Электродинамика
и распространение радиоволн

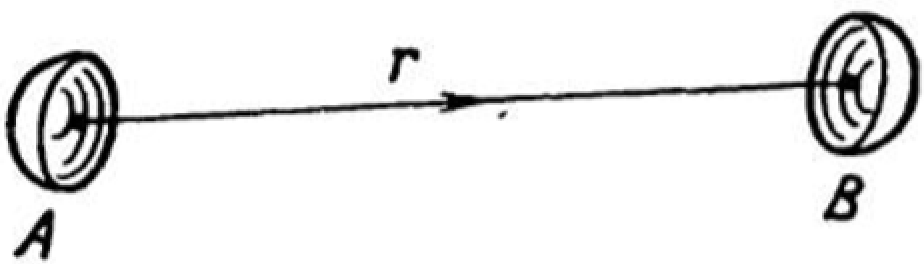
Лекция 15
29.05-1.06.2020

Русов Юрий Сергеевич

Формула идеальной радиосвязи. Множитель ослабления

Определим связь между мощностью, излучаемой передатчиком на одном конце радиолинии и мощностью, поступающей в приемник, на другом ее конце.

На рисунке показана идеальная радиолиния. Пусть A и B – точки размещения передатчика и приемника, соответственно, а r – расстояние между ними.



Формула идеальной радиосвязи

Передатчик создает гармонические колебания с заданной длиной волны λ. Известна также эффективная (действующая) мощность $P_{прд}$, развиваемая передатчиком на зажимах передающей антенны. Считается, что средой распространения служит вакуум (или воздух) с параметрами ε_0, μ_0, так что омические потери на трассе распространения радиоволн отсутствуют. Ставится задача определить мощность $P_{пр}$, поступающую в приемник. Первым шагом на пути решения этой базовой задачи будет следующий мысленный эксперимент. Предположим, что передающая антенна представляет собой гипотетический изотропный излучатель, создающий однородные сферические волны с одинаковым значением амплитуды в пределах каждого волнового фронта.

Формула идеальной радиосвязи

Модуль вектора Пойнтинга на удалении r от передатчика при этом составит

$$П_{ср.равн} = \frac{P_{прд}}{4\pi r^2}.$$

Естественно считать, что передающая антенна ориентирована в пространстве таким образом, что максимум ее излучения наблюдается в направлении на точку размещения приемной антенны. Тогда фактическое значение плотности потока мощности от передатчика вблизи антенны приемника составит

$$П_{ср} = \frac{D_{прд} P_{прд}}{4\pi r^2},$$

где $D_{прд}$ – коэффициент направленного действия (КНД) передающей антенны.

Формула идеальной радиосвязи

Мощность, поступающую в приемник, проще всего вычислить, предположив, что приемная антенна принадлежит к классу апертурных антенн, т.е. антенн, имеющих излучающую поверхность, например, зеркальных, линзовых, рупорных и т.д. Пусть $A_{пр}$ – площадь поверхности приемной антенны, называемая также площадью ее раскрыва. Строгий анализ показывает, что аккумуляция всей мощности, проходящей через раскрыв, принципиально невозможна, и так называемая эффективная площадь раскрыва $A_{пр.эф}$ всегда меньше геометрической $A_{пр}$. КНД приемной антенны $D_{пр}$ связан с ее эффективной площадью соотношением

$$D_{пр} = \frac{4\pi A_{пр.эф}}{\lambda^2}.$$

Формула идеальной радиосвязи

Мощность, поступающая в приемник

$$P_{\text{пр}} = \Pi_{\text{ср}} A_{\text{пр.эф}}.$$

С учетом приведенных выше соотношений мощность, поступающая в приемник, определяется выражением

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{прд}} D_{\text{пр}} D_{\text{прд}} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2.$$

Это **формула идеальной радиосвязи**, которая достаточно хорошо описывает энергетические соотношения в радиоканале при отсутствии дополнительных потерь за счет среды распространения.

Формула идеальной радиосвязи

Для учета влияния среды распространения в формулу вводят множитель ослабления *F*

$$P_{пр} = P_{прд} D_{пр} D_{прд} \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 F.$$

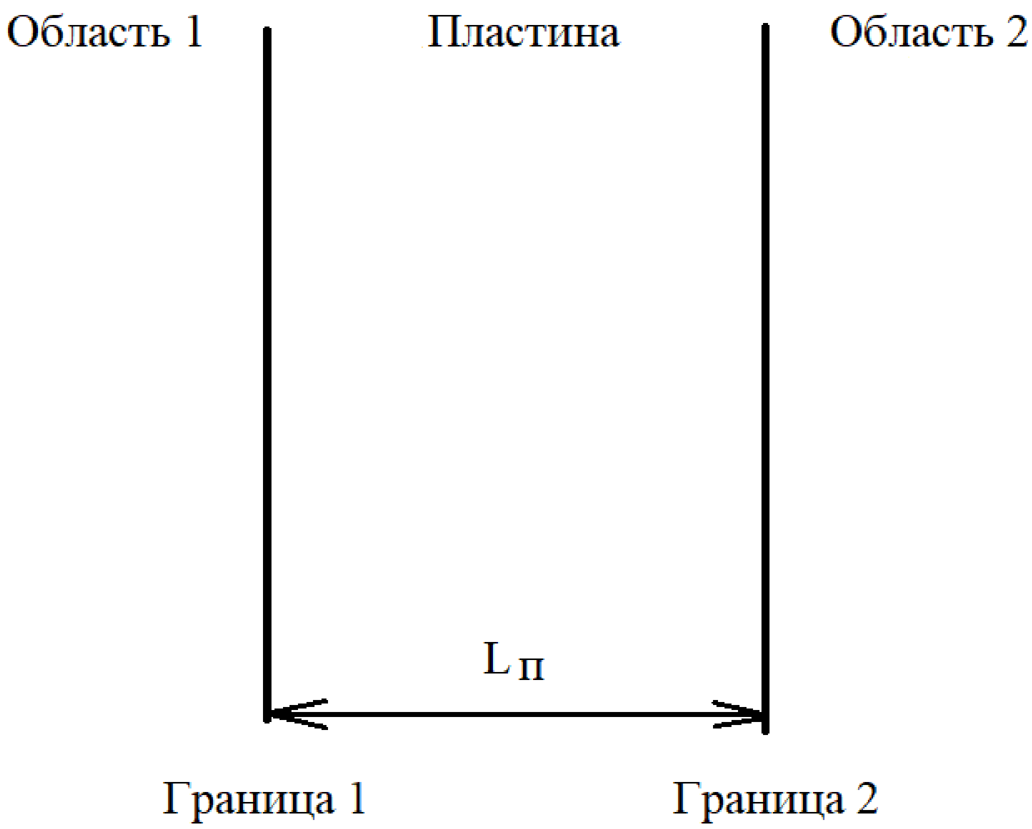
Следует обратить внимание, что множитель ослабления *F* в этой формуле учитывает ослабление **мощности** электромагнитной волны, а не напряженности электрического поля.

Вопросы согласования

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

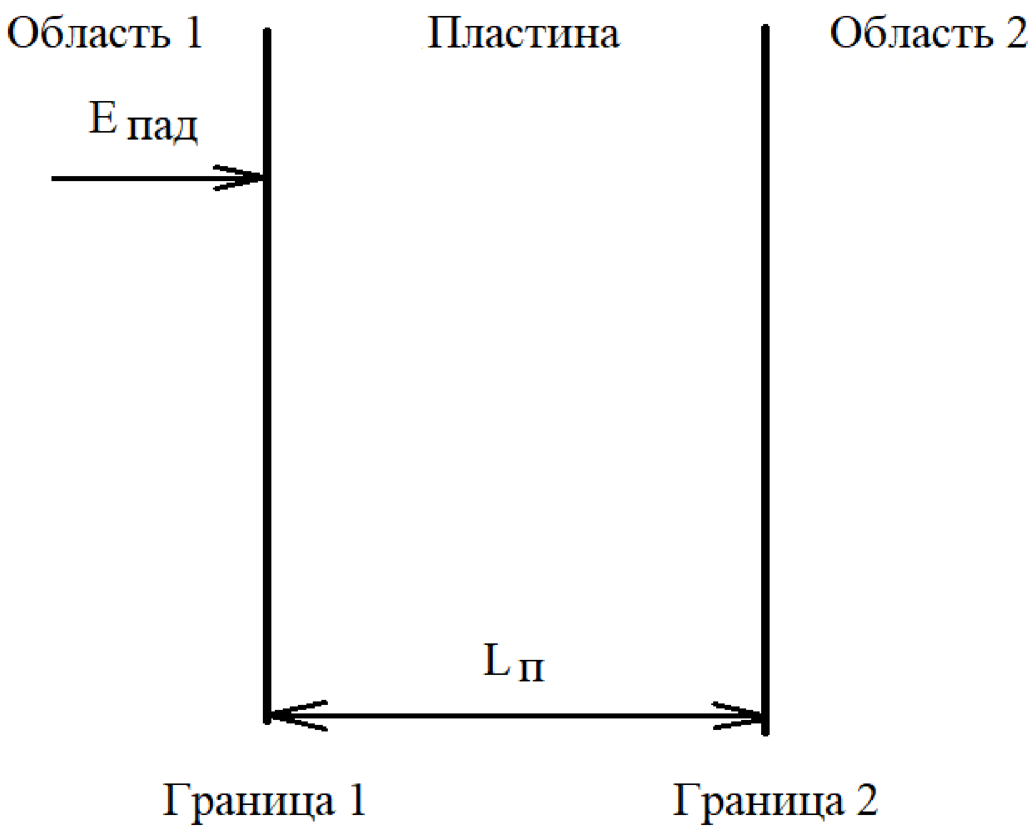
Рассмотрим нормальное падение волны из диэлектрической области 1 с характеристическим сопротивлением Z_1 на плоскопараллельную диэлектрическую пластину толщиной $L_п$ с характеристическим сопротивлением $Z_п$. За пластиной располагается диэлектрическая область 2 с характеристическим сопротивлением Z_2. Среды являются идеальными диэлектриками без потерь.

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину



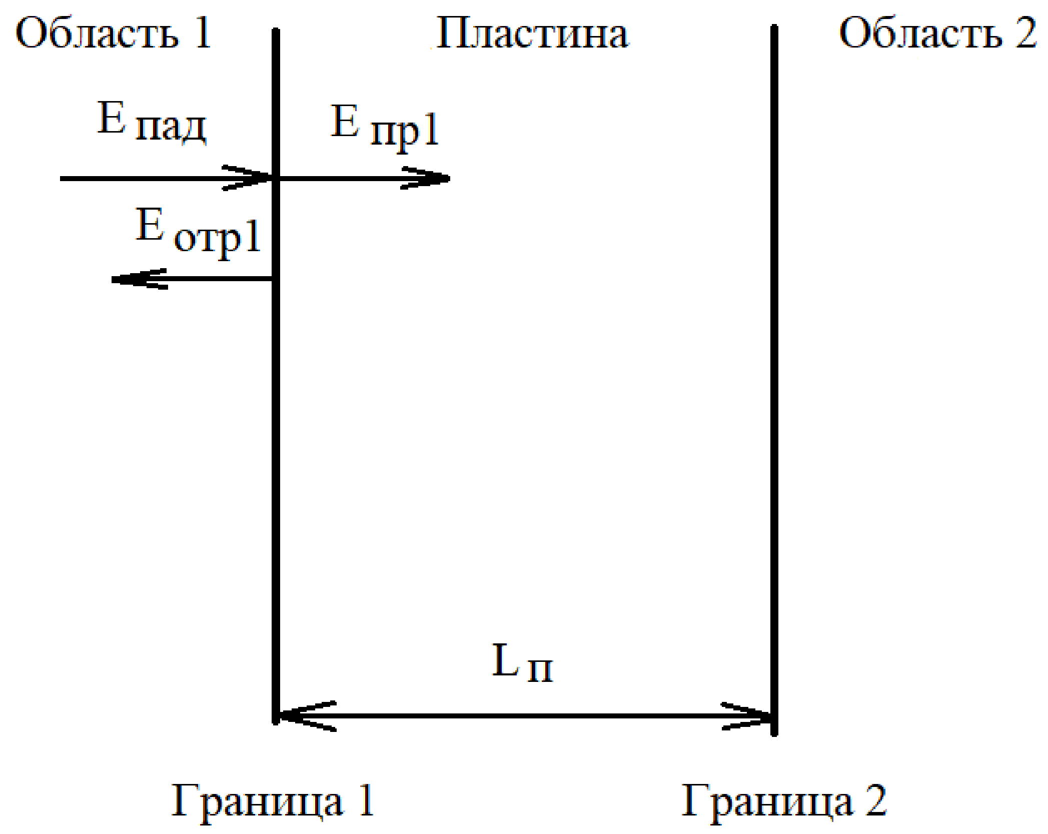
Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Из области 1 на пластину по нормали падает электромагнитная волна с амплитудой напряженности электрического поля $E_{пад}$.



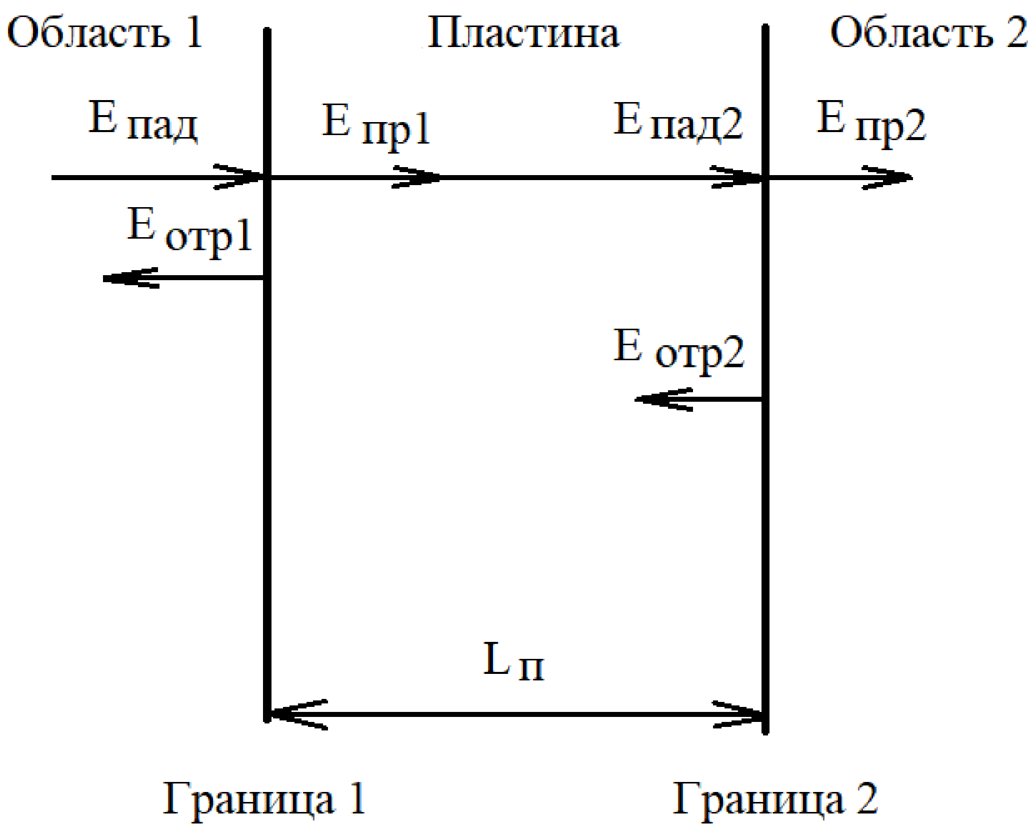
Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

На границе 1 возникает прошедшая в область пластины волна $E_{пр1}$ и отраженная в область 1 волна $E_{отр1}$.



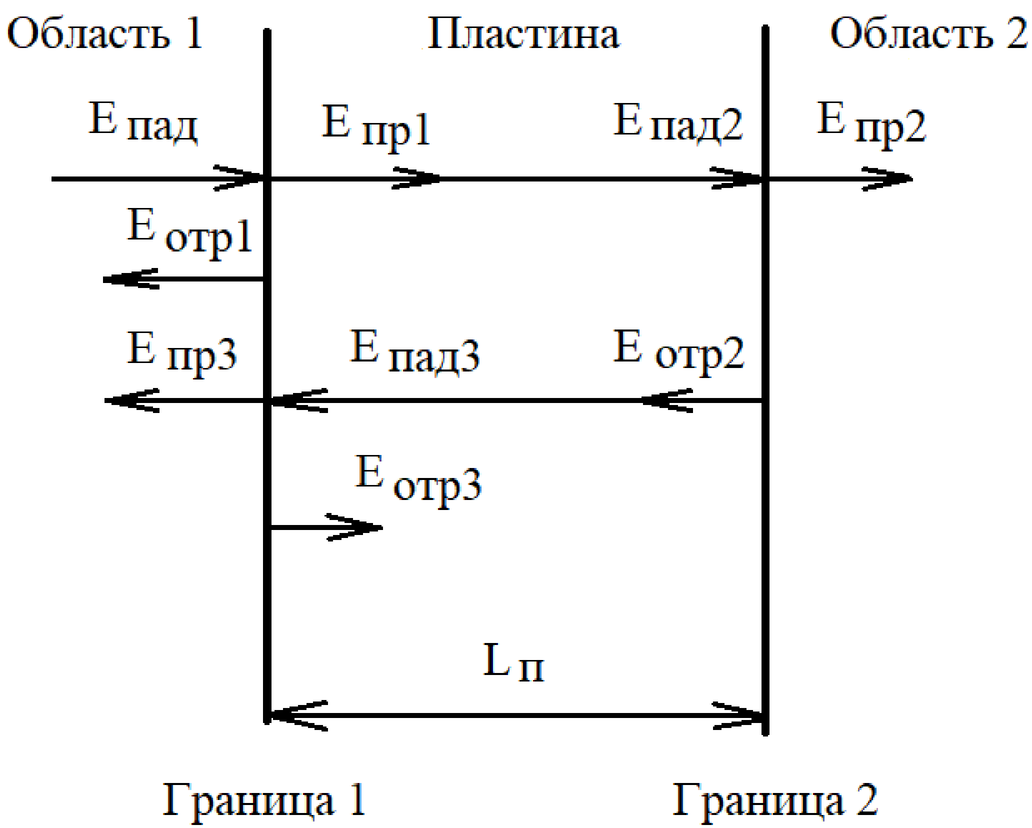
Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Пройдя через пластину, волна падает на границу 2 с амплитудой $E_{пад2}$. На границе 2 возникает прошедшая в область 2 волна $E_{пр2}$ и отраженная в область пластины волна $E_{отр2}$.



Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Волна, отраженная от границы 2, пройдя через пластину, падает на границу 1 с амплитудой $E_{пад3}$. На границе 2 возникает прошедшая в область 1 волна $E_{пр3}$ и отраженная в область пластины волна $E_{отр3}$.



Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Дальнейшие рассуждения ведутся в предположении малости коэффициентов отражения на границах 1 и 2. С учетом этого можно пренебречь вторичным отражением от границы 1 (поле $E_{отр3}$) и последующими переотражениями волн и рассматривать только первые отражения от границ.

В общем случае амплитуды отраженных и прошедших волн являются комплексными.

Амплитуда отраженной волны при первом отражении

$$E_{\text{отр}1} = E_{\text{пад}}\Gamma_1,$$

где Γ_1 – коэффициент отражения от границы 1.

Амплитуда прошедшей через границу 1 волны

$$E_{\text{пр}1} = E_{\text{пад}}P_1,$$

где P_1 – коэффициент прохождения через границу 1.

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Пройдя через пластину, волна приобретает фазовый набег, зависящий от толщины пластины $L_п$ и коэффициента фазы в диэлектрической пластине $\beta_п$.

Амплитуда падающей на границу 2 волны

$$E_{пад2} = E_{пр1} e^{-i\beta_п L_п} = E_{пад} P_1 e^{-i\beta_п L_п}.$$

Амплитуда отраженной волны при отражении от границы 2

$$E_{отр2} = E_{пад2} \Gamma_2 = E_{пад} P_1 \Gamma_2 e^{-i\beta_п L_п},$$

где Γ_2 – коэффициент отражения от границы 2.

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Пройдя через пластину в обратном направлении, волна снова приобретает фазовый набег, зависящий от толщины пластины $L_п$ и коэффициента фазы в диэлектрической пластине $\beta_п$.

Амплитуда волны, падающей на границу 1 со стороны пластины

$$E_{пад3} = E_{отр2} e^{-i\beta_п L_п} = E_{пад} P_1 \Gamma_2 e^{-i2\beta_п L_п}.$$

Амплитуда прошедшей в область 1 волны

$$E_{пр3} = E_{пад3} P_1 = E_{пад} P_1^2 \Gamma_2 e^{-i2\beta_п L_п}.$$

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

В области 1 в направлении, противоположном направлению падающей волны, распространяются две волны $E_{\text{отр}1}$ и $E_{\text{пр}3}$. Суперпозиция этих волн определяет поле результирующей отраженной волны в области 1

$$E_{\text{отр}} = E_{\text{отр}1} + E_{\text{пр}3}.$$

В радиотехнике одной из важнейших задач является задача согласования, т.е. обеспечения такого режима работы, когда нет потерь энергии электромагнитных волн на отражение. Режим согласования и полная передача энергии из области 1 в область 2 обеспечиваются в рассматриваемой системе при условии

$$E_{\text{отр}} = 0.$$

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Рассмотрим равенство

$$E_{\text{отр}} = E_{\text{пад}}\Gamma_1 + E_{\text{пад}}P_1^2\Gamma_2 e^{-i2\beta_{\text{п}}L_{\text{п}}} = 0.$$

$$\Gamma_1 + P_1^2\Gamma_2 e^{-i2\beta_{\text{п}}L_{\text{п}}} = 0.$$

Рассматриваются среды без потерь, поэтому характеристические сопротивления всех трех областей и коэффициенты Γ_1, Γ_1 и P_1, определяемые формулами Френеля с учетом характеристических сопротивлений, являются действительными величинами. С учетом предположения о малости коэффициентов отражения от границ можно приближенно считать коэффициент прохождения

$$P_1 \approx 1.$$

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

В рассматриваемом уравнении отдельно записывается равенство для действительных и мнимых частей.

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 \cos 2\beta_\text{п} L_\text{п} = 0,$$

$$\sin 2\beta_\text{п} L_\text{п} = 0.$$

Из второго равенства получается условие

$$2\beta_\text{п} L_\text{п} = \pi n,$$

где n – целое число. С учетом этого

$$L_\text{п} = \frac{\pi n}{2\beta_\text{п}} = \frac{\pi n \lambda_\text{п}}{2 \cdot 2\pi} = n\frac{\lambda_\text{п}}{4},$$

где $\lambda_\text{п}$ – длина волны в материале пластины.

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Рассмотрим случай n=1. При этом толщина пластины

$$L_{п} = \frac{\lambda_{п}}{4}.$$

Из равенства действительных частей находим

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 \cos 2\beta_{п} L_{п} = 0,$$

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 \cos 2\frac{2\pi \cdot \lambda_{п}}{\lambda_{п} \cdot 4} = 0,$$

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 \cos \pi = 0,$$

$$\Gamma_1 = \Gamma_2.$$

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Коэффициенты отражения можно записать через характеристические сопротивления областей

$$\frac{Z_{\text{п}} - Z_1}{Z_{\text{п}} + Z_1} = \frac{Z_2 - Z_{\text{п}}}{Z_2 + Z_{\text{п}}},$$

откуда

$$Z_{\text{п}} = \sqrt{Z_1 Z_2}.$$

Пластина толщиной, равной четверти длины волны в материале пластины, представляет собой четвертьволновый трансформатор, который обеспечивает идеальное согласование областей 1 и 2 при выполнении полученного соотношения для характеристических сопротивлений.

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Четвертьволновый трансформатор применяется также для согласования отрезков линий передач с различными параметрами, например, для согласования волноводов разного поперечного сечения.

Рассмотрим случай n=2. При этом толщина пластины

$$L_{п} = \frac{\lambda_{п}}{2}.$$

Из равенства для действительных частей находим

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 \cos 2\frac{2\pi \cdot \lambda_{п}}{\lambda_{п} \cdot 2} = 0,$$

$$\Gamma_1 + \Gamma_2 \cos 2\pi = 0,$$

$$\Gamma_1 = -\Gamma_2.$$

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Коэффициенты отражения можно записать через характеристические сопротивления областей

$$\frac{Z_\text{п} - Z_1}{Z_\text{п} + Z_1} = -\frac{Z_2 - Z_\text{п}}{Z_2 + Z_\text{п}},$$

откуда

$$Z_1 = Z_2.$$

Пластина толщиной, равной половине длины волны в материале пластины, обеспечивает идеальное согласование областей 1 и 2 при равенстве их характеристических сопротивлений. Если полуволновая пластина помещена в однородную среду, например воздух, то при нормальном падении электромагнитная волна проходит через нее без отражений.

Прохождение электромагнитной волны через плоскопараллельную пластину

Это свойство полуволновой пластины используется для создания радиопрозрачных диэлектрических укрытий для антенн, обеспечивающих защиту антенн от механических воздействий, влаги, снега, пыли и других негативных факторов.