambda_2)H'(p_2) = \frac{2\omega LC(R+w)(A_1-jB_1)}{(R-\alpha L)^2 + \omega^2 L^2},$$

где

$$A_1 = -(\alpha+\lambda_2)\omega L - (R-\alpha L)\omega,$$

$$B_1 = \omega^2 L - (R-\alpha L)(\alpha+\lambda_2).$$

Поэтому

$$\frac{U'_c}{2U_1}=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{2\omega LC\,(R+w)}\left[\frac{e^{j\omega t}}{A+jB}+\frac{e^{-j\omega t}}{A-jB}-\frac{e^{j\omega t}}{A_1+jB_1}-\right.$$

$$\left.-\frac{e^{-j\omega t}}{A_1-jB_1}\right]=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{2\omega LC\,(R+w)}\left[\frac{e^{j\omega t}(A-jB)+e^{-j\omega t}(A+jB)}{A^2+B^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{e^{j\omega t}(A_1-jB_1)+e^{-j\omega t}(A_1+jB_1)}{A_1^2+B_1^2}\right]=$$

$$=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{2\omega LC\,(R+w)}\left[\frac{A\,(e^{j\omega t}+e^{-j\omega t})-jB\,(e^{j\omega t}-e^{-j\omega t})}{A^2+B^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{A_1\,(e^{j\omega t}+e^{-j\omega t})-jB_1\,(e^{j\omega t}-e^{-j\omega t})}{A_1^2+B_1^2}\right]=$$

$$=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{2\omega LC\,(R+w)}\left[\frac{2A\cos\omega t+2B\sin\omega t}{A^2+B^2}-\right.$$

$$\left.-\frac{2A_1\cos\omega t+2B_1\sin\omega t}{A_1^2+B_1^2}\right]=$$

$$=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{\omega LC\,(R+w)}\left[\left(\frac{A}{A^2+B^2}-\frac{A_1}{A_1^2+B_1^2}\right)\cos\omega t+\right.$$

$$\left.+\left(\frac{B}{A^2+B^2}-\frac{B_1}{A_1^2+B_1^2}\right)\sin\omega t\right]=$$

$$=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{\omega LC\,(R+w)}\,[A_2\cos\omega t+B_2\sin\omega t]=$$

$$=\frac{[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{\omega LC\,(R+w)}\sqrt{A_2^2+B_2^2}\,\sin(\omega t+\varphi),$$

где

$$\operatorname{tg}\varphi=\frac{A_2}{B_2}.$$

Окончательное выражение для U_c будет иметь такой вид:

$$U_c=\frac{2U_1e^{\lambda_1 t}(R+\lambda_1L)}{\lambda_1^2LC\,(R+w)+\lambda_1\,(L+RwC)+R}+\frac{2U\,e^{\lambda_2 t}(R+\lambda_2L)}{\lambda_2^2LC\,(R+w)+\lambda_2\,(L+RwC)+R}+$$

$$+\frac{2U_1\,[(R-\alpha L)^2+\omega^2L^2]\,e^{-\alpha t}}{\omega LC\,(R+w)}\sqrt{A_2^2+B_2^2}\,\sin(\omega t-\varphi).$$

Определим численные значения входящих в это уравнение величин.

$$\frac{R+\lambda_1 L}{\lambda_1^2 LC(R+w)+\lambda_1(L+RwC)+R}=$$

$$=\frac{1600-3\cdot 10^4\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3}}{9\cdot 10^8\cdot 2{,}5\cdot 10^{-12}\cdot 2{,}08\cdot 10^3-3\cdot 10^4(2{,}5\cdot 10^{-3}+1{,}6\cdot 4{,}8\cdot 10^{-4})+1600}=$$

$$=1{,}012,$$

$$\frac{R+\lambda_2 L}{\lambda_2^2 LC(R+w)+\lambda_2(L+RwC)+R}=$$

$$=\frac{1600-2{,}5\cdot 10^6\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3}}{6{,}25\cdot 2{,}5\cdot 2{,}08\cdot 10^3-2{,}5\cdot 10^6(2{,}5\cdot 10^{-3}+7{,}68\cdot 10^{-4})-1600}=$$

$$=-0{,}1793,$$

$$\alpha=\frac{L+RwC}{2LC(R+w)}=\frac{2{,}5\cdot 10^{-3}+7{,}68\cdot 10^{-4}}{2\cdot 2{,}5\cdot 10^{-12}\cdot 2{,}08\cdot 10^3}=3{,}15\cdot 10^5,$$

$$\omega=\sqrt{\frac{R}{LC(R+w)}-\alpha^2}=\sqrt{\frac{1600}{2{,}5\cdot 2{,}08\cdot 10^{-9}}-3{,}15^2\cdot 10^{10}}=$$

$$=4{,}565\cdot 10^5,$$

$$\frac{(R-\alpha L)^2+\omega^2 L^2}{\omega LC(R+w)}=\frac{(1\,600-3{,}15\cdot 10^5\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3})^2+(4{,}565\cdot 2{,}5)^2 10^4}{4{,}565\cdot 2{,}5\cdot 2{,}08\cdot 10^5}=$$

$$=8{,}27\cdot 10^8,$$

$$A=-(R-\alpha L)\omega-(\alpha+\lambda_1)\omega L=$$

$$=-(1\,600-3{,}15\cdot 10^5\cdot 2{,}5\cdot 10^{-3})\,4{,}565\cdot 10^5-$$

$$-(3{,}15\cdot 10^5-3\cdot 10^4)\,4{,}565\cdot 2{,}5\cdot 10^2=$$

$$=-3{,}708\cdot 10^8-3{,}252\cdot 10^8=-6{,}96\cdot 10^8,$$

$$B=-(R-\alpha L)(\alpha+\lambda_1)+\omega^2 L=-8{,}125\cdot 2{,}85\cdot 10^7+$$

$$+4{,}565^2\cdot 2{,}5\cdot 10^7=-2{,}316\cdot 10^8+5{,}21\cdot 10^8=2{,}894\cdot 10^8,$$

$$A_1=-(R-\alpha L)\omega-(\alpha+\lambda_2)\omega L=-3{,}708\cdot 10^8-$$

$$-(3{,}15\cdot 10^5-2{,}5\cdot 10^6)\,11{,}41\cdot 10^2=-3{,}708\cdot 10^8+24{,}93\cdot 10^8=$$

$$=2{,}122\cdot 10^9,$$

$$B_1=-(R-\alpha L)(\alpha+\lambda_2)+\omega^2 L=+8{,}125\cdot 2{,}185\cdot 10^8+5{,}21\cdot 10^8=$$

$$=17{,}75\cdot 10^8+5{,}21\cdot 10^8=2{,}296\cdot 10^9,$$

$$A^2+B^2=(6{,}96^2+2{,}894^2)\,10^{16}=5{,}688\cdot 10^{17},$$

$$A_1^2+B_1^2=(2{,}122^2+2{,}296^2)\,10^{18}=9{,}775\cdot 10^{18},$$

$$A_2=\frac{A}{A^2+B^2}-\frac{A_1}{A_1^2+B_1^2}=\frac{6{,}96\cdot 10^8}{5{,}688\cdot 10^{17}}-\frac{2{,}122\cdot 10^9}{9{,}775\cdot 10^{18}}=$$

$$=-1{,}441\cdot 10^{-9},$$

$$B_2 = \frac{B}{A^2 + B^2} - \frac{B_1}{A_1{}^2 + B_1{}^2} = \frac{2,894 \cdot 10^8}{5,688 \cdot 10^{17}} - \frac{2,296 \cdot 10^9}{9,775 \cdot 10^{18}} =$$

$$= 2,742 \cdot 10^{-10},$$

$$\sqrt{A_2{}^2 + B_2{}^2} = \sqrt{1,441^2 + 0,2742^2} \cdot 10^{-9} = 1,467 \cdot 10^{-9}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_2}{B_2} = -\frac{1,441 \quad 10^{-9}}{2,742 \cdot 10^{-10}} = -5,252,$$

$$\varphi = -79^\circ 13',$$

$$\frac{(R - \alpha L)^2 + \omega^2 L^2}{\omega LC(R + w)} \sqrt{A_2{}^2 + B_2{}^2} = 8,27 \quad 1,467 \cdot 10^8 \cdot 10^{-9} = 1,213.$$

Подставляя эти значения в выражение для U_c, найдем:

$$U_c = 1200\ [1,012 e^{-0,03t} + 0,1793 e^{-2,5t} +$$

$$+ 1,213 e^{-0,315t} \sin(\omega t - 79^\circ 13')].$$

Максимум этой функции приближенно найдем, положив

$$\sin(\omega t - 79^\circ 13') = 1.$$

Тогда

$$\omega t - 79^\circ 13' = \frac{\pi}{2},$$

$$t = \frac{\frac{\pi}{2} + 79^\circ 13'}{\omega} = \frac{1,57 + 1,382}{4,565 \cdot 10^5} = 6,465 \quad 10^{-6}.$$

$$U_c \cong 1200\,[1,012 e^{-0,03 \quad 6,465} + 1,213 \cdot e^{-0,315 \cdot 6,465}] =$$

$$= 1200\,(0,834 + 0,158) = 1191 \text{ kV}.$$

№ 402. По линии, имеющей волновое сопротивление $w = 430\ \Omega$, на подстанцию приходит волна, определяемая уравнением

$$U_1 = 400\,(e^{-0,2t} - e^{-3,0t}) \text{ kV},$$

где t — дано в μsec. Входная емкость трансформаторов вместе с емкостью шин равна $8 \cdot 10^{-10}$ F. На линии у подстанции поставлена катушка Кампоса, имеющая сопротивление $R = 1400\ \Omega$ и индуктивность $L = 5$ mH. Определить наибольшее напряжение трансформатора.

№ 403. Переход 100-kV линии через реку осуществлен при помощи кабеля, имеющего емкость $C = 0,1\ \mu$F и сопротивление потерь, равное $R = 64\ \Omega$. Волновое сопротивление линии равно $w = 480\ \Omega$. Определить наибольшее напряжение в кабеле, если с линии в кабель проходит волна, выражаемая уравнением

$$U_1 = 600\,(e^{-0,08t} - e^{-3,8t}) \text{ kV},$$

где t — в μsec.

Решение. При решении этой задачи мы можем приближенно заменить участок кабеля сосредоточенной емкостью, включенной между линией и землей по схеме рис. 63. Для общности решения предположим сначала, что $w_2 \neq w_1$. Предполагая параллельно включенными сопротивления двух ветвей (w_2) и (R, C), получим:

$$w' = \frac{1}{\frac{1}{w_2} + \frac{1}{R + \frac{1}{pC}}} = \frac{w_2(1 + pRC)}{1 + pC(R + w_2)}.$$

Условное сопротивление цепи равно

$$Z(p) = w_1 + w' = w_1 + \frac{w_2(1 + pRC)}{1 + pC(R + w_2)} =$$

$$= \frac{(w_1 + w_2)\left[1 + pC\left(R + \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2}\right)\right]}{1 + pC(R + w_2)} = \frac{(w_1 + w_2)(1 + pCR_0)}{1 + pC(R + w_2)},$$

где

$$R_0 = R + \frac{w_1 w_2}{w_1 + w_2} = 64 + \frac{480}{2} = 304\ \Omega.$$

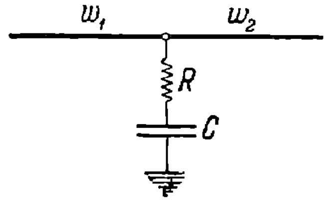

Рис. 63.

Ток в цепи будет равен

$$i = \frac{2U_1}{Z(p)} = \frac{2U_1[1 + pC(R + w_2)]}{(w_1 + w_2)(1 + pCR_0)}.$$

Напряжение на конденсаторе найдем, умножая ток на сопротивление w':

$$U_c = iw' = \frac{2U_1[1 + pC(R + w_2)]}{(w_1 + w_2)(1 + pCR_0)} \cdot \frac{w_2(1 + pCR)}{1 + pC(R + w_2)} =$$

$$= \frac{2U_1 w_2(1 + pCR)}{(w_1 + w_2)(1 + pCR_0)}.$$

Условное сопротивление в этом случае получается равным

$$H(p) = \frac{(w_1 + w_2)(1 + pCR_0)}{w_2(1 + pCR)}.$$

Корень уравнения $H(p) = 0$ будет равен

$$p = -\frac{1}{CR_0}.$$

Находим производную $H'(p)$:

$$H'(p) = \frac{(w_1 + w_2)CR_0}{w_2(1 + pCR)}.$$

Подставим полученные величины в формулу Хевисайда:

$$U_c = \frac{2U_1 e^{\lambda_1 t}}{H(\lambda_1)} - \frac{2U_1 e^{\lambda_2 t}}{H(\lambda_2)} + \frac{2U_1 e^{p_1 t}}{(p_1 - \lambda_1) H'(p_1)} - \frac{2U_1 e^{p_1 t}}{(p_1 - \lambda_2) H'(p_1)} =$$

$$= \frac{2U_1 w_2 (1 + \lambda_1 CR) e^{\lambda_1 t}}{(w_1 + w_2)(1 + \lambda_1 CR_0)} - \frac{2U_1 w_2 (1 + \lambda_2 CR) e^{\lambda_2 t}}{(w_1 + w_2)(1 + \lambda_2 CR_0)} +$$

$$+ \frac{2U_1 w_2 \left(1 - \frac{R}{R_0}\right) e^{p_1 t}}{\left(-\frac{1}{CR_0} - \lambda_1\right)(w_1 + w_2) CR_0} - \frac{2U_1 w_2 \left(1 - \frac{R}{R_0}\right) e^{p_1 t}}{\left(-\frac{1}{CR_0} - \lambda_2\right)(w_1 + w_2) CR_0} =$$

$$= \frac{2U_1 w_2}{w_1 + w_2} \left[\frac{e^{\lambda_1 t}(1 + \lambda_1 CR)}{1 + \lambda_1 CR_0} - \frac{e^{\lambda_2 t}(1 + \lambda_2 CR)}{1 + \lambda_2 CR_0} - \right.$$

$$\left. - \frac{e^{p_1 t}\left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}{1 + \lambda_1 CR_0} + \frac{e^{p_1 t}\left(1 - \frac{R}{R_0}\right)}{1 + \lambda_2 CR_0} \right] =$$

$$= \frac{2U_1 w_2}{w_1 + w_2} \left[\frac{1 + \lambda_1 CR}{1 + \lambda_1 CR_0} e^{\lambda_1 t} - \frac{1 + \lambda_2 CR}{1 + \lambda_2 CR_0} e^{\lambda_2 t} + \right.$$

$$\left. + \left(1 - \frac{R}{R_0}\right)\left(\frac{1}{1 + \lambda_2 CR_0} - \frac{1}{1 + \lambda_1 CR_0}\right) e^{p_1 t} \right].$$

Подставим численные значения входящих в эту формулу величин:

$$U_c = \frac{2 \cdot 600 \cdot 480}{960} \left[\frac{1 - 8 \cdot 10^4 \;\; 10^{-7} \cdot 64}{1 - 8 \cdot 10^{-3} \cdot 304} e^{-0{,}08t} - \frac{1 - 3{,}8 \;\; 10^{-1} \cdot 64}{1 - 3{,}8 \cdot 10^{-1} \cdot 304} e^{-3{,}8t} + \right.$$

$$\left. + \left(1 - \frac{64}{304}\right)\left(\frac{1}{1 - 3{,}8 \;\; 10^{-1} \cdot 304} - \frac{1}{1 - 8 \cdot 10^{-3} \cdot 304}\right) e^{-\frac{t}{30{,}4}} \right] =$$

$$= 600\left[-0{,}341 e^{-0{,}08t} - 0{,}204 e^{-3{,}8t} + 0{,}545 e^{-0{,}0329t}\right] =$$

$$= 327\left[e^{-0{,}0329t} - 0{,}626 e^{-0{,}08t} - 0{,}374 e^{-3{,}8t}\right].$$

При определении максимума этой функции мы можем пренебречь третьим членом, так как он затухает очень быстро. Уже при $t = 1$ µsec, его величина составит только 0,0084, в то время как первый член будет равен $\sim 0{,}97$. Тогда мы можем написать:

$$-0{,}0329 e^{-0{,}0329 t_1} + 0{,}626 \cdot 0{,}08 \cdot e^{-0{,}08 t_1} = 0,$$

$$e^{(0{,}08 - 0{,}0329) t_1} = \frac{0{,}626 \cdot 0{,}08}{0{,}0329} = 1{,}523,$$

$$t_1 = \frac{\ln 1{,}523}{0{,}0471} = \frac{0{,}4205}{0{,}0471} = 8{,}93 \text{ µsec}.$$

Поэтому

$$U_{c_{max}} = 327\left(e^{-0{,}0329 \cdot 8{,}93} - 0{,}626 e^{-0{,}08 \cdot 8{,}93}\right) =$$

$$= 327(0{,}745 - 0{,}3066) = 143{,}3 \text{ kV}.$$

№ 404. Переход 35-kV линии через реку осуществлен кабелем, имеющим емкость $C = 0{,}15\ \mu F$ и сопротивление потерь, равное $R = 210\ \Omega$. Волновое сопротивление линии равно $w = 400\ \Omega$. Найти наибольшее напряжение в кабеле, если приходящая волна определяется уравнением

$$U_1 = 600\left(e^{-0{,}02t} - e^{-6{,}4t}\right)\ kV$$

(t — в μsec).

№ 405. Генератор присоединен к шинам при помощи кабеля, имеющего емкость $C = 0{,}05\ \mu F$ и сопротивление потерь $R = 170\ \Omega$. Волновое сопротивление линии — 250 Ω, генератора — 300 Ω. Найти максимальное напряжение на генераторе, если падающая волна выражается уравнением

$$U_1 = 250\,(e^{-0{,}03t} - e^{-4{,}5t})\ kV,$$

где t — в μsec, и если нейтраль генератора заземлена наглухо.

№ 406. Прямоугольная волна с амплитудой $U_1 = 500$ kV идет с линии на трансформатор. Перед трансформатором, на расстоянии 60 m от него, находится разрядник, установленный так, что он дает разряд при импульсном напряжении $U_0 = 560$ kV. Определить напряжение на трансформаторе, если волновое сопротивление линии равно 450 Ω, а емкость трансформатора $2{,}4 \cdot 10^{-9}$ F.

Примечание. Амплитуда приходящей волны недостаточна для того, чтобы вызвать действие разрядника. Отраженная от трансформатора волна, складываясь с падающей, будет достаточна для действия разрядника, который срежет волну. Напряжение на трансформаторе будет расти в течение того времени, которое нужно для отраженной волны, чтобы дойти от трансформатора до разрядника и нарасти до величины, вызывающей разряд, а также в течение того времени, которое нужно отраженной от разрядника отрицательной волне, чтобы дойти до трансформатора.

№ 407. Волна, выражаемая уравнением

$$U_1 = 500\,(e^{-0{,}02t} - e^{-6{,}4t})\ kV,$$

где t — в μsec, идет с линии на трансформатор, перед которым на расстоянии 60 m установлен разрядник, дающий разряд при 560 kV. Определить напряжение на трансформаторе, если волновое сопротивление линии равно 450 Ω, а емкость трансформатора равна $2{,}4 \cdot 10^{-9}$ F.

№ 408. Волна перенапряжения, определяемая уравнением

$$U_1 = 4000\,(e^{-0{,}05t} - e^{-2{,}0t})\ kV$$

(где t — в μsec), проходя по проводу мимо опоры, вызвала разряд по поверхности изоляторов при напряжении $U_0 = 1200$ kV. Сопротивление заземления опоры $R = 200\ \Omega$. Определить форму волны, которая пойдет по линии дальше.

№ 409. Определить наибольшее сопротивление заземления, которое может иметь стреляющий разрядник, установленный перед подстанцией, если наибольшая амплитуда волны, приходящей с линии, равна 1500 kV, а импульсное разрядное напряжение разрядника равно 600 kV. Волновое сопротивление линии до и после разрядника равно 500 Ω.

Примечание. Воспользоваться решением предыдущей задачи. Напряжение за разрядником не должно быть выше 600 kV.

№ 410. Определить затухание волны перенапряжения на подходе к подстанции, если длина подхода равна $l = 2$ km, амплитуда волны равна $U_0 = 800$ kV и длина ее $T = 40$ μsec. Волна отрицательная.

Решение. Затухание волны при движении ее по линии может быть определено эмпирической формулой Менджера:

$$U = \frac{U_0}{1 + klU_0},$$

где U_0 — начальная амплитуда волны, l — длина пробега волны и k — коэфициент, зависящий от длины и полярности волны.

Этот коэфициент может быть выражен эмпирической формулой:

$$\text{положительная волна: } k = \frac{16{,}9 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{T}};$$

$$\text{отрицательная волна: } k = \frac{12 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{T}},$$

где T — длина волны.

Подставляя в эту формулу заданную условием задачи длину волны, найдем:

$$k = \frac{12 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{40}} \cong 1{,}9 \cdot 10^{-4}$$

Поэтому амплитуда волны после пробега ею 2 km будет равна:

$$U = \frac{800}{1 + 1{,}9 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 800} = 613\ \text{kV}.$$

№ 411. Найти амплитуду срезанной разрядом волны после пробега ею 1,5 km, если начальная амплитуда волны равна 1500 kV, длина ее — 1,5 μsec, полярность отрицательная.

№ 412. Трубчатый разрядник, стоящий на первой опоре подхода к подстанции, ограничивает напряжение волны, приходящей с линии на подход, величиною 2200 kV. Определить длину подхода так, чтобы на подстанцию не могла прийти волна с амплитудой выше 1200 kV.

Примечание. Наименьшее затухание дают наиболее длинные волны. За наиболее длинную волну взять волну длиною 40 μsec.

№ 413. Удар молнии в провод линии передачи вызвал на ней положительную волну с амплитудой 2700 kV длиною 25 μsec. Найти, на каком расстоянии от места удара амплитуда волны упадет до 1000 kV.

№ 414. Молния ударила в провод линии передачи и создала на нем отрицательную волну с амплитудой 12 000 kV. Катодный осциллограф, находившийся на расстоянии 6,5 km от места удара, отметил волну в 5000 kV. Определить коэфициент затухания.

№ 415. Определить волновое сопротивление провода линии передачи без учета и с учетом влияния короны, если дан диаметр провода 13,85 mm, высота провода над землей 8 m и напряжение волны 2000 kV.

Решение. Волновое сопротивление провода без учета короны определяется уравнением

$$w = 60 \ln \frac{2h}{r},$$

где h — высота провода над землей и r — радиус провода.

Поэтому

$$w = 60 \ln \frac{2 \cdot 800}{0,6925} = 472 \ \Omega.$$

При больших напряжениях около проводов образуется корона, которая повышает емкость проводов, не влияя на их самоиндукцию. В силу этого волновое сопротивление провода должно вычисляться по следующей формуле:

$$w = 60 \sqrt{\ln \frac{2h}{r} \ln \frac{2h}{r_1}},$$

где r_1 — радиус провода вместе со слоем ионизированного воздуха, образующим корону. Для определения этого радиуса воспользуемся эмпирической формулой:

$$r_1 = r + k(U - U_0),$$

где U_0 — коронное напряжение провода, а k — коэфициент, различный для волн разной полярности:

для положительных волн — $k = 0,02$,
„ отрицательных „ — $k = 0,0035$.

Определим коронное напряжение провода:

$$U_0 = mgr \ln \frac{2h}{r} = 0{,}85 \cdot 30 \left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{0{,}6925}}\right) \cdot 0{,}6925 \ln \frac{1600}{0{,}6925} = $$
$$= 189{,}3.$$

Далее, найдем:

$$r_{1+} = 0{,}6925 + 0{,}02\,(2000 - 189{,}3) = 36{,}91 \text{ cm},$$
$$r_{1-} = 0{,}6925 + 0{,}0035\,(2000 - 189{,}3) = 7{,}032 \text{ cm}.$$

Таким образом, волновое сопротивление при учете короны будет равно:

$$w_{+} = 60 \sqrt{\ln \frac{1600}{0{,}6925} \quad \ln \frac{1600}{36{,}91}} = 327 \ \Omega.$$
$$w_{-} = 60 \sqrt{\ln \frac{1600}{0{,}6925} \cdot \ln \frac{1600}{7{,}032}} = 392 \ \Omega.$$

№ 416. При положительном ударе молнии в трос напряжение на нем поднялось до 2500 kV. Найти его волновое сопротивление, зная диаметр троса, равный 10,6 mm, и высоту подвеса его над землей $h = 13$ m.

№ 417. При отрицательном ударе молнии в опору произошел разряд с опоры на все три провода и по проводам пошла волна с амплитудой 1800 kV. Найти волновое сопротивление проводов, если их радиус равен $r = 8{,}5$ mm, расстояние между проводами $S = 4{,}5$ m, высота проводов над землей $h = 18$ m.

Примечание. Когда волна распространяется одновременно по всем проводам, их взаимное влияние уменьшает волновое сопротивление и последнее может быть рассчитано по среднему геометрическому радиусу системы из 3 проводов. При горизонтальном расположении проводов средний геометрический радиус равен

$$r_c = 1{,}166 \sqrt[3]{rS^2}.$$

№ 418. При отрицательном ударе молнии в опору, по двум тросам, укрепленным на ее вершине и металлически соединенным друг с другом, пошла волна с амплитудой 3000 kV. Найти волновое сопротивление тросов, если их радиус равен $r = 4{,}5$ mm, расстояние между ними $S = 3{,}5$ m и высота их над землей равна $h = 12$ m.

Примечание. Средний геометрический радиус системы из двух проводов равен

$$r_c = \sqrt{rS}.$$

№ 419. В один из проводов линии передачи с деревянными опорами попал отрицательный удар молнии, вызвавший повышение напряжения до 7000 kV. Найти волновое сопротивление провода, зная его диаметр 12,6 cm и высоту его над землей $h = 8$ m.

№ 420. Положительная индуктированная волна с амплитудой 300 kV идет по трем проводам линии передачи, провода которой имеют диаметр 8,25 mm, расположены на расстоянии 2,5 m друг от друга и имеют высоту 10 m над землей. Найти волновое сопротивление проводов.

№ 421. Линия имеет расположение проводов и троса, показанное на рис. 64. Диаметр троса 9 mm. Определить коэфициенты связи троса с каждым из проводов.

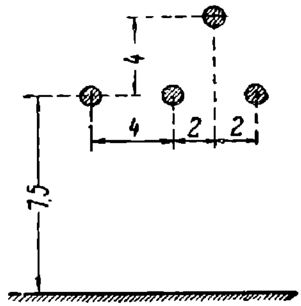

Рис. 64.

Решение. Коэфициентом связи троса и провода называется отношение взаимного волнового сопротивления w_{12} троса 1 и провода 2 к волновому сопротивлению w_1 троса. Взаимное волновое сопротивление троса 1 и провода 2 определяется равенством:

$$w_{12} = 60 \ln \frac{\sqrt{(h_1 + h_2)^2 + b_{12}^2}}{\sqrt{(h_1 - h_2)^2 + b_{12}^2}} = 30 \ln \frac{(h_1 + h_2)^2 + b_{12}^2}{(h_1 - h_2)^2 + b_{12}^2}.$$

Для других проводов получим:

$$w_{13} = 30 \ln \frac{(h_1 + h_3)^2 + b_{13}^2}{(h_1 - h_3)^2 + b_{13}^2},$$

$$w_{14} = 30 \ln \frac{(h_1 + h_4)^2 + b_{14}^2}{(h_1 - h_4)^2 + b_{14}^2}.$$

Волновое сопротивление троса равно $w_{11} = 60 \ln \frac{2h_1}{r}$.

Таким образом, коэфициенты связи будут равны:

$$a_{12} = \frac{w_{12}}{w_{11}} = \frac{30 \ln \frac{(h_1 + h_2)^2 + b_{12}^2}{(h_1 - h_2)^2 + b_{12}^2}}{60 \ln \frac{2h_1}{r}} =$$

$$= \frac{\ln \frac{(11,5 + 7,5)^2 + 6^2}{(11,5 - 7,5)^2 + 6^2}}{2 \ln \frac{2300}{0,45}} = \frac{\ln 7,635}{2 \ln 5110} = 0,1192,$$

$$a_{13} = a_{14} = \frac{\ln \frac{19^2 + 2^2}{4^2 + 2^2}}{2 \ln 5110} = 0,170.$$

№ 422. Линия с двумя цепями имеет один трос и провода, расположенные, как показано на рис. 65. Диаметр троса—10,6 mm. Определить коэфициенты связи троса с проводами.

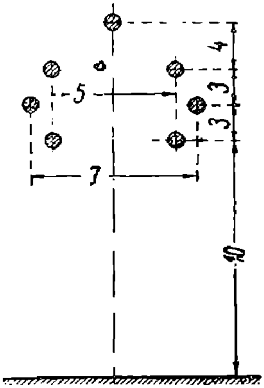

Рис. 65.

№ 423. Отрицательный удар молнии попал в трос линии передачи, расположение проводов и троса которой дано на рис. 66. Потенциал троса после удара достиг 5000 kV. Определить наибольший коэфициент связи троса и проводов, если диаметр троса равен 10,6 mm.

Примечание. Учесть влияние короны на трос.

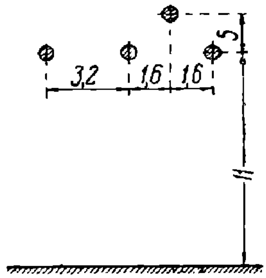

Рис. 66.

№ 424. Положительный удар молнии попал в трос линии передачи, расположение проводов и троса которой показано на рис. 67. Потенциал троса после удара достиг 4500 kV. Определить наибольший коэфициент связи троса и провода, зная диаметр троса, равный 10,6 mm

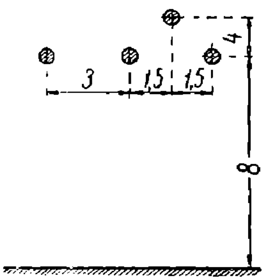

Рис. 67.

V **№ 425.** Линия передачи на 110 kV имеет провода и тросы, расположенные, как показано на рис. 68. При ударе молнии в опору по обоим тросам движется волна с амплитудой 2500 kV положительного знака. Определить возможную наибольшую разность потенциалов между тросом и проводом, зная диаметр троса — 9 mm.

Примечание. Напряжение, индуктированное в проводе, равно напряжению на тросе, умноженному на коэфициент связи.

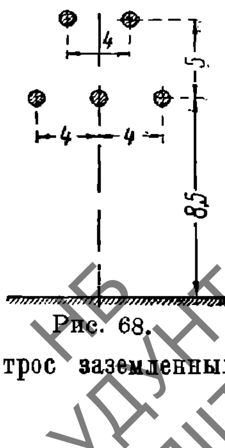

Рис. 68.

№ 426. В один из тросов линии передачи на 110 kV, устройство которой изображено на рис. 68, ударила молния, вследствие чего по тросу пошла волна с амплитудой 2200 kV отрицательного знака. Определить наибольшую возможную разность потенциалов между тросом и проводом, зная диаметр троса 9 mm и считая второй трос заземленным.

Решение. Обозначим тросы номерами 1 и 2 (молния ударила в № 1), а провода — номерами 3, 4 и 5. Тогда для системы проводов и тросов нашей линии можно написать следующий ряд преобразованных Максвелловских уравнений:

$$\left.\begin{aligned}
U_1 &= i_1 w_1 + i_2 w_{12} + i_3 w_{13} + i_4 w_{14} + i_5 w_{15},\\
U_2 &= i_1 w_{12} + i_2 w_2 + i_3 w_{23} + i_4 w_{24} + i_5 w_{25},\\
U_3 &= i_1 w_{13} + i_2 w_{23} + i_3 w_3 + i_4 w_{34} + i_5 w_{35},\\
U_4 &= i_1 w_{14} + i_2 w_{24} + i_3 w_{34} + i_4 w_4 + i_5 w_{45},\\
U_5 &= i_1 w_{15} + i_2 w_{25} + i_3 w_{35} + i_4 w_{45} + i_5 w_5.
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

Считая провода изолированными, мы должны положить токи в них равными 0. Поэтому система уравнений (1) принимает следующий вид:

$$\left.\begin{aligned}
U_1 &= i_1 w_1 + i_2 w_{12},\\
U_2 &= i_1 w_{12} + i_2 w_2 = 0,\\
U_3 &= i_1 w_{13} + i_2 w_{23},\\
U_4 &= i_1 w_{14} + i_2 w_{24},\\
U_5 &= i_1 w_{15} + i_2 w_{25},
\end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Отсюда получим:

$$i_2 = -i_1 \frac{w_{12}}{w_2}.$$

Подставляя значение тока i_2 во все уравнения системы (2), кроме второго, найдем:

$$\left.\begin{aligned}
U_1 &= \left(w_1 - \frac{w_{12}^2}{w_2}\right) i_1,\\
U_3 &= \left(w_{13} - \frac{w_{12} w_{23}}{w_2}\right) i_1,\\
U_4 &= \left(w_{14} - \frac{w_{12} w_{24}}{w_2}\right) i_1,\\
U_5 &= \left(w_{15} - \frac{w_{12} w_{25}}{w_2}\right) i_1.
\end{aligned}\right\} \qquad (3)$$

Разделяя почленно уравнения второе, третье и четвертое системы (3) на первое уравнение той же системы, получим:

$$\frac{U_3}{U_1} = a_{13} = \frac{w_{13} - \dfrac{w_{12} w_{23}}{w_2}}{w_1 - \dfrac{w_{12}^2}{w_2}} = \frac{w_{13} w_2 - w_{12} w_{23}}{w_1 w_2 - w_{12}^2},$$

$$\frac{U_4}{U_1} = a_{14} = \frac{w_{15} w_2 - w_{12} w_{24}}{w_1 w_2 - w_{12}^2},$$

$$\frac{U_5}{U_1} = a_{15} = \frac{w_{15} w_2 - w_{12} w_{25}}{w_1 w_2 - w_{12}^2}.$$

Определим входящие в эти выражения волновые сопротивления:

$$w_1 = 60 \ln \frac{2h_1}{r_1} = 60 \ln \frac{2700}{r_1},$$

$$r_1 = r + 0{,}0035\,(2200 - U_0),$$

$$U_0 = 0{,}85 \cdot 30 \left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{0{,}45}}\right) 0{,}45 \ln \frac{2700}{0{,}45} = 145 \text{ kV},$$

$$r_1 = 0{,}45 + 0{,}0035\,(2200 - 145) = 72{,}4 \text{ cm},$$

$$w_1 = 60 \ln \frac{2700}{72{,}4} = 217\ \Omega,$$

$$w_2 = 60 \ln \frac{2\,700}{0{,}45} = 522\ \Omega,$$

$$w_{12} = 30 \ln \frac{27^2+4^2}{4^2} = 115{,}2\ \Omega,$$

$$w_{13} = w_{14} = 30 \ln \frac{22^2+2^2}{5^2+2^2} = 84{,}9\ \Omega,$$

$$w_{15} = 30 \ln \frac{22^2+6^2}{5^2+6^2} = 64{,}2\ \Omega,$$

$$w_{23} = w_{15} = 64{,}2\ \Omega,$$

$$w_{24} = w_{25} = w_{13} = 84{,}9\ \Omega.$$

Определив волновые сопротивления, мы можем вычислить и коэфициенты связи.

$$a_{13} = \frac{w_{13}w_2 - w_{12}w_{23}}{w_1 w_2 - w_{12}^2} = \frac{84{,}9 \cdot 522 - 115{,}2 \cdot 64{,}2}{217 \cdot 522 - 115{,}2^2} = 0{,}369,$$

$$a_{14} = \frac{w_{14}w_2 - w_{12}w_{24}}{w_1 w_2 - w_{12}^2} = \frac{84{,}9 \cdot 522 - 115{,}2 \cdot 84{,}9}{10^5} = 0{,}345,$$

$$a_{15} = \frac{w_{15}w_2 - w_{12}w_{25}}{w_1 w_2 - w_{12}^2} = \frac{64{,}2 \cdot 522 - 115{,}2 \cdot 84{,}9}{10^5} = 0{,}238.$$

Наименьшим оказался коэфициент связи a_{15}. Поэтому наибольшая возможная разность потенциалов между проводом и тросом равна

$$U = 2200\,(1 - 0{,}238) + 110 \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} = 1766 \text{ kV}.$$

№ 427. В один из тросов линии передачи на 220 kV, устройство которой изображено на рис. 69, попал отрицательный удар молнии, вследствие чего по тросу прошла волна с амплитудой 3200 kV. Определить возможную наибольшую разность потенциалов между тросом и проводом, предполагая диаметр троса равным 24,4 mm.

№ 428. Определить волновое сопротивление вертикального провода, заземляющего трос, зная высоту провода $h = 15$ m, его радиус $r = 0{,}5$ cm.

Решение. При определении волнового сопротивления вертикального провода, будем исходить из того положения, что при волнах импульсного характера можно считать

$$L_1 \cong \frac{1}{v^2 C_1},$$

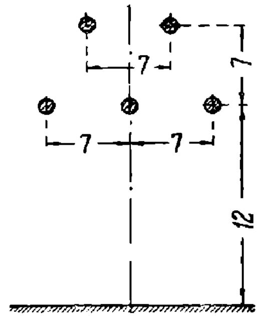

Рис. 69.

где L_1 — самоиндукция, C_1 — емкость на единицу длины проводника, и v — скорость движения волны, приблизительно равная скорости света.

В силу этого

$$w = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = \frac{1}{vC_1}:$$

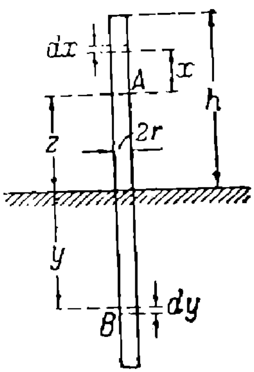

Рис. 70.

Таким образом, определение волнового сопротивления сводится к определению емкости провода.

При определении емкости, учтем влияние земли, заменяя землю зеркальным изображением провода. За плоскость нулевого потенциала мы примем поверхность земли, так как обычно ось обратного тока, идущего через землю при импульсах, лежит на очень небольшой глубине. При таком предположении расчетная схема будет иметь вид, изображенный на рис. 70.

Определим потенциал, создаваемый в проводнике зарядом, распределенным на его поверхности. Предполагая плотность заряда на поверхности проводника постоянной и равной σ, получим заряд на длине проводника dx равным $dq = 2\pi r\sigma dx$.

Полный заряд на проводнике равен $Q = 2\pi r\sigma h$.

На зеркальном изображении проводника предполагаем сосредоточенным равный заряд противоположного знака.

Возьмем на проводнике точку A и определим потенциал, создаваемый в ней зарядом, распределенным на проводнике. Длина провода выше точки A пусть будет равна ah, а ниже этой точки — $(1-a)h$, где $0 < a < 1$. Возьмем элемент проводника dx, расположенный на x выше точки A. Заряд, сосредоточенный на этом элементе, создает на поверхности проводника у точки A потенциал, равный

$$dU = \frac{dq}{R} = \frac{2\pi r\sigma dx}{\sqrt{x^2+r^2}}.$$

Интегрируя это выражение в пределах от 0 до ah, найдем потенциал, создаваемый в точке A верхней частью проводника:

$$U_1 = 2\pi r\sigma \int_0^{ah} \frac{dx}{\sqrt{x^2+r^2}} = \left| 2\pi r\sigma \ln\left[\frac{x}{r} + \sqrt{1+\left(\frac{x}{r}\right)^2}\right] \right|_0^{ah} =$$

$$= 2\pi r\sigma \ln\left[\frac{ah}{r} + \sqrt{1+\left(\frac{ah}{r}\right)^2}\right] = 2\pi r\sigma \cdot \operatorname{arsh}\frac{ah}{r}.$$

Таким же образом найдем, что потенциал U_2, создаваемый в точке A зарядом, распределенным на нижней части проводника, будет равен

$$U_2 = 2\pi r\sigma \ln\left[\frac{(1-a)h}{r} + \sqrt{1+\frac{(1-a)^2h^2}{r^2}}\right] =$$

$$= 2\pi r\sigma \cdot \operatorname{arsh}\frac{(1-a)h}{r}.$$

Суммируя полученные частичные потенциалы U_1 и U_2, найдем действительный потенциал в точке A:

$$U = U_1 + U_2 = 2\pi r\sigma\left[\operatorname{arsh}\frac{ah}{r} + \operatorname{arsh}\frac{(1-a)h}{r}\right].$$

Это выражение показываст, что потенциал U зависит от величины a, т. е. от положения точки A. У концов проводника он будет меньше, у середины — больше. Найдем среднее значение потенциала провода:

$$U_c = 2\pi r\sigma \int_0^1 \left[\operatorname{arsh}\frac{ah}{r} + \operatorname{arsh}\frac{(1-a)h}{r}\right] da.$$

Этот интеграл можно взять. Он равен

$$U_c = 2r\pi\sigma \cdot \frac{r}{h} \left| \frac{ah}{r}\operatorname{arsh}\frac{ah}{r} - \sqrt{1+\left(\frac{ah}{r}\right)^2} - \right.$$

$$\left. - \frac{(1-a)h}{r}\operatorname{arsh}\frac{(1-a)h}{r} + \sqrt{1+\frac{(1-a)^2h^2}{r^2}} \right|_0^1 =$$

$$= 4\pi r\sigma\left[\operatorname{arsh}\frac{h}{r} - \frac{r}{h}\left(\sqrt{1+\left(\frac{h}{r}\right)^2} - 1\right)\right].$$

Это выражение можно упростить, принимая во внимание, что $\left(\frac{h}{r}\right)^2 \gg 1$. Тогда

$$U_c \cong 4\pi r\sigma\left(\ln\frac{2h}{r} - 1 + \frac{r}{h}\right).$$

Определим теперь потенциал, создаваемый на проводнике его зеркальным изображением. Элемент dy зеркального изображения создает в точке A потенциал

$$dU' = \frac{dq}{R'} = -\frac{2\pi r\sigma dy}{\sqrt{(y+z)^2 + r^2}}.$$

Поэтому зеркальное изображение создает в точке A потенциал

$$U' = -\int_0^h \frac{2\pi r\sigma dy}{\sqrt{(y+z)^2 + r^2}} = -\left| 2\pi r\sigma \cdot \operatorname{arsh}\frac{y+z}{r}\right|^h =$$

$$= -2\pi r\sigma\left(\operatorname{arsh}\frac{h+z}{r} - \operatorname{arsh}\frac{z}{r}\right).$$

Средний потенциал на проводнике будет равен

$$U_c' = -\frac{2\pi r\sigma}{h}\int_0^h\left(\operatorname{arsh}\frac{h+z}{r} - \operatorname{arsh}\frac{z}{r}\right)dz =$$

$$= -\frac{2\pi r\sigma}{h}\left|(h+z)\operatorname{arsh}\frac{h+z}{r} - r\sqrt{1+\left(\frac{h+z}{r}\right)^2} -\right.$$

$$\left.- z\operatorname{arsh}\frac{z}{r} + r\sqrt{1+\frac{z^2}{r^2}}\right|_0^h = -4\pi r\sigma\left[\operatorname{arsh}\frac{2h}{r} -\right.$$

$$\left.- \operatorname{arsh}\frac{h}{r} + \frac{r}{h}\sqrt{1+\left(\frac{h}{r}\right)^2} - \frac{r}{2h}\sqrt{1+\left(\frac{2h}{r}\right)^2} - \frac{r}{2h}\right].$$

Упростим это уравнение, помня, что $\left(\frac{h}{r}\right)^2 \gg 1$:

$$U_c' \cong -4\pi r\sigma\left(\ln\frac{4h}{r} - \ln\frac{2h}{r} + 1 - 1 - \frac{r}{2h}\right) =$$

$$= -4\pi r\sigma\left(\ln 2 - \frac{r}{2h}\right).$$

Полный потенциал на проводнике будет равен

$$U = U_c + U_c' = 4\pi r\sigma\left(\ln\frac{2h}{r} - 1 + \frac{r}{h} - \ln 2 + \frac{r}{2h}\right) =$$

$$= 4\pi r\sigma\left(\ln\frac{h}{r} - 1 + \frac{3r}{2h}\right).$$

Емкость проводника найдем, разделяя заряд Q на потенциал U:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi r\sigma h}{4\pi r\sigma\left(\ln\frac{h}{r} - 1 + \frac{3r}{2h}\right)} =$$

$$= \frac{h}{2\left(\ln\frac{h}{r} - 1 + \frac{3r}{2h}\right)}.$$

Емкость на единицу длины проводника равна

$$C_1 = \frac{C}{h} = \frac{1}{2\left(\ln\frac{h}{r} - 1 + \frac{3r}{2h}\right)}.$$

Теперь мы можем определить и волновое сопротивление w. В практических единицах оно будет равно:

$$w = \frac{30}{C_1} = 60\left(\ln\frac{h}{r} - 1 + \frac{3r}{2h}\right)\,\Omega. \tag{1}$$

Если r — мало, как в нашем случае, то уравнение (1) можно еще упростить, отбросив в нем последний член:

$$w \cong 60\left(\ln\frac{h}{r} - 1\right)\,\Omega. \tag{2}$$

Подставляя численные значения, найдем:

$$w = 60\left(\ln\frac{1500}{0{,}5} - 1\right) = 420\ \Omega.$$

№ 429. Трос заземлен при помощи двух вертикальных оттяжек, имеющих диаметр 0,9 cm и расположенных на расстоянии 5 m одна от другой. Высота оттяжек — 16 m. Определить волновое сопротивление оттяжек.

Примечание. Ввести в расчет средний геометрический радиус двух оттяжек.

№ 430. Деревянная П-образная опора имеет заземление троса, выполненное в виде двух заземляющих проводов, проложенных по двум ногам опоры. Диаметр заземляющих проводов равен 10,8 mm, расстояние между ногами опорами — 4 m, высота опоры — 15 m. Определить волновое сопротивление опоры, предполагая, что по ней идет отрицательная волна с напряжением 1 000 kV.

Примечание. Воспользоваться решением задач № 415 и № 429.

№ 431. Решить предыдущую задачу, предполагая, что заземление троса на каждой ноге опоры осуществлено двумя проводниками, проложенными по противоположным сторонам ноги на расстоянии 24 cm друг от друга.

№ 432. Деревянная АП-образная опора имеет тросы, заземленные при помощи проводников диаметром 6 mm, приложенных по 4 ногам опоры. Высота опоры $h = 13{,}1$ m. Наибольшее расстояние между ногами со стороны А — 5,3 m, со стороны П — 3,0 m. Определить волновое сопротивление опоры, если по ней идет волна с напряжением 800 kV отрицательной полярности.

Примечание. Ввести в расчет средний геометрический радиус опоры.

№ 433. Трос заземляется на опоре при помощи 2 оттяжек, расположенных по обе стороны опоры, соединенных с ним на расстоянии 2 m от опоры и идущих под углом вниз к опоре. Диаметр оттяжек — 10,8 mm. Высота опоры 15 m. Определить волновое сопротивление опоры, если по ней движется волна с напряжением 1000 kV отрицательной полярности.

№ 434. При прямом ударе молнии в опору волновое сопротивление канала молнии было равно $w_0 = 250\ \Omega$ и волновое сопротивление троса — $w_1 = 300\ \Omega$. Определить напряжение на опоре, не учитывая влияния волнового сопротивления опоры, если сопротивление заземления равно $R = 10\ \Omega$ и если оно равно 100 Ω. Ток молнии — 50 000 А.

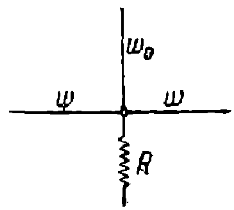

Рис. 71.

Решение. Пользуясь рис. 71, мы можем рассматривать удар молнии в опору как переход волны с волнового сопротивления w_0 на волновое сопротивление w', образованное двумя тросами и сопротивлением R. Волновое сопротивление двух тросов равно, очевидно, $\frac{w_1}{2}$, а потому

$$w' = \frac{R\frac{w_1}{2}}{R + \frac{w_1}{2}} = \frac{Rw_1}{2R + w_1}.$$

Коэфициент преломления у вершины опоры равен

$$a = \frac{2w'}{w_0 + w'} = \frac{2Rw_1}{(2R + w_1)\left(w_0 + \frac{Rw_1}{2R + w_1}\right)} =$$

$$= \frac{2Rw_1}{2Rw_0 + Rw_1 + w_1w_0} = \frac{2R}{R\left(2\frac{w_0}{w_1} + 1\right) + w_0}.$$

Поэтому напряжение на опоре мы можем найти, умножая напряжение молнии, равное

$$U_0 = I_0 w_0 = 50 \cdot 250 = 12\,500\ \text{kV},$$

на коэфициент преломления a:

$$U = aU_0 = \frac{2RU_0}{R\left(2\frac{w_0}{w_1}+1\right)+w_0}.$$

Полагая $R=10\ \Omega$, получим:

$$U = \frac{2\cdot 10\cdot 12\,500}{10\left(2\frac{250}{300}+1\right)+250} = 903\ \text{kV}.$$

При $R=100\ \Omega$, получим:

$$U = \frac{2\cdot 100\cdot 12\,500}{100\left(2\frac{250}{300}+1\right)+250} = 7890\ \text{kV}.$$

№ 435. Определить напряжение на опоре, предполагая напряжение молнии равным 10 000 kV, волновое сопротивление канала молнии $w_0=250\ \Omega$, волновое сопротивление тросов — 200 Ω и сопротивление заземления 45 Ω. Волновое сопротивление опоры не учитывается.

№ 436. Определить напряжение на опоре, предполагая напряжение молнии равным 20000 kV, волновое сопротивление канала молнии — 200 Ω, то же троса — 150 Ω и сопротивление заземления опоры — 50 Ω. Волновое сопротивление опоры не учитывается.

№ 437. Найти наибольшее напряжение на опоре при ударе в нее молнии, предполагая напряжение молнии равным

$$U = 10\,000\left(e^{-0{,}0142t} - e^{-6{,}05t}\right)\ \text{kV},$$

волновое сопротивление канала молнии — 250 Ω, троса — 360 Ω, опоры — 80 Ω и сопротивление заземления опоры — 20 Ω. Пролет между опорами 200 m, высота опоры 12 m.

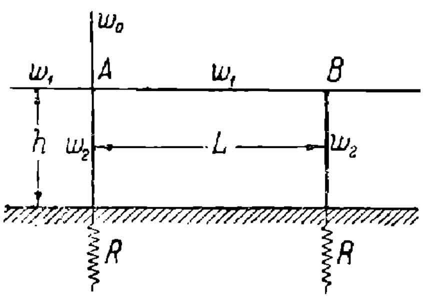

Рис. 72.

Решение. Расчетная схема задачи представлена на рис. 72, где w_0 обозначает канал молнии, w_1 — трос, w_2 — опоры и R — сопротивление заземления опор. При ударе в опору A волна напряжения, несомая молнией, испытывает преломление и отражение. Отраженная волна возвращается по каналу молнии и нас более не интересует. Преломленная волна движется вниз по опоре и в обе стороны от опоры по тросу. Для определения преломленной волны найдем коэфициент преломления. Он равен

$$a=\frac{2w'}{w_0+w'}=\frac{2\frac{w_1w_2}{2w_2+w_1}}{w_0+\frac{w_1w_2}{2w_2+w_1}}=\frac{2w_1w_2}{2w_0w_2+w_0w_1+w_1w_2}=$$

$$=\frac{2}{2\frac{w_0}{w_1}+\frac{w_0}{w_2}+1}.$$

Величина преломленной волны равна

$$U_1=aU_0\left(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}\right),$$

где $\alpha=0{,}0142$, $\beta=6{,}05$ и $U_0=10\,000$ kV.

Волна, идущая вниз по опоре, дойдя до земли, испытает здесь преломление и отражение, причем отраженная волна пройдет обратно кверху. Ее величину мы определим по коэфициенту отражения от заземления, равному

$$b=\frac{R-w_2}{R+w_2}.$$

Отраженная волна будет, поэтому, равна:

$$U_1'=ab\,U_0\left(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}\right),$$

причем время t отсчитывается здесь от момента отражения волны.

Дойдя до вершины опоры, эта волна снова преломится и отразится. Напряжение падающей волны к этому моменту станет равным

$$U_{11}'=a\,U_0\left(e^{-\alpha T}-e^{-\beta T}\right),$$

где T — время, затрачиваемое волной на пробег по опоре вниз и вверх. Оно равно

$$T=\frac{2h}{v},$$

где v — скорость движения волны. Если мы будем выражать время в μsec, а высоту опоры в метрах, то $v\cong 300$ m/μsec.

Найдем напряжение преломленной, идущей вверх волны. Оно будет равно

$$U_1''=aba_1U_0\left(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}\right),$$

где a_1 — коэфициент преломления на верху опоры, равный

$$a_1=\frac{2w''}{w_2+w''}=\frac{2\frac{w_0w_1}{2w_0+w_1}}{w_2+\frac{w_0w_1}{2w_0+w_1}}=$$

$$=\frac{2w_0w_1}{2w_0w_2+w_1w_2+w_0w_1}=\frac{2}{2\frac{w_2}{w_1}+\frac{w_2}{w_0}+1}.$$

Напряжение на вершине опоры в этот момент будет равно сумме $U_{11}' + U_1''$:

$$U_{11} = aU_0 \left(e^{-\alpha T} - e^{-\beta T}\right) + aba_1 U_0 \left(e^0 - e^0\right) =$$
$$= aU_0 \left(e^{-\alpha T} + ba_1\right) - aU_0 \left(e^{-\beta T} + ba_1\right). \qquad (1)$$

Пришедшая к вершине опоры снизу волна частично отразится и снова пойдет вниз. Величина пошедшей вниз волны определяется коэфициентом отражения от вершины опоры, который равен

$$b_1 = a_1 - 1.$$

Поэтому отраженная волна будет равна

$$U_2 = abb_1 U_0 \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right).$$

Эта волна снова отразится от заземления, и мы получим волну

$$U_2' = ab^2 b_1 U_0 \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}\right),$$

которая, придя к вершине опоры, даст преломленную волну

$$U_{12}'' = ab^2 b_1 a_1 U_0 \left(e^{-\alpha t} - e^{-\beta}\right).$$

Напряжение на вершине опоры к этому моменту стало равным

$$U_{12}' = aU_0 \left(e^{-2\alpha T} + ba_1 e^{-\alpha T}\right) - aU_0 \left(e^{-2\beta T} + ba_1 e^{-\beta T}\right).$$

Напряжение на вершине опоры после преломления второй волны, отраженной от заземления, будет равно

$$U_{12} = U_{12}' + U_2'' = aU_0 \left(e^{-2\alpha T} + ba_1 e^{-\alpha T} + b^2 b_1 a_1\right) -$$
$$- aU_0 \left(e^{-2\beta T} + b_1 a e^{-\beta T} + b^2 b_1 a_1\right).$$

Подобным же рассуждением найдем, что после преломления у вершины опоры третьей волны, отразившейся от заземления, напряжение на вершине опоры станет равным

$$U_{13} = aU_0 \left(e^{-3\alpha T} + ba_1 e^{-2\alpha T} + b^2 b_1 a_1 e^{-\alpha T} + b^3 b_1^2 a_1\right) -$$
$$- aU_0 \left(e^{-3\beta T} + ba_1 e^{-2\beta T} + b^2 b_1 a_1 e^{-\beta T} + b^3 b_1^2 a_1\right).$$

После того как подойдет n-я волна, напряжение на вершине опоры станет равным:

$$U_{1n} = aU_0 \left[e^{-n\alpha T} + a_1 b \left(e^{-(n-1)\alpha T} + bb_1 e^{-(n-2)\alpha T} + b^2 b_1^2 e^{-(n-3)\alpha T} + \ldots + \right.\right.$$
$$\left.\left. + b^{n-1} b_1^{n-1}\right)\right] - aU_0 \left[e^{-n\beta T} + a_1 b \left(e^{-(n-1)\beta T} + bb_1 e^{-(n-2)\beta T} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + b^2 b_1^2 e^{-(n-3)\beta T} + \ldots + b^{n-1} b_1^{n-1}\right)\right] =$$
$$= aU_0 \left[e^{-n\alpha T} + a_1 b e^{-(n-1)\alpha T} \left(1 + bb_1 e^{\alpha T} + b^2 b_1^2 e^{2\alpha T} + \ldots + \right.\right.$$
$$\left.\left. + b^{n-1} b_1^{n-1} e^{(n-1)\alpha T}\right)\right] - aU_0 \left[e^{-n\beta T} + a_1 b e^{-(n-1)\beta T} \left(1 + bb_1 e^{\beta T} + \right.\right.$$
$$\left.\left. + b^2 b_1^2 e^{2\beta T} + \ldots + b_1^{n-1} b^{n-1} e^{(n-1)\beta T}\right)\right].$$

Выражения, стоящие в круглых скобках, представляют собой геометрические прогрессии, суммы которых легко могут быть определены

$$\left(1 + bb_1e^{\alpha T} + \ldots + b^{n-1}b_1^{\,n-1}e^{(n-1)\alpha T}\right) = \frac{b^n b_1^{\,n} e^{n\alpha T} - 1}{bb_1e^{\alpha T} - 1},$$

$$\left(1 + bb_1e^{\beta T} + \ldots + b^{n-1}b_1^{\,n-1}e^{(n-1)\beta T}\right) = \frac{b^n b_1^{\,n} e^{n\beta T} - 1}{bb_1e^{\beta T} - 1}.$$

Поэтому

$$U_{1n} = aU_0\left[e^{-n\alpha T} + a_1be^{-(n-1)\alpha T}\left(\frac{b^nb_1^{\,n}e^{n\alpha T} - 1}{bb_1e^{\alpha T} - 1}\right) - \right.$$

$$\left. - e^{-n\beta T} - a_1be^{-(n-1)\beta T}\left(\frac{b^nb_1^{\,n}e^{n\beta T} - 1}{bb_1e^{\beta T} - 1}\right)\right].$$

Преобразуем это выражение следующим образом:

$$U_{1n} = aU_0\left[e^{-n\alpha T} + a_1be^{-n\alpha T}\left(\frac{b^nb_1^{\,n}e^{n\alpha T} - 1}{bb_1 - e^{-\alpha T}}\right)\right] -$$

$$- aU_0\left[e^{-n\beta T} + a_1be^{-n\beta T}\left(\frac{b^nb_1^{\,n}e^{n\beta T} - 1}{bb_1 - e^{-\beta T}}\right)\right] =$$

$$= aU_0\left[e^{-n\alpha T} + \frac{a_1b^{n+1}b_1^{\,n} - a_1be^{-n\alpha T}}{bb_1 - e^{-\alpha T}}\right] -$$

$$- aU_0\left[e^{-n\beta T} + \frac{a_1b_1^{\,n+1}b_1^{\,n} - a_1be^{-n\beta T}}{bb_1 - e^{-\beta T}}\right] =$$

$$= aU_0\left[\frac{b(b_1 - a_1)e^{-n\alpha T} + a_1b^{n+1}b_1^{\,n} - e^{-(n+1)\alpha T}}{bb_1 - e^{-\beta T}} - \right.$$

$$\left. - \frac{b(b_1 - a_1)e^{-n\beta T} + a_1b^{n+1}b_1^{\,n} - e^{-(n+1)\beta T}}{bb_1 - e^{-\beta T}}\right].$$

Входящий в это выражение член $a_1b^{n+1}b_1^{\,n}$ при больших значениях n бывает очень мал по сравнению с остальными, и им можно пренебречь. Далее, разность $b_1 - a_1 = -1$. Поэтому

$$U_{1n} = aU_0\left[\frac{be^{-n\alpha T} + e^{-(n+1)\alpha T}}{e^{-\alpha T} - bb_1} - \frac{be^{-n\beta T} + e^{-(n+1)\beta T}}{e^{-\beta T} - bb_1}\right].$$

И это выражение можно упростить, так как вторая дробь в квадратных скобках очень мала по сравнению с первой. Поэтому мы можем пренебречь ею, если мы ограничиваем свою задачу определением максимума напряжения на вершине опоры. Если бы мы захотели вычислить всю форму волны, то вторым членом пренебречь нельзя. Так как нашей задачей является определение максимального напряжения на опоре, то мы пренебрежем вторым членом в квадратных скобках и получим:

$$U_m \cong aU_0 \frac{e^{-(n+1)\alpha T} + be^{-n\alpha T}}{e^{-\alpha T} - bb_1}.$$

Для определения максимума напряжения необходимо принять во внимание следующие соображения. Если пролет между опорами настолько велик, что отраженная от опоры B волна проходит к опоре A после того, как напряжение молнии перешло через максимум, то напряжение на вершине опоры будет возрастать вместе с возрастанием напряжения молнии и достигнет максимума одновременно с последним. Если же пролет мал и отраженная от опоры B волна проходит к опоре до того, как напряжение молнии достигло максимума, эта отраженная от опоры B волна обычно бывает достаточна для того, чтобы вызвать снижение потенциала на опоре A. Поэтому в данном случае максимум напряжения на опоре A наступит в момент прихода к опоре A отраженной от опоры B волны. Определив таким образом время, в течение которого напряжение на опоре достигнет максимума (пусть оно будет равно T_1), мы найдем число n, как частное от деления T_1 на T:

$$n = \frac{T_1}{T}.$$

Поэтому

$$U_m = aU_0 \frac{e^{-\alpha(T_1+T)} + be^{-\alpha T_1}}{e^{-\alpha T} - bb_1}.$$

Так как T_1 не должно быть больше длины фронта волны напряжения молнии, а эта длина едва ли превосходит $1-2$ μsec, длина же хвоста волны > 20 μsec, то коэфициент α и произведение αT_1 или $\alpha(T_1 + T)$ всегда имеют очень малую величину, порядка не более $0{,}02-0{,}03$. При таких условиях мы можем разложить показательные функции в ряд и ограничиться двумя членами ряда. Тогда получим:

$$U_m = aU_0 \frac{1 - \alpha(T_1 + T) + b(1 - \alpha T_1)}{1 - aT - bb_1} =$$
$$= aU_0 \frac{(1 + b)(1 - \alpha T_1) - \alpha T}{1 - aT - bb_1}.$$

В это окончательное выражение нам остается подставить численное значение входящих в него величин.

Определим коэфициенты преломления и отражения.

$$a = \frac{2}{2\frac{w_0}{w_1} + \frac{w_0}{w_2} + 1} = \frac{2}{2\frac{250}{360} + \frac{250}{280} + 1} = 0{,}61,$$

$$b = \frac{R - w_2}{R + w_2} = \frac{20 - 80}{20 + 80} = -0{,}60,$$

$$a_1 = \frac{2}{2\frac{w_2}{w_1} + \frac{w_2}{w_0} + 1} = \frac{2}{2\frac{280}{360} + \frac{280}{250} + 1} = 0{,}544,$$

$$b_1 = a_1 - 1 = 0{,}544 - 1 = -0{,}456.$$

Найдем T и T_1:

$$T = \frac{2h}{v} = \frac{2 \cdot 12}{300} = 0{,}08.$$

Время T_1 есть длина фронта волны напряжения молнии. Оно определяется известным равенством:

$$T_1 = \frac{\ln\frac{\beta}{\alpha}}{\alpha - \beta} = \frac{\ln\frac{6{,}05}{0{,}0142}}{6{,}05 - 0{,}0142} = \frac{6{,}055}{6{,}036} \cong 1{,}0\ \mu\text{sec}.$$

Подставляя полученные значения в уравнение (1), найдем:

$$U_m = 0{,}61 \cdot 10\,000 \left[\frac{(1 - 0{,}60)\ (1 - 0{,}0142) - 0{,}0142 \cdot 0{,}08}{1 - 0{,}0142 \cdot 0{,}08 + 0{,}60 \cdot 0{,}456}\right] =$$

$$= 6100 \left(\frac{0{,}3943 - 0{,}0011}{1{,}2725}\right) = 1885\ \text{kV}.$$

Заметим, что вышеприведенный расчет возможно применять, если выполнено условие $e^{-\beta T} > |b|$. Это бывает при больших сопротивлениях заземления. При малых сопротивлениях заземления потенциал на вершине опоры достигает максимума после 1—2 пробегов волны по опоре и его можно определять, пользуясь уравнением (1) или (2), сравнивая даваемые ими результаты.

№ 438. Определить наибольшее напряжение на опоре при ударе молнии, если напряжение молнии равно $10\,000\ (e^{-0{,}015t} - e^{-6{,}0t})$ kV, волновое сопротивление канала молнии — 200 Ω, троса — 3[illegible]0 Ω, опоры — 250 Ω и сопротивление заземления опоры — 10 Ω. Высота опоры — 11 m.

№ 439. Определить наибольшее напряжение на опоре при ударе молнии, если напряжение молнии равно $10\,000\ (e^{-0{,}015t} - e^{-6{,}0t})$ kV, волновое сопротивление канала молнии — 200 Ω, троса — 340 Ω, опоры — 150 Ω и сопротивление заземления опоры — 15 Ω. Высота опоры — 13,5 m.

№ 440. Определить сопротивление заземления, необходимое для того, чтобы напряжение на вершине опоры не превзошло 1800 kV, если напряжение молнии равно $U = 10\,000\ (e^{-0{,}02t} - e^{-4{,}0t})$ kV, волновое сопротивление канала молнии 250 Ω, волновое сопротивление троса — 300 Ω, волновое сопротивление опоры — 100 Ω. Высота опоры — 12 m.

№ 441. Определить наибольшее напряжение между проводом и тросом при ударе молнии в трос в середине пролета, зная напряжение молнии $U = 10000\,(e^{-0,015t} - e^{-6,0t})$ kV, длину пролета между опорами $L = 200$ m, волновое сопротивление канала молнии $w_0 = 250\,\Omega$, троса $w_1 = 360\,\Omega$ и коэфициент связи провода и троса $a_{12} = 0,26$.

Примечание. Напряжение на тросе будет повышаться до момента, когда к месту удара молнии подойдут отраженные от соседних опор волны, которые, имея отрицательный знак, снизят напряжение в месте удара. Если длина пролета равна или больше длины фронта падающей волны, то наибольшее напряжение будет равно амплитуде преломленной при ударе волны.

№ 442. Определить наибольшее напряжение между проводом и тросом при ударе молнии в трос в середине пролета, зная напряжение молнии $U = 10\,000\,(e^{-0,02t} - e^{-3,0t})$ kV, длину пролета между опорами $L = 250$ m, волновое сопротивление канала молнии $w_0 = 250\,\Omega$, троса $w_1 = 400\,\Omega$ и взаимное волновое сопротивление провода и троса $w_{12} = 70\,\Omega$.

№ 443. Определить, будет ли пробито расстояние между проводом и тросом в середине пролета, зная напряжение молнии $U = 10\,000\,(e^{-0,01t} - e^{-7,5t})$ kV, длину пролета между опорами $L = 200$ m, волновое сопротивление канала молнии $w_0 = 250\,\Omega$ и волновое сопротивление троса — $w_1 = 380\,\Omega$. Зависимость разрядного напряжения U_c от расстояния между проводом и тросом S определяется уравнением $U_c = 800\,S$. Высота провода — 6 m, высота троса — 11 m расстояние между проводом и тросом по горизонтали — 2,5 m.

№ 444. Найти величину потенциала, индуктируемого на линии передачи близким разрядом молнии, зная высоту проводов $h = 7,5$ m и защитный коэфициент тросов $k_s = 0,4$. Длительность разряда молнии предполагаем равной 30 μsec, а высоту облака $H = 1,0$ km.

Решение. Величина потенциала, индуктированного на проводах линии разрядом молнии, может быть определена по формуле Пика $U = \alpha k_s g h$, где α — коэфициент, зависящий от распределения заряда на проводе и от длительности разряда молнии T, и g — максимальный градиент поля облака у поверхности провода при разряде молнии, принимаемый обычно равным 300 kV/m. Предполагая, что заряды занимают в облаке пространство, близкое к объему некоторого шара, можно представить величину α в следующем виде:

$$\alpha = \frac{H}{\sqrt{H^2 + v^2T^2}},$$

где v — скорость движения волн по проводам. Выражая H в km и T — в μsec, получим $v = 0,3$ km/μsec. Определим величину α для наших условий:

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,09 \cdot 30^2}} = \frac{1}{\sqrt{82}} = 0,1105.$$

Подставляя численные значения в уравнение Пика, получим:

$$U = 0,1105 \cdot 0,4 \cdot 300 \cdot 7,5 = 99,4 \text{ kV}.$$

№ 445. Определить потенциал, индуктируемый близким разрядом молнии на проводах линии передачи, не имеющей защитных тросов ($k_s = 1$), предполагая высоту проводов $h = 12$ m, высоту облака $H = 1,5$ km и длительность разряда $T = 40$ μsec.

№ 446. Найти потенциал, индуктируемый на проводах линии близким разрядом молнии, предполагая высоту проводов $h = 7,2$ m, высоту облака $H = 1,5$ km и длительность разряда молнии $T = 25$ μsec. Тросы отсутствуют.

№ 447. Определить потенциал, индуктируемый на проводах линии близким разрядом молнии, предполагая высоту проводов $h = 11$ m, высоту облака $H = 1,5$ m, длительность разряда $T = 25$ μsec и защитный коэфициент тросов $k_s = 0,35$.

№ 448. Определить защитный коэфициент тросов, если известен их диаметр $d = 1,0$ cm и расположение тросов и проводов по рис. 73.

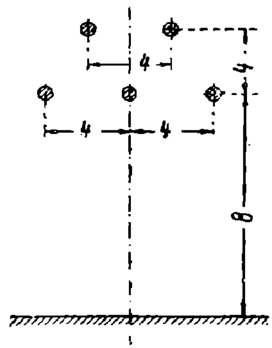

Рис. 73.

Решение. Если имеется система, состоящая из m тросов и n проводов, то защитный коэфициент этих тросов относительно какого-либо провода i будет равен

$$k_{si} = 1 - \frac{1}{h_i'}(a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + a_{i3}x_3 + \ldots + a_{im}x_m), \qquad (1)$$

где h_i' — высота данного провода над землей, a_{im} — потенциальный коэфициент связи между проводом i и тросом m, а $x_1, x_2 \ldots x_m$ — корни системы уравнений:

$$\left.\begin{array}{l} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \ldots + a_{1m}x_m = h_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \ldots + a_{2m}x_m = h_2 \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \ldots + a_{mm}x_m = h_m \end{array}\right\} \qquad (2)$$

$h_1, h_2 \ldots h_m$ — высота тросов над землей, a_{11}, a_{12} и т. д. — потенциальные коэфициенты связи между тросами. При большом числе тросов решение задачи получается сравнительно сложным, но оно упрощается, если ввести вместо всех тросов один эквивалентный им, расположенный в центре тяжести всех тросов и имеющий радиус, равный среднему геометрическому радиусу системы тросов. Тогда уравнение (1) приводится к виду $k_{si} = 1 - \frac{a_{i_1} x_1}{h_i'}$, а система (2) — к уравнению $a_{11} x_1 = h_1$, откуда следует:

$$x_1 = \frac{h_1}{a_{11}}$$

и

$$k_{si} = 1 - \frac{a_{i_1} h_1}{h_i' a_{11}}. \tag{3}$$

Воспользуемся уравнением (3) для решения нашей задачи.

Для определения потенциального коэфициента a_{11} нам необходимо знать радиус троса с учетом короны. Предполагая, что наибольший индуктированный потенциал на тросе может достигнуть величины 400 kV, определим радиус троса с короной из уравнения

$$r_1 = r + 0{,}02\,(U - U_0),$$

где

$$U_0 = 30 \cdot 0{,}85 \left(1 + \frac{0{,}301}{\sqrt{0{,}5}}\right) 0{,}5 \ln \frac{2400}{0{,}5} = 154 \text{ kV}.$$

Следовательно,

$$r_1 = 0{,}5 + 0{,}02\,(400 - 154) = 5{,}42 \text{ cm}.$$

В этом расчете мы ввели формулу для положительной короны, потому что наиболее сильные удары молнии бывают отрицательные. При отрицательных же ударах на проводах индуктируется положительный потенциал.

Определим средний геометрический радиус двух тросов:

$$r_c = \sqrt{r_1 S} = \sqrt{5{,}42 \cdot 400} = 46{,}6 \text{ cm}.$$

Теперь можно вычислить a_{11}:

$$a_{11} = 2 \ln \frac{2h_1}{r_c} = 2 \ln \frac{2400}{46{,}6} = 7{,}88.$$

Потенциальный коэфициент связи равен:

$$a_{12} = \ln \frac{(h_1 + h_2)^2 + S_{12}^2}{(h_1 - h_2)^2 + S_{12}^2} = \ln \frac{(8 + 12)^2 + 4^2}{(12 - 8)^2 + 4^2} = 2{,}56.$$

Подставляя полученные значения в уравнение (3), найдем:

$$k_{s2} = 1 - \frac{12 \cdot 2{,}56}{8 \cdot 7{,}88} = 1 - 0{,}487 = 0{,}513.$$

Для провода 4 получим, очевидно, такую же величину

$$k_{s4} = k_{s2}\,.$$

Для провода 3 получим:

$$a_{13} = \ln \frac{(8+12)^2}{(12-8)^2} = 3{,}22.$$

Следовательно,

$$k_{s3} = 1 - \frac{12 \cdot 3{,}22}{8 \cdot 7{,}88} = 1 - 0{,}613 = 0{,}387.$$

№ 449. Провода и тросы линии передачи расположены по рис. 73, но высота троса равна 10 m, а расстояние между проводами равно 2,5 m. Диаметр троса равен 7,6 mm. Определить защитные коэфициенты тросов, предполагая максимальный потенциал троса равным 450 kV.

№ 450. Провода и тросы линии передачи расположены по рис. 73, но высота троса равна 16 m, высота проводов — 9 m, а расстояние между проводами—7,6 m. Диаметр троса равен 24,4 cm. Определить защитные коэфициенты тросов, предполагая максимальный потенциал троса равным 600 kV.

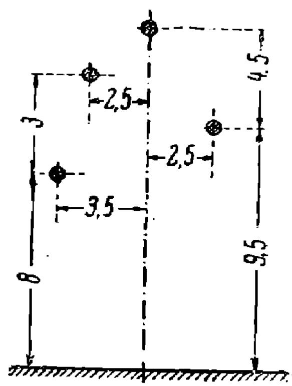

Рис. 74.

№ 451. Расположение проводов и троса линии передачи дано на рис. 74. Диаметр троса равен 10,8 mm. Определить защитные коэфициенты тросов, предполагая максимальный потенциал троса равным 500 kV.

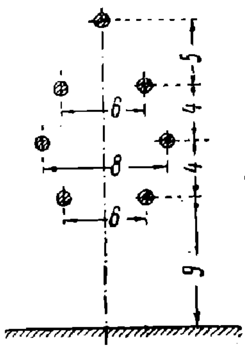

Рис. 75.

№ 452. Провода и трос линии передачи расположены, как показано на рис. 75. Диаметр троса равен 12,6 mm. Определить защитные коэфициенты троса, предполагая, что максимальный потенциал троса равен 600 kV.

№ 453. Расположение проводов и тросов линии передачи дано на рис. 76. Определить защитные коэфициенты тросов, предполагая, что максимальный потенциал троса равен 600 kV. Диаметр троса равен 12,6 mm.

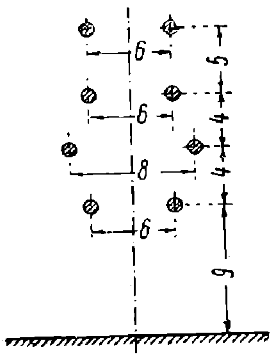

Рис. 76.

№ 454. Найти напряжение на первой от линии катушке обмотки высшего напряжения трансформатора, зная, что обмотка имеет 75 катушек, а отношение емкости на землю к емкости между витками трансформатора равно 200. Напряжение падающей волны равно 800 kV.

Решение. Распределение потенциала вдоль обмотки трансформатора в первые моменты после попадания в него импульса напряжения определяется уравнением:

$$U = U_0 \frac{\operatorname{sh} \alpha x}{\operatorname{sh} \alpha},$$

где x — отношение номера катушки, предшествующей данной, считая от нейтрали, к общему числу катушек, и α — квадратный корень из отно чия емкости на землю к емкости между витками. Так как

$$x = \frac{74}{75} = 0,987$$

и

$$\alpha = \sqrt{200} = 14,14,$$

то

$$U = 800 \frac{\operatorname{sh} 14,14 \cdot 0,987}{\operatorname{sh} 14,14} = 662 \text{ kV}.$$

Таким образом, на первую от линии катушку приходится напряжение

$$U_1 = 800 - 662 = 138 \text{ kV}.$$

№ 455. Найти напряжение, приходящееся на первую от линии катушку обмотки трансформатора, зная общее число катушек, равное 60, отношение емкости на землю к емкости между крайними витками, равное 290, и напряжение падающей волны, равное 400 kV.

№ 456. Определить частоту собственных колебаний трансформатора, предполагая, что его индуктивность равна $L = 0,32$ H, емкость между крайними витками равна $K = 8,6 \cdot 10^{-12}$F, а емкость относительно земли $C = 1,2 \cdot 10^{-9}$F.

Примечание. Частота собственных колебаний трансформатора определяется уравнением:

$$f=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{1}{LC\left(1+\frac{\pi^2K}{C}\right)}}.$$

№ 457. Определить частоту собственных колебаний трансформатора, зная его индуктивность $L=1{,}25$ H, емкость между крайними витками $K=4{,}6\cdot10^{-12}$ F и емкость относительно земли $C=8\cdot10^{-10}$ F.

№ 458. Трансформатор заземлен через сопротивление $R=100\ \Omega$. Найти повышение напряжения нейтрали трансформатора при падении на трансформатор волны с напряжением $U=e^{-0.02t}$ kV. Индуктивность трансформатора равна $L=0{,}3$ H, емкость нейтрали относительно земли $C=7\cdot10^{-10}$ F.

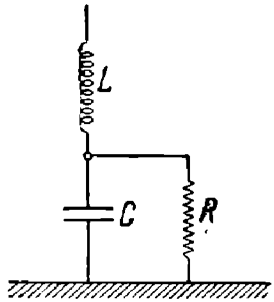

Рис. 77.

Решение. Расчетная схема представлена на рис. 77. Условное сопротивление для этой схемы равно:

$$Z(p)=pL+\frac{1}{pC+\frac{1}{R}}=\frac{p^2RCL+pL+R}{pRC+1}.$$

Ток в цепи равен

$$i=\frac{2U}{Z(p)}=\frac{2U(pRC+1)}{p^2RCL+pL+R}.$$

Для определения напряжения нейтрали относительно земли умножим ток на сопротивление параллельно включенных ветвей C и R:

$$U_2=iZ_2=i\frac{1}{pC+\frac{1}{R}}=\frac{iR}{pCR+1}=\frac{2UR}{p^2RCL+pL+R}.$$

Отсюда следует, что условное сопротивление для определения U_2 равно:

$$H(p)=\frac{p^2RCL+pL+R}{R}=p^2CL+p\frac{L}{R}+1=$$
$$=ap^2+bp+1.$$

Корни этого уравнения будут:

$$p=-\frac{b}{2a}\pm\sqrt{\frac{b^2}{4a^2}-\frac{1}{a}}=-\alpha\pm\beta.$$

Производная $H'(p)$ равна:

$$H'(p)=2ap+b=2a\left(p+\frac{b}{2a}\right)=2a(p+\alpha).$$

Применяя теорему разложения, получим:

$$U_2 = \frac{2Ue^{\lambda t}}{H(\lambda)} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{(p_1 - \lambda)\,H'(p_1)} + \frac{2Ue^{p_2 t}}{(p_2 - \lambda)\,H'(p_2)}.$$

Определим значение знаменателей второй и третьей дробей.

$$(p_1 - \lambda)\,H'(p_1) = (p_1 - \lambda)\cdot 2a\,(p_1 + \alpha) = 2a\beta\,(\beta - \alpha - \lambda),$$

$$(p_2 - \lambda)\,H'(p_2) = (p_2 - \lambda)\,2a\,(p_2 + \alpha) = 2a\beta\,(\beta + \alpha + \lambda).$$

Таким образом,

$$U_2 = \frac{2Ue^{\lambda t}}{a\lambda^2 + b\lambda + 1} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{2a\beta\,(\beta - \alpha - \lambda)} + \frac{2Ue^{p_2 t}}{2a\beta\,(\beta + \alpha + \lambda)}. \qquad (1)$$

Определим численные значения величин, входящих в это уравнение

$$a = CL = 0{,}3\cdot 7\quad 10^{-10} = 2{,}1\cdot 10^{-10},$$

$$b = \frac{L}{R} = \frac{0{,}3}{100} = 3\cdot 10^{-3},$$

$$a\lambda^2 + b\lambda + 1 = 2{,}1\cdot 10^{-10}\cdot 4\cdot 10^{8} - 3\cdot 10^{-3}\cdot 2\cdot 10^{4} + 1 =$$
$$= 8{,}4\cdot 10^{-2} - 60 + 1 = -59{,}08,$$

$$\alpha = \frac{b}{2a} = \frac{3\cdot 10^{-3}}{2\cdot 2{,}1\cdot 10^{-10}} = 7{,}14\cdot 10^{6},$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{1}{a}} = \sqrt{7{,}14^2\cdot 10^{12} - \frac{10^{10}}{2{,}1}} \cong 7{,}14\cdot 10^{6} -$$
$$- \frac{10^{10}}{2\cdot 2{,}1\cdot 7{,}14\cdot 10^{6}} = 7{,}14\cdot 10^{6} - 3{,}33\quad 10^{2} \cong 7{,}14\cdot 10^{6},$$

$$p_1 = -\alpha + \beta = -7{,}14\cdot 10^{6} + 7{,}14\cdot 10^{6} - 3{,}33\cdot 10^{2} =$$
$$= -3{,}33\quad 10^{2},$$

$$p_2 = -\alpha - \beta = -7{,}14\quad 10^{6} - 7{,}14\cdot 10^{6} = -1{,}428\cdot 10^{7}.$$

Подставляя полученные значения в уравнение (1), найдем

$$U_2 = -\frac{2Ue^{\lambda t}}{59{,}08} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{2\cdot 2{,}1\cdot 10^{-10}\cdot 7{,}14\cdot 10^{6}\,(-3{,}33\cdot 10^{2} + 2\cdot 10^{4})} +$$
$$+ \frac{2Ue^{p_2 t}}{3\cdot 10^{-3}\,(1{,}428\cdot 10^{7} + 2\cdot 10^{4})} = -\frac{Ue^{-0{,}02t}}{29{,}54} + \frac{Ue^{-0{,}000333t}}{29{,}54} - \frac{Ue^{-14{,}28t}}{2{,}142\quad 10^{4}}.$$

Очевидно, что третий член настолько мал и так быстро затухает, что им можно пренебречь. Тогда

$$U_2 = \frac{800}{29{,}54}\left(e^{-3{,}33t\cdot 10^{-4}} - e^{-0{,}02t}\right) = 27{,}1\left(e^{-3{,}33t\quad 10^{-4}} - e^{-0{,}02t}\right). \qquad (2)$$

Максимум этой функции найдем, взяв производную по t и приравняв ее нулю:

$$-0{,}000333 \cdot e^{-3{,}33 \cdot t \cdot 10^{-4}} + 0{,}02e^{-0{,}02t} = 0,$$

$$t = \frac{\ln \dfrac{0{,}02}{0{,}000333}}{0{,}02 - 0{,}000333} = 208 \ \mu\,\text{sec}.$$

Подставим эту величину в уравнение (2):

$$U_2 = 27{,}1\,(e^{-0{,}000333 \cdot 208} - e^{-0{,}02 \cdot 208}) =$$

$$= 27{,}1\,(e^{-0{,}0694} - e^{-4{,}16}) = 27{,}1 \cdot 0{,}9175 = 27{,}9 \text{ kV}.$$

№ 459. Трансформатор имеет индуктивность $L = 1{,}2$ H и емкость нейтрали относительно земли $C = 3{,}6 \cdot 10^{-10}$ F. Определить наибольшее повышение напряжения нейтрали при падении на трансформатор волны $U = 800e^{-0{,}015t}$ kV, если нейтраль его заземлена через сопротивление $R = 150\ \Omega$.

№ 460. Трансформатор, имеющий индуктивность $L = 0{,}8$ H и емкость нейтрали относительно земли $C = 4{,}4 \cdot 10^{-10}$ F, заземлен через катушку Петерсена, имеющую индуктивность $L = 2{,}5$ H. Определить наибольшее повышение напряжения нейтрали при падении на трансформатор волны $U = 600e^{-0{,}016t}$ kV, приходящей с линии, имеющей волновое сопротивление $w = 450\ \Omega$.

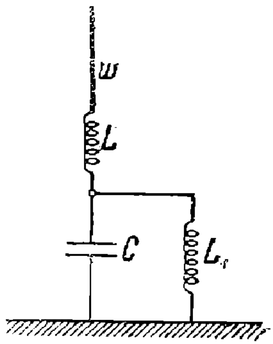

Рис. 78.

Решение. Расчетная схема дана на рис. 78. Условное сопротивление цепи равно

$$Z(p) = w + pL + \frac{1}{pC + \dfrac{1}{pL_1}} = \frac{p^3CL_1L + p^2CL_1w + p\,(L + L_1) + w}{p^2CL_1 + 1}.$$

Напряжение нейтрали относительно земли получим, умножая ток на сопротивление разветвленной части цепи, которое равно

$$Z_1(p) = \frac{1}{pC + \dfrac{1}{pL_1}} = \frac{pL_1}{p^2CL_1 + 1}$$

Поэтому

$$U_2 = \frac{2U \dfrac{pL_1}{p^2CL_1 + 1}\,(p^2CL_1 + 1)}{p^2CL_1L + p^2CL_1w + p\,(L + L_1) + w} =$$

$$= \frac{2UpL_1}{p^3CL_1L + p^2CL_1w + p\,(L + L_1) + w}.$$

Условное сопротивление равно:

$$H(p) = \frac{1}{p}\left[p^3CL + p^2Cw + p\left(1 + \frac{L}{L_1}\right) - \frac{w}{L_1}\right] =$$

$$= \frac{1}{p}(ap^3 + bp^2 + cp + d). \quad (1)$$

Коэфициенты a и b много меньше, чем c и d. Поэтому мы можем определить один из корней кубического уравнения (1) приближенно, полагая

$$cp + d = 0,$$

откуда

$$p_1 = -\frac{d}{c}.$$

Разделяя уравнение (1) на разность $(p - p_1)$, понизим степень уравнения (1) на единицу. Частное от этого деления равно

$$ap^2 + (ap_1 + b)p + ap_1^2 + bp_1 + c = ap^2 + b_1p + c_1 = 0. \quad (2)$$

Корни этого уравнения будут

$$p_2 = -\frac{b_1}{2a} + j\sqrt{\frac{c_1}{a} - \frac{b_1^2}{4a^2}} = -\alpha + j\omega,$$

$$p_3 = -\frac{b_1}{2a} - j\sqrt{\frac{c_1}{a} - \frac{b_1^2}{4a^2}} = -\alpha - j\omega.$$

Производная условного сопротивления равна

$$H'(p) = \frac{3ap^2 + 2bp + c}{p}.$$

Определим выражение $(p_2 - \lambda)H'(p_2)$:

$$(p_2 - \lambda)H'(p_2) = 3ap_2^2 + 2bp_2 + c - 3ap_2\lambda - 2b\lambda - \frac{c\lambda}{p_2} =$$

$$= 3a(\alpha^2 - \omega^2) - 6ja\alpha\omega + (3a\lambda - 2b)\alpha - j(3a\lambda - 2b)\omega +$$

$$+ c - 2b\lambda + \frac{c\lambda}{-\alpha + j\omega} = 3a(\alpha^2 - \omega^2) + (3a\lambda - 2b)\alpha +$$

$$+ c - 2b\lambda + \frac{c\lambda\alpha}{\alpha^2 + \omega^2} - j\omega\left(6a\alpha + 3a\lambda - 2b - \frac{c\lambda}{\alpha^2 + \omega^2}\right) = A - jB.$$

Аналогичным преобразованием получим:

$$(p_3 - \lambda)H'(p_3) = A + jB.$$

Подставим полученные величины в уравнение Хевисайда:

$$U_2 = \frac{2Ue^{\lambda t}}{H(\lambda)} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{(p_1-\lambda)H'(p_1)} + 2Ue^{-\alpha t}\left(\frac{e^{j\omega t}}{A-jB} + \frac{e^{-j\omega t}}{A+jB}\right) =$$

$$= \frac{2Ue^{\lambda t}}{H(\lambda)} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{(p_1-\lambda)H'(p_1)} +$$

$$+ 2Ue^{-\alpha t}\left[\frac{A(e^{j\omega t}+e^{-j\omega t}) + jB(e^{j\omega t}-e^{-j\omega t})}{A^2+B^2}\right] =$$

$$= \frac{2Ue^{\lambda t}}{H(\lambda)} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{(p_1-\lambda)H'(p_1)} + \frac{4Ue^{-\alpha t}}{A^2+B^2}(A\cos\omega t - B\sin\omega t) =$$

$$= \frac{2Ue^{\lambda t}}{H(\lambda)} + \frac{2Ue^{p_1 t}}{(p_1-\lambda)H'(p_1)} - \frac{4Ue^{-\alpha t}}{\sqrt{A^2+B^2}}\sin(\omega t - \varphi). \qquad (3)$$

Здесь

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{A}{B}.$$

Определим численное значение входящих в уравнение (3) величин.

$$a = LC = 0{,}8\cdot 4{,}4\cdot 10^{-10} = 3{,}52\cdot 10^{-10},$$

$$b = wC = 450\cdot 4{,}4\cdot 10^{-10} = 1{,}98\cdot 10^{-7},$$

$$c = 1 + \frac{L}{L_1} = 1 + \frac{0{,}8}{2{,}5} = 1{,}32,$$

$$d = \frac{w}{L} = \frac{450}{2{,}5} = 180,$$

$$p_1 = -\frac{d}{c} = -\frac{180}{1{,}32} = -136{,}4,$$

$$b_1 = b - \frac{ad}{c} = 1{,}98\cdot 10^{-7} - \frac{3{,}52\cdot 10^{-10}\cdot 180}{1{,}32} = 1{,}50\cdot 10^{-7},$$

$$c_1 = ap_1^2 + bp_1 + c =$$

$$= 3{,}52\cdot 10^{-10}\cdot 1{,}86\cdot 10^4 - 1{,}98\cdot 10^{-7}\cdot 1{,}36\cdot 10^2 + 1{,}32 \cong 1{,}32,$$

$$\alpha = \frac{b_1}{2a} = \frac{1{,}5\cdot 10^{-7}}{2\cdot 3{,}52\cdot 10^{-10}} = 213,$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1{,}32}{2\cdot 3{,}52\cdot 10^{-10}} - 213^2} \cong 6{,}12\cdot 10^4,$$

$$p_1 - \lambda = 136{,}4 + 1{,}6\cdot 10^4 \cong 1{,}6\cdot 10^4,$$

$$(p_1-\lambda)H'(p_1) = -\frac{1{,}6\cdot 10^4}{136{,}4}(3\cdot 3{,}52\cdot 10^{-10}\cdot 136{,}4^2 -$$

$$- 2\cdot 1{,}98\cdot 10^{-7}\cdot 136{,}4 + 1{,}32) = -154{,}9,$$

$$H(\lambda) = a\lambda^2 + b\lambda + c + \frac{d}{\lambda} =$$

$$= 3{,}52\cdot 10^{-10}\cdot 2{,}56\cdot 10^8 - 1{,}98\cdot 10^{-7}\cdot 1{,}6\cdot 10^4 + 1{,}32 -$$

$$- \frac{180}{1{,}6\cdot 10^4} = 1{,}396,$$

$$A = -3 \cdot 3{,}52 \cdot 10^{-10} \cdot 3{,}75 \cdot 10^9 +$$
$$+ (3 \cdot 3{,}52 \cdot 10^{-10} \cdot 1{,}6 \cdot 10^4 - 2 \cdot 1{,}98 \cdot 10^{-7})\, 213 + 1{,}32 -$$
$$- 2 \cdot 1{,}98 \cdot 10^{-7} \cdot 1{,}6 \cdot 10^4 - \frac{1{,}32 \cdot 1{,}6 \cdot 10^4 \cdot 213}{4{,}54 \cdot 10^4 - 3{,}75 \cdot 10^9} = -2{,}643,$$
$$B = 6{,}12 \cdot 10^4 (6 \cdot 3{,}52 \cdot 10^{-10} \cdot 213 +$$
$$+ 3 \cdot 3{,}52 \cdot 10^{-10} \;\; 1{,}6 \cdot 10^4 - 2 \cdot 1{,}98 \cdot 10^{-7} +$$
$$+ \left. \frac{1{,}32 \cdot 1{,}6 \cdot 10^4}{4{,}54 \cdot 10^4 - 3{,}75 \cdot 10^9} \right) = 0{,}693,$$
$$\sqrt{A^2 + B^2} = \sqrt{2{,}643^2 + 0{,}693^2} = 2{,}752,$$
$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{A}{B} = -\frac{2{,}643}{0{,}693} = -3{,}815,$$
$$\varphi = -75^\circ 19'.$$

Подставляя полученные числа в уравнение (3), получим:

$$U_2 = \frac{2U \cdot e^{-0{,}016t}}{1{,}396} - \frac{2Ue^{-1{,}364 \cdot 10^{-4} \cdot t}}{154{,}9} -$$
$$- \frac{4Ue^{-2{,}13 \cdot 10^{-4} \cdot t}}{2{,}732} \sin(\omega t + 75^\circ 19') =$$
$$= 1{,}432 Ue^{-0{,}016t} - 0{,}0129 Ue^{-1{,}364 \cdot 10^{-4} \cdot t} -$$
$$- 1{,}464 Ue^{-2{,}13 \cdot 10^{-4} \cdot t} \sin(\omega t + 75^\circ 19'). \qquad (4)$$

Для определения максимума этой функции заметим, что второй член уравнения (4) очень мал и затухает очень медленно по сравнению с первым членом. Поэтому при определении момента наступления максимума мы можем им пренебречь. Показательная функция, входящая в состав третьего члена уравнения (4), также затухает очень медленно, и мы можем положить ее приближенно равной единице. Тогда уравнение (4) примет вид:

$$U_2 \cong 1{,}432 Ue^{-0{,}016t} - 1{,}464 U \sin(\omega t + 75^\circ 19').$$

Эта функция будет иметь максимум при

$$\sin(\omega t + 75^\circ 19') \cong -1,$$

откуда

$$\omega t + 75^\circ 19' = \frac{3\pi}{2},$$
$$t = \frac{1}{\omega} \left(\frac{3\pi}{2} - 75^\circ 19' \right) = 5{,}555 \quad 10^{-5}$$

Подставляя это значение t в уравнение (4), определим U_{2max}:

$$U_{2max} \cong 1{,}432 \quad 600 \cdot e^{-0{,}016 \cdot 55{,}55} - 0{,}0129 \cdot 600 + \\ + 1{,}464 \cdot 600 = 1224 \text{ kV},$$

так как

$$e^{-1{,}364 \cdot 55{,}55 \cdot 10^{-4}} \cong 1;$$

$$e^{-2{,}13 \cdot 55{,}55 \cdot 10^{-4}} \cong 1.$$

№ 461. Трансформатор заземлен через катушку Петерсена, имеющую индуктивность $L = 3{,}0$ H. Индуктивность трансформатора равна $L = 0{,}6$ H, емкость его нейтрали относительно земли равна $C = 5 \cdot 10^{-10}$ F. Определить наибольшее повышение напряжения нейтрали относительно земли, если в трансформатор попадает волна с напряжением $U = 900e^{-0{,}014t}$ kV, идущая с линии, волновое сопротивление которой равно $w = 400\ \Omega$.

№ 462. Параллельно катушке Петерсена, имеющей индуктивность $L_1 = 4{,}0$ H, присоединен конденсатор емкостью $C_1 = 1{,}25 \quad 10^{-8}$ F. Индуктивность трансформатора равна $L = 0{,}6$ H, емкость его нейтрали относительно земли $C = 5 \cdot 10^{-10}$ F. Определить наибольшее повышение напряжения нейтрали относительно земли, если в трансформатор попадает волна с напряжением $U = 900e^{-0{,}014t}$ kV, идущая с линии, волновое сопротивление которой равно $w = 400\ \Omega$.

№ 463. Трансформатор заземлен через катушку Петерсена, имеющую индуктивность $L_1 = 3{,}0$ H и шунтированную емкостью $C_1 = 6 \quad 10^{-8}$ F. Индуктивность трансформатора равна $L = 0{,}5$ H, емкость его нейтрали относительно земли равна $C = 6 \cdot 10^{-10}$ F. Определить наибольшее повышение напряжения нейтрали относительно земли, если в трансформатор попадает волна с напряжением $U = 750e^{-0{,}02t}$ kV, идущая с линии, имеющей волновое сопротивление $w = 430\ \Omega$.

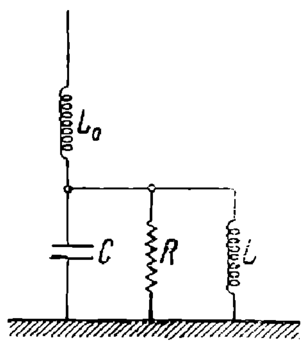

Рис. 79.

№ 464. Для ограничения токов короткого замыкания на землю, в нейтраль трансформатора включен импидор, состоящий из параллельно включенных индуктивности $L_1 = 1{,}5$ H, емкости $C = 5 \quad 10^{-8}$ F и сопротивления $R = 1000\ \Omega$ (см. рис. 79). Индуктивность трансформатора равна $L = 0{,}6$ H. Найти максимальное повышение напряжения нейтрали, если в трансформатор попадает волна $U = 800e^{-0,03t}$ kV.

№ 465. Трансформатор имеет индуктивность $L = 0,4$ H, и нейтраль его заземлена через импидор, состоящий из индуктивности $L_1 = 1,6$ H, емкости $C = 2 \cdot 10^{-8}$ F и сопротивления $R = 1000\ \Omega$. Определить максимальное повышение напряжения нейтрали, если в трансформатор попадает волна $U = 600e^{-0,02t}$ kV.

№ 466. Нейтраль трансформатора заземлена через импидор, имеющий $L_1 = 1,64$ H, $C = 2 \cdot 10^{-8}$ F и $R = 1000\ \Omega$. Индуктивность трансформатора равна $L = 0,4$ H. Определить максимальное напряжение на нейтрали, если в трансформатор попадает срезанная волна $U = 600\,(e^{-4,7t} - e^{-5,2t})$ kV.

ОТВЕТЫ.

I.

№ 1. $3{,}98\,\frac{\text{абкулон}}{\text{cm}^2}$; $1{,}325 \cdot 10^{-9}$ C/cm^2.

№ 2. $60\,\frac{\text{абвольт}}{\text{cm}}$; 18 kV/cm.

№ 3. 4,3.

№ 5. $80\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 6. $10\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 7. 240 kV.

№ 8. 5 kV.

№ 9. $r = 7{,}5$ cm.

№ 11. $x = 4{,}775 \ln (0{,}478y - 1) - 0{,}578y + 10$.

№ 13. 71,4 kV.

№ 14. $128{,}3\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $66{,}8\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 15. $30{,}1\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $11{,}8\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 16. $86{,}8\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 17. $43{,}3\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $16{,}45\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 19. 0,762 cm.

№ 20. 67 mm^2.

№ 21. $r = 6{,}98$ mm; $g = 32{,}9\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 22. 0,76 cm.

№ 23. 3,67.

№ 24. $g = 47{,}5\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $C = 0{,}24\,\frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$.

№ 25. $g = 31{,}6\,\frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $U = 23{,}3$ kV.

№ 26. $\begin{cases} r = 0{,}795 \quad 0{,}9 \quad 1{,}0 \quad 1{,}1 \quad 1{,}5 \quad 2{,}0 \quad 2{,}295\ \text{cm} \\ g = 45{,}0 \quad 39{,}9 \quad 35{,}8 \quad 32{,}6 \quad 23{,}9 \quad 17{,}9 \quad 15{,}6\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}. \end{cases}$

№ 28. $17\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 29. 21,4 kV.

№ 30. $0{,}245\ \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$.

№ 31. $0{,}40\ \frac{\mu\text{F}}{\text{km}}$.

№ 32. $4{,}62\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 33. $33{,}5\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 35. $13{,}8\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 36. 202 kV.

№ 37. 3,95 cm.

№ 39. $60{,}9\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $3{,}62 \cdot 10^{-11}$ F.

№ 40. $22{,}35\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $3{,}18 \cdot 10^{-11}$ F.

№ 42. $33{,}1\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 43. 2220 kV_m.

№ 45. 3,42 cm.

№ 46. 27,1 cm.

№ 48. $7^\circ 57'$; $17{,}75\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 49. $31^\circ 50'$.

№ 51. $C = 512$ cm; $g_1 = 36{,}6\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $g_2 = 13{,}04\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 52. 82,8; 27,6; $16{,}56\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 53. $44{,}4\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $8{,}88\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 54. $13{,}07\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $11{,}62\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 56. $30{,}1\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$; $24{,}5\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 57. $63{,}0\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 58. $62{,}6\ \frac{\text{kV}}{\text{cm}}$.

№ 59. $g_1 = 14{,}17\,\frac{kV}{cm}$; $g_2 = 43{,}8\,\frac{kV}{cm}$; $g_3 = 3{,}02\,\frac{kV}{cm}$.

№ 60. 50,75 kV.

№ 62. $1{,}275 \cdot 10^{-7}\,\frac{C}{cm}$.

№ 64. 4,88 kV.

№ 65. $\frac{4\pi R\sigma}{\varepsilon}$.

№ 66. 1) $U = \frac{4\pi\rho R^3}{3\varepsilon l} = \frac{Q}{\varepsilon l}$; 2) $U = \frac{4\pi\rho R^2}{3\varepsilon}$;

3) $U = \frac{2\pi\rho}{\varepsilon}\left(R^2 - \frac{1}{3}l^2\right)$.

№ 68. $14{,}7 \quad 10^6$ V.

№ 70. $U = \frac{U_2 - U_1}{\ln\frac{R_2}{R_1}}\ln r$; $E = \frac{U_1 - U_2}{r\ln\frac{R_2}{R_1}}$; $E_{max} = \frac{U_1 - U_2}{R_1\ln\frac{R_2}{R_1}}$;

$C = \frac{\varepsilon}{2\ln\frac{R_2}{R_1}}$.

№ 73. $4{,}35 \quad 10^{-9}$; $8{,}70 \cdot 10^{-9}$; $5{,}90 \quad 10^{-9}$ F/km.

№ 74. $R_1 = \infty$.

№ 75. $R_1 = 0{,}5R_2$.

№ 76. $\frac{R_2}{R_1} = e = 2{,}718$.

II.

№ 77. $5{,}77 \cdot 10^{-11}$A.

№ 78. $9{,}58 \cdot 10^{-17}$A.

№ 79. 11,84 и 96,9.

№ 80. 5,22.

№ 82. $26{,}45\,\frac{kV}{cm}$.

№ 84. $p = 0{,}1505\,\frac{kG}{cm^2}$; $g = 97\,\frac{kV}{cm}$.

№ 86. 1,14 μ sec.

№ 87. 2,54 μ sec.

№ 88. 0,9.

№ 90. 2,58.

№ 91. 3,83.

№ 93. 41,5 kV.

№ 94. 279 kV.

№ 96. 447 kV_m.
№ 97. 10 000 kV_m.
№ 98. 7,23.
№ 99. 3,34.
№ 100. 94 cm.
№ 101. 1123 kV_m.
№ 103. 134,4 cm.
№ 104. 279 cm.
№ 106. 302 kV_m.
№ 108. 285 kV.
№ 109. 104 kV_m.
№ 111. 237 kV.
№ 112. 512 kV.
№ 113. 88 kV.
№ 114. 62,6 kV.
№ 115. 23,65 cm.
№ 116. 123,0 kV_m; 99,2 kV_m.
№ 117. 5110 kV_m; 4110 kV_m.
№ 118. 29,6 kV_m.
№ 119. 1,062.
№ 120. 0,868.
№ 122. 67,7 kV.

III.

№ 124. 153 kV.
№ 125. 117 kV.
№ 126. 106,4 kV.
№ 127. $q = 50$ mm², $U_k = 97{,}9$ kV,
$q = 95$ mm², $U_k = 128{,}5$ kV,
$q = 150$ mm², $U_k = 156{,}0$ kV,
$q = 240$ mm², U_k 190,0 kV.
№ 128. $S = 2$ m, $U_k = 136{,}8$ kV,
$S = 4$ m, $U_k = 154{,}0$ kV,
$S = 6$ m, $U_k = 164{,}0$ kV.
№ 129. 264 kV.
№ 130. 228 kV.

№ 131. 371 kV.
№ 132. 109,4 kV.
№ 133. 45,6 mm.
№ 134. 150 mm^2.
№ 135. *CA* 150.
№ 136. *CA* 95.
№ 137. 2,11 m.
№ 139. а) 0, б) 2530 kW.
№ 140. 119 kW.
№ 142. 29,7 kV.

IV.

№ 144. $114 \frac{kV}{cm}$.
№ 145. 39,7°.
№ 146. + 8,7%.
№ 147. 1,043.
№ 149. $89,7 \frac{kV}{cm}$.
№ 150. 0,25 kG.
№ 152. 3,28 cm.
№ 153. 96,0 kV.
№ 154. 112,4 kV.
№ 155. 0,89 cm.
№ 156. 110,9 kV.
№ 157. 88 kV.
№ 158. 17,8 kV.
№ 159. 37,2 kV.
№ 160. 112 kV.
№ 161. 56,2 kV_m.
№ 162. 48,9 kV_m.
№ 163. 290,5 kV_m.
№ 164. 163,3 kV_m.
№ 165. 27,7 cm.
№ 166. 115,4 kV_m.
№ 167. 30,4 kV_m.
№ 168. 31,3 kV_m.

V.

№ 170. 4,8 kV; $32 \frac{kV}{cm}$.
№ 171. 66,9 kV.

№ **172**. 32,6 kV.
№ **174**. 192 kV.
№ **175**. 433 kV.
№ **176**. 543 kV.
№ **178**. 9,15 kV.
№ **179**. 29,0 kV; 6,18 kV.
№ **180**. 35,6 kV; 7,92 kV.
№ **181**. 16,3 kV.
№ **182**. 80,8° C.
№ **183**. 53 kV;
23,4 kV.
№ **184**. 40,6 kV.
№ **185**. 74,6° C.
№ **186**. 24,1 kV.
№ **187**. 10,15 kV.
№ **188**. 49,1 kV.
№ **189**. 67,7° C.
№ **190**. 128° C.
№ **191**. 6,83 kV.
№ **192**. 0,0402.
№ **193**. $a = 0{,}0485; \quad p_0 = 2{,}15 \cdot 10^{-12} \frac{w}{cm,\ V^2}$.

VI.

№ **195**. 25,75 kV; 7,8 cm.
№ **197**. 49,6 kV.
№ **198**. 105,4 kV.
№ **199**. 171,7 kV.
№ **201**. 70 kV.
№ **202**. 129,5 kV.
№ **204**. 137 kV; 87,3 kV.
№ **205**. 201 mm; 134 mm.
№ **206**. 124 mm; 138 mm.
№ **207**. 35 kV.
№ **209**. 582 kV; 436,5 kV.
№ **210**. 363,5 kV.
№ **212**. 1,85 m; 11 шт.
№ **213**. $n = 7$ шт.
№ **214**. 130 kV.
№ **215**. 106,2 kV.
№ **216**. 130 kV; 1,625.
№ **217**. 145 kV; 1,53.

№ **218**. 115,5 kV.
№ **219**. 114 kV.
№ **220**. 99,0 kV.
№ **221**. 151,0 kV
№ **222**. 131 kV.
№ **224**. 130 kV.
№ **225**. 188 kV.
№ **226**. 187 kV.
№ **228**. 201 kV.
№ **229**. 222 kV.
№ **230**. 319 kV.
№ **231**. 25,2 cm.
№ **233**. $r_0 = 0{,}70$ cm, $r_n = 2{,}68$ cm, $l_0 = 32{,}0$ cm, $l_n = 7{,}52$ cm, $n = 8$, $l = 36{,}0$ cm,
№ **234**. $r_0 = 3{,}76$ cm, $r_n = 14{,}4$ cm, $l_0 = 327$ cm, $l_n = 76{,}8$ cm, $n = 31$, $l = 338$ cm.

VII.

№ **286**. 181 G.
№ **237**. $U = \sqrt{\dfrac{2k(\alpha - \alpha_0)}{A \sin 2\alpha}}$.
№ **238**. 4,22 kV_m (3,41 kV).
№ **239**. 20,8 kV_m (14,7 kV).
№ **240**. 5,3 mm.
№ **241**. 21,3 kV_m.
№ **242**. 115 kV_m.
№ **243**. 600 kV_m.
№ **244**. 3,1 m.
№ **245**. 0,917.
№ **246**. 0,910.
№ **247**. 1,5%; 3,3%.
№ **249**. 4,88%.
№ **250**. 0,1.
№ **252**. $F_1 - F_2 = 2kr\left(UI_1 + \dfrac{I^2 r}{2}\right)$.
№ **253**. 3,33%.
№ **254**. 2,6 kW.
№ **255**. 3 μsec.
№ **256**. 150 Ω; 750 Ω.

VIII.

№ **258**. 85 kG.
№ **259**. 19,8 kG.
№ **260**. 50 cm.
№ **261**. 3,28.
№ **262**. 4,8 cm.
№ **264**. 0,138 kG; 0,129 kG.
№ **265**. 4,53 kG; 4,22 kG.
№ **267**. 79,8 kG.
№ **268**. 1410 kG.
№ **270**. 583 kG.
№ **271**. 162,2 kG.
№ **273**. 14,0 kG.
№ **274**. 33,8 kG.
№ **275**. $$M = I^2 l \ln \frac{a+\sqrt{l^2+a^2}}{l}\,\mathrm{dn} =$$
$$= 1{,}02 \cdot 10^{-8}\, I^2 l \ln \frac{a+\sqrt{l+a^2}}{l}\ \mathrm{kG}.$$
№ **276**. 374 cm · kG.
№ **277**. 8,66 kG.
№ **278**. 8660 cm · kG.
№ **279**. 9,4 cm kG.
№ **280**. 105,5 cm · kG.
№ **281**. 129 kG.
№ **282**. 585 cm · kG.
№ **283**. 62,7 kG.

IX.

№ **285**. 5,79 Ω.
№ **286**. 10,32 Ω.
№ **288**. 29,4 Ω.
№ **289**. 31,4 Ω.
№ **290**. 34,1 Ω.
№ **291**. 28,8 Ω.
№ **293**. 73,6 Ω.
№ **295**. 23,2 Ω.
№ **296**. 5,74 Ω.
№ **297**. 18,26 Ω.
№ **299**. 11,3 Ω.
№ **300**. 6,3 Ω.
№ **301**. 10.

№ 302. 6.
№ 303. 22,75 m.
№ 305. 40,6 V.
№ 306. 2770 V.
№ 307. 1374 V.
№ 308. 203 V.

№ 310. $R_a = 1{,}333\,\Omega$; $\frac{I_0}{I_e} = 0{,}119.$

№ 311. $R_a = 0{,}1413\,\Omega$; $\frac{I_0}{I_e} = 0{,}028.$

X.

№ 312. 4,83 Ω/km.
№ 314. 4,18 V; 75,4 V.
№ 315. 168 m.
№ 316. 8,87 kV.
№ 317. 157 V.
№ 318. 33,5 V.
№ 319. 0,8 V.
№ 320. 34,4V.
№ 321. 3,03 mA.
№ 322. 5,1 mA.
№ 323. 2,56 mA.
№ 324. 0,159 mA.
№ 325. 2,565 μA.
№ 327. 150 V.
№ 329. 4,44 kV.
№ 330. 9,05 kV.
№ 331. 104 m.

XI.

№ 332. $0{,}245 \frac{\mu F}{km}$; $3{,}816 \cdot 10^{\;4} \frac{H}{km}$.

№ 333. $0{,}193 \frac{\mu F}{km}$; $4{,}10 \;\; 10^{-4} \frac{H}{km}$.

№ 334. $0{,}187 \frac{\mu F}{km}$; $3{,}94 \cdot 10^{-4} \frac{H}{km}$.

№ 336. $0{,}190 \frac{\mu F}{km}$; $3{,}844 \cdot 10^{-4} \frac{H}{km}$.

№ 337. $0{,}31\,\frac{\mu F}{km}$; $2{,}47 \cdot 10^{-4}\,\frac{H}{km}$.

№ 338. $C = 0{,}246\,\frac{\mu F}{km}$;

$L_1 = L_3 = 6{,}23 \cdot 10^{-4}\,\frac{H}{km}$;

$L_2 = 5{,}54 \cdot 10^{-4}\,\frac{H}{km}$.

№ 339. $C = 0{,}232\,\frac{\mu F}{km}$; $L = 3{,}82 \cdot 10^{-4}\,\frac{H}{km}$.

№ 340. $C = 0{,}262\,\frac{\mu F}{km}$;

$L_1 = L_3 = 5{,}43 \cdot 10^{-4}\,\frac{H}{km}$;

$L_2 = 4{,}74 \cdot 10^{-4}\,\frac{H}{km}$.

№ 341. 5,4 mm.
№ 342. 36,5 m.

№ 343. $6{,}78 \cdot 10^{-3}\,\frac{W}{cm}$.

№ 344. $8{,}80 \cdot 10^{-2}\,\frac{W}{cm}$.

№ 345. $4{,}03 \cdot 10^{-2}\,\frac{W}{cm}$.

№ 346. 45,8 tΩ.
№ 347. 69,6 tΩ.
№ 349. 52,92tΩ.
№ 350. 67,26 tΩ.
№ 351. 65,6 tΩ.
№ 352. 47,2 tΩ.
№ 354. 306 A.
№ 355. 315 A.
№ 356. 45 300 kVA.

XII.

№ 357. $4{,}7 \cdot 10^4$ Hz.
№ 358. $7{,}13 \cdot 10^5$ Hz.
№ 359. $1{,}78 \cdot 10^5$ Hz.
№ 360. $1{,}59 \cdot 10^5$ Hz.
№ 361. Апериодический.

№ 363. $9{,}33 \cdot 10^{-3}$ sec.
№ 365. 52,7 kV.
№ 366. 39,7 kV.
№ 367. 181,3 kV.

№ 368. $U_c = -U_L \cong 98e^{-22{,}9t} \cdot \sin(2{,}89 \cdot 10^5 t)$ kV.

№ 369. $U_c = -U_L \cong 122{,}4e^{-200t} \cdot \sin(5{,}45 \cdot 10^4 t)$ kV.

№ 372. 38,3 kV.
№ 373. 14,2 μF.
№ 374. 15 kV.
№ 375. 263 A.
№ 377. $U_2 = 600$ kV; $U_1' = 300$ kV.
№ 378. 125,8 kV.
№ 379. 410 Ω.
№ 380. 40 kV.
№ 381. 153 kV.
№ 383. 50,2 Ω.
№ 385. 0,114; 1,0.
№ 386. 0,133; 1,0.
№ 387. 253 kV.
№ 389. 408 kV.
№ 390. 188 kV.
№ 392. 450 kV.
№ 393. 18,6 kV.
№ 394. ~2,5 kV.
№ 396. 784 kV.
№ 397. 1570 kV.
№ 398. 1615 kV.
№ 399. 1560 kV.
№ 402. 115 kV.
№ 404. 272 kV.
№ 405. 163,3 kV.
№ 406. 697 kV.
№ 407. 680 kV.

№ 408. При $0 < t \leqslant 0{,}186$ μsec,

$$U_2 = U_1 = 4000\left(e^{-0{,}05t} - e^{-2{,}0t}\right) \text{ kV}.$$

При $0{,}186$ μsec $\leqslant t$,

$$U_2 = 1778\left(e^{-0{,}05t} - e^{-2{,}0t}\right) \text{ kV}.$$

№ **409.** 167 Ω.
№ **411**. 468 kV.
№ **412**. 2 km.
№ **413**. 1,86 km.
№ **414**. $0{,}179 \cdot 10^{-4}$.
№ **416**. 350 Ω.
№ **417**. 219,5 Ω.
№ **418.** 263,5 Ω.
№ **419**. 343 Ω.
№ **420.** 276 Ω.
№ **422**. 0,2325; 0,165; 0,1274.
№ **423**. 0,264.
№ **424**. 0,396.
№ **425.** 1540 kV.
№ **427**. 2714 kV.
№ **429**. 220 Ω.
№ **430**. 156 Ω.
№ **431**. 132 Ω.
№ **432**. 90,2 Ω.
№ **433**. 162,5 Ω.
№ **435**. 2210 kV.
№ **436.** 3530 kV.
№ **438.** 2690 kV.
№ **439**. 2375 kV.
№ **440.** 30,7 Ω.
№ **441**. 3000 kV.
№ **442**. 3300 kV.
№ **443**. $U = 3510$ kV $< U_c$; $U_c = 4470$ kV.
№ **445.** 446 kV.
№ **446**. 424 kV.
№ **447**. 227 kV.
№ **449**. 0,404; 0,245.
№ **450.** 0,611; 0,467.
№ **451**. 0,603; 0,623; 0,658.
№ **452**. 0,6[illegible]4; 0,657; 0,671.
№ **453.** 0,418; 0,482; 0,503.
№ **455** 98 kV.
№ **456**. 7800 Hz.
№ **457**. 15400 Hz.
№ **459**. 6,46 kV.
№ **461**. 2190 kV.

№ 462. 918 kV.
№ 463. 276 kV.
№ 464. 92,8 kV.
№ 465. 163,5 kV.
№ 466. 54 V.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Отв. редактор *А. И. Кузьминский.* **Техн. редактор** *Е. А. Мосевич*

Корректор *Н. И. Шиманская.*

Ленгорлит № 11792 Сдано в набор 15/I—36 г. Подписано к печати 17/V—36 г.
Колич. печ. листов $11^{1}/_{2}$ Колич.учетно-авторск. листов 11,3 Тираж 10 000
Заказ № 539 Формат бумаги $82 \times 110^{1}/_{32}$

2-я тип. Трансжелдориздата им. Лоханкова, Ленинград, ул. Правды, 15.

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	*Строка*	*Напечатано*	*Должно быть*
94	1 снизу	60 m	60 cm
96	14 сверху	7 kV	7 km
152 и 153	В показателях степени всюду вместо $\mathcal{T}$ должно быть T		
171	3 сверху	$\frac{C}{\mathrm{cm}}$	$\frac{C}{\mathrm{cm}^2}$
174	14 „	10,15 kV	12,9 kV
175	5 снизу	UI_1	U_1I

Цена 1 р. 90 к. Пер. 60 к.

ЭЭ—30—5—2