Тема 2. Электромагнитные волны в направляющих системах

Лекция 14. Передача электромагнитной энергии от генератора к нагрузке.

Суперпозиция падающих и отраженных волн в линии передачи. Параметры, характеризующие режимы работы линии передачи

Рассмотрим участок линии передачи длиной L рис. 1.

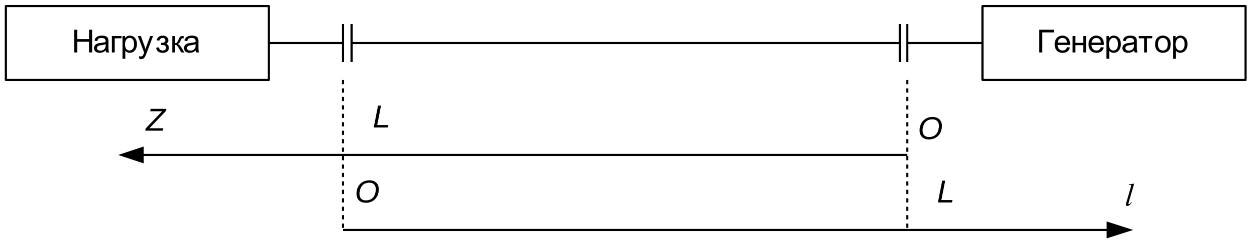

Рис. 1

Ранее было получено выражение, в силу которого любая составляющая поля в линии передачи СВЧ описывается функцией

$$L = F\left(x, y\right)e^{i\gamma z} + F\left(x, y\right)e^{-i\gamma z}.$$

Следовательно, любая составляющая вектора E и H также будет состоять из двух слагаемых. Ограничиваясь только поперечными составляющими и ($\gamma = \beta$), можно записать:

$$\left.\begin{aligned} E\left(z\right) &= E_n e^{-i\beta z} + E_o e^{i\beta z} \\ H\left(z\right) &= H_n e^{-i\beta z} + H_o e^{i\beta z} \end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

где E_n и H_n - комплексные амплитуды составляющих электрического и магнитного полей падающей волны;

E_o и H_o – аналогичные составляющие для отраженной волны.

Наиболее часто режим работы линии передачи определяется свойствами нагрузки. Поэтому целесообразно отсчет координат вдоль линии вести от нагрузки, для чего в выражении (1) заменяется z на l.

Учтем также, что для падающей волны волновое сопротивление

$$Z_c = E_n / H_n \geq 0,$$

а для отраженной волны -

$$Z_c = E_o / H_o \leq 0.$$

Поэтому вместо выражений (1) можно записать

$$\left.\begin{aligned} E\left(l\right) &= E_n e^{i\beta l} + E_o e^{-i\beta l} \\ H\left(l\right) &= \frac{1}{Z_c}\left(E_n e^{i\beta l} - E_o e^{-i\beta l}\right) \end{aligned}\right\}, \tag{2}$$

или

$$E(l) = E_n(l) + E_o(l); \qquad H(l) = Z_c^{-1}(En(l) - E_o(l)). \qquad (3)$$

Линия передачи электромагнитной энергии характеризуется волновым сопротивлением Z_c. Волновое сопротивление — это отношение комплексных амплитуд поперечных составляющих электрического и магнитного полей. Используя выражения для поперечных составляющих полей волн типа Н и Е, можно записать:

$$Z_{CH} = \left(\frac{E_x}{H_y}\right)_H = -\left(\frac{E_y}{H_x}\right)_H = \frac{\omega\,\mu_a}{\gamma};$$

$$Z_{CE} = \left(\frac{E_x}{H_y}\right)_E = -\left(\frac{E_y}{H_x}\right)_E = \frac{\gamma}{\omega\,\varepsilon_a}.$$

Для случая, когда $\gamma = \beta$, с учетом выражений для β и $\lambda_в$, получим:

$$\left.\begin{aligned} Z_{CH} &= \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon\,\mu} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}}; \\ Z_{CE} &= \sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{\varepsilon\,\mu} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_{kp}}\right)^2}, \end{aligned}\right\}$$

где Z_{CH} , Z_{CE} - волновое сопротивление для волн типа *H* и *E;*

$\sqrt{\frac{\mu_a}{\varepsilon_a}} = Z$ - волновое сопротивление диэлектрика, заполняющего волновод.

Характер зависимости Z_C от длины волны показан на рис. 2.

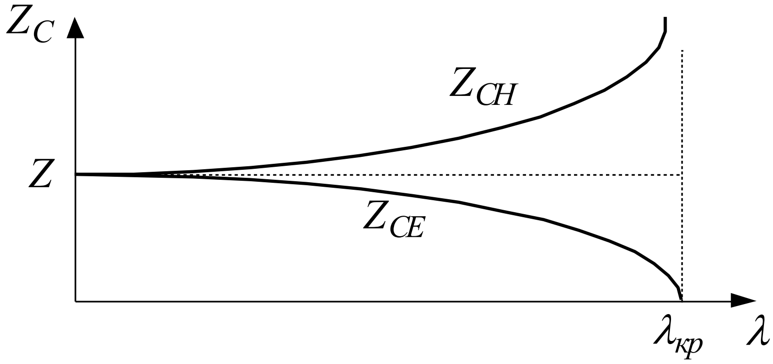

Рис. 2

Для коаксиального волновода волновое сопротивление определяется по формуле

$$Z_C = 138\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \cdot \lg\frac{R}{r_м}$$

Обычно выбирают $\frac{R}{r_м} = 2\ .\ .\ .\ 5$;

Степень отражения электромагнитной волны от нагрузки характеризуется коэффициентом отражения. ***Коэффициентом отражения по электрическому полю*** называется отношение поперечных составляющих электрического поля для отраженной и падающей волн в одной и той же точке поперечного сечения линии передачи:

$$P = \frac{E_o(l)}{E_n(l)}. \qquad (4)$$

Установим связь между коэффициентом отражения в разных сечениях линии передачи. При $l=0$, т.е. в сечении нагрузки, получаем

$$P_н = \frac{E_o}{E_n},$$

При произвольном значении l

$$P = \frac{E_o e^{-i\beta l}}{E_n e^{i\beta l}} = P_н e^{-i2\beta l}. \qquad (5)$$

Очень часто наряду с коэффициентом отражения вводят входного сопротивления линии передачи. Под ***входным сопротивлением*** понимают отношение поперечных составляющих в произвольном сечении линии передачи (на входе линии)

$$Z_{вх} = \frac{E(l)}{H(l)} = Z_C \frac{E_n(l)+E_o(l)}{E_n(l)-E_o(l)} = Z_C \frac{1+P}{1-P}. \qquad (6)$$

На практике чаще используют нормированное значение сопротивления $Z' = Z/Z_C$, т. е.

$$Z'_{вх} = \frac{1-P}{1+P}. \qquad (7)$$

Можно выразить коэффициент отражения через нормированное входное сопротивление

$$P = \frac{Z'_{вх}-1}{Z'_{вх}+1}. \qquad (8)$$

При $l=0$

$$Z_{вх} = \frac{E(0)}{H(0)} = Z_н = Z_с \frac{E_п(0)+E_о(0)}{E_п(0)-E_о(0)} = Z_с \frac{1+P_н}{1-P_н}, \qquad (9)$$

нормированное сопротивление нагрузки определяется

$$Z'_н = \frac{1+P_н}{1-P_н}. \qquad (10)$$

Можно выразить коэффициент отражения от нагрузки через нормированное сопротивление нагрузки

$$P_н = \frac{Z'_н-1}{Z'_н+1}. \qquad (11)$$

Выводы:

1.) В коаксиальном волноводе, работающем на волне ТЕМ волновое сопротивление не зависит от частоты.
2.) В прямоугольном волноводе, работающем на волне типа Е или Н волновое сопротивление зависит от частоты.
3.) Входное сопротивление линии передачи при наличии отраженной является периодической функцией и зависит от длины линии передачи.

2. Распределение амплитуд напряженностей электрического и магнитного полей вдоль линии передачи. Зависимость режима работы линии передачи от свойств нагрузки

Когда в линии передачи распространяется только падающая волна, в любом сечении линии амплитуда электрического (магнитного) поля одна и та же. При наличии отраженной волны в линии происходят, сложение полей падающей и отраженной волн. В тех сечениях, где поля складываются в фазе, напряженности поля максимальны, а там, где складываются в противофазе, напряженности поля минимальны (рис. 3). Формулы, описывающие распределение E и H вдоль волновода, можно получить из выражений (2). Для электрического поля с учетом (5) получим

$$|E| = \left| E_n e^{i\beta l} (1 + P_н e^{-i2\beta l}) \right|. \qquad (12)$$

Аналогично для магнитного поля:

$$|H| = \left| \frac{H_n}{Z_c} e^{i\beta l} (1 - P_н e^{-i2\beta l}) \right|. \qquad (13)$$

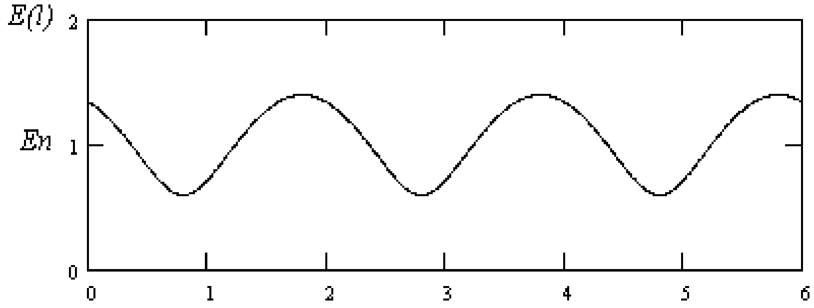

Рис. 3

Отношение поля в максимумах к напряженности в минимумах называется ***коэффициентом стоячей волны*** (КСВ) $К_с$

$$К_с = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \ . \qquad (14)$$

Величина обратная КСВ называется ***коэффициентом бегущей волны*** (КБВ)

$$К_б = \frac{1}{К_с}. \qquad (15)$$

Величина $К_с$ ($К_б$) является важной характеристикой режима работы линии передачи, она всегда включается в паспортные данные любого устройства СВЧ. Коэффициенты бегущей и стоячей волны связаны с модулем коэффициента отражения

$$\left. \begin{aligned} К_б &= \frac{1-|P|}{1+|P|}, \\ К_с &= \frac{1+|P|}{1-|P|}. \end{aligned} \right\} \qquad (16)$$

Из рис. 3 видно, что расстояние между соседними минимумами или максимумами равно половине длине волны в волноводе $\lambda в/2$. Измерение $\lambda в$ и $К_с$ осуществляется с помощью специальных устройств СВЧ – измерительных линий.

Проанализируем полученные ранее выражения для коэффициента отражения, коэффициента отражения на нагрузке, распределения амплитуды напряженности электрического поля вдоль линии передачи и рассмотрим несколько частных случаев, соответствующих определенным режимам работы волновода.

1. Режим бегущих волн. Он возникает в случае, когда сопротивление нагрузки равно волновому сопротивлению линии передачи $\boldsymbol{Z_н=Z_c}$. Из формул (5),(11), (16) следует, что в этом случае $\boldsymbol{P_н=0, P=0, K_б=K_c=1}$. Подставив $P_н=0$ в выражение (12) получим

$$|E|=|E_n|.$$

Данное уравнение описывает только падающую волну (отраженная отсутствует), амплитуда которой вдоль линии передачи не меняется (рис. 4.). Коэффициенты бегущих и стоячих волн равны единице. Режим бегущих волн является наилучшим для передачи СВЧ-энергии от источника к нагрузке. Его еще называют режимом согласованной нагрузки.

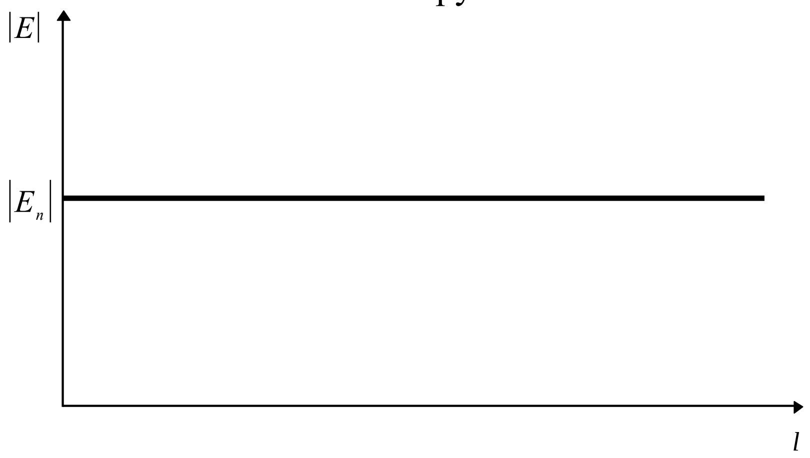

Рис. 4

2. Режим стоячих волн. Этот режим возникает в трех случаях. Рассмотрим первый из них - ***короткое замыкание*** $\boldsymbol{Z_н=0}$. В соответствии с выражением (11) $\boldsymbol{P_н= -1}$, следовательно, распределение амплитуд вдоль волновода будет описываться выражением:

$$|E|=2|E_n||\sin(\beta l)|. \tag{17}$$

При $\lambda_в$=4 см получается следующее распределение амплитуды поля рис. 5.

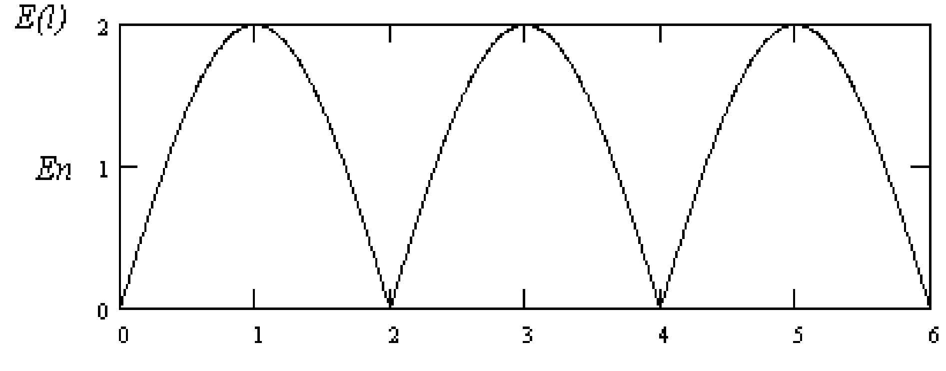

Рис. 5

Из графика распределения амплитуд (рис. 5) видно, что в волноводе появляются сечения, где амплитуда удваивается по сравнению со случаем бегущей волны, а в других сечениях она падает до нуля. Коэффициент бегущей волны становится равным нулю ***($K_б$=0)***, а коэффициент стоячей волны равным бесконечности ***($K_c=\infty$)***. Таким образом, в волноводе возникает стоячая волна. Распространения энергии в нем в этом случае не происходит.

Характерной особенностью случая ***КЗ*** является то, что на нагрузке напряженность поля равна нулю.

Режим стоячей волны возникает также и в случае ***холостого хода***, т. е. когда $\boldsymbol{Z_н=\infty}$. Величина $\boldsymbol{P_н}$ принимает значение $\boldsymbol{P_н=1}$, а распределение амплитуд описывается выражением

$$\left|E\right| = 2\left|E_n\right|\left|\cos(\beta l)\right|. \tag{18}$$

При $\lambda_в$=4 см получается следующее распределение амплитуды поля рис. 6.

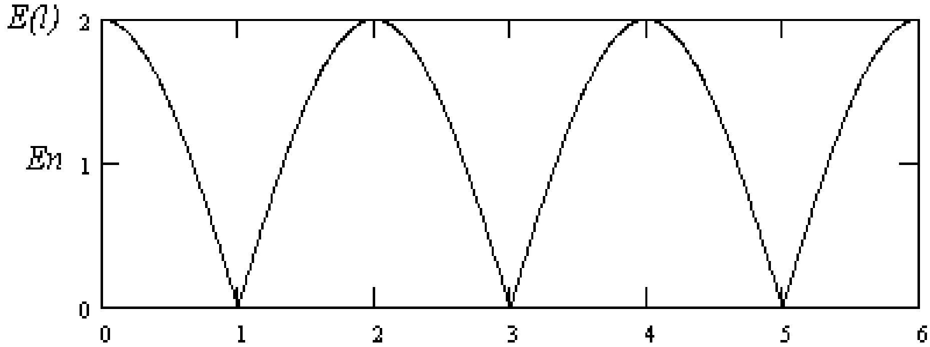

Рис. 6

График распределения амплитуд при холостом ходе (рис. 6) сдвинут на $\boldsymbol{\lambda_в/4}$ по сравнению со случаем короткого замыкания. Коэффициенты КБВ и КСВ остаются прежними.

Стоячая волна возникает в волноводе также ***при реактивном характере нагрузки*** $\boldsymbol{Z_н=\pm iX}$. Распределение амплитуд в данном случае (рис. 7) приобретает сдвиг вдоль волновода, зависящий от фазы коэффициента отражения $\varphi_н$

$$\left|E\right| = 2\left|E_n\right|\left|\cos(\beta l - \varphi_н)\right|. \tag{19}$$

При $\lambda_в$=4 см получается следующее распределение амплитуды поля рис. 7.

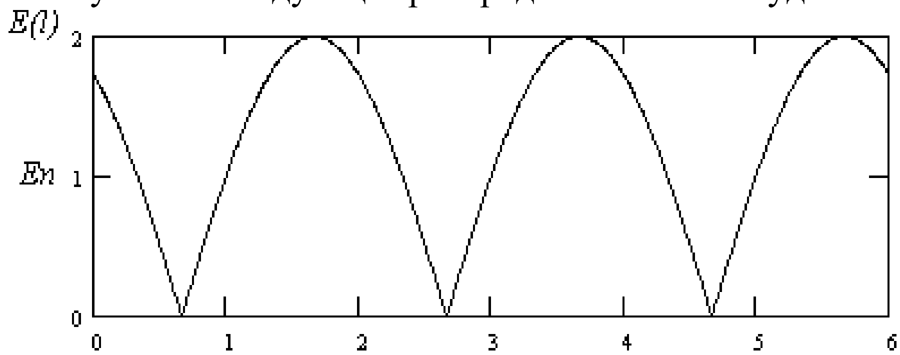

Рис. 7

3. Режим смешанных волн наблюдается чаще других. Это связано с тем, что не удается добиться строгого равенства сопротивления нагрузки и волнового сопротивления линии передачи. Поэтому при $\boldsymbol{Z_н \neq Z_c}$, кроме падающей волны, в волноводе присутствует отраженная волна. Коэффициент отражения лежит в пределах $\boldsymbol{0<|P|<1}$, коэффициент бегущей волны изменяется в пределах $\boldsymbol{0<|K_б|<1}$, коэффициент стоячей волны изменяется в пределах $\boldsymbol{1<|K_б|<\infty}$. Максимумы амплитуд поля становятся меньше (рис. 8) по сравнению с режимом стоячих волн (рис. 5, рис. 6, рис.

7). В связи с этим амплитуда напряженности электрического поля изменяется по закону

$$\left|E\right| = \left|E_n e^{i\beta l}(1+P_н e^{-i2\beta l})\right| = \left|E_n\right|\left|1+\left|P_н\right| e^{i(2\beta l-\varphi_н)}\right|. \qquad (20)$$

При $\lambda_в$=4 см, $|P_н|=0.4$ и $\varphi_н=-36^0$ получается следующее распределение амплитуды электрического поля рис. 8.

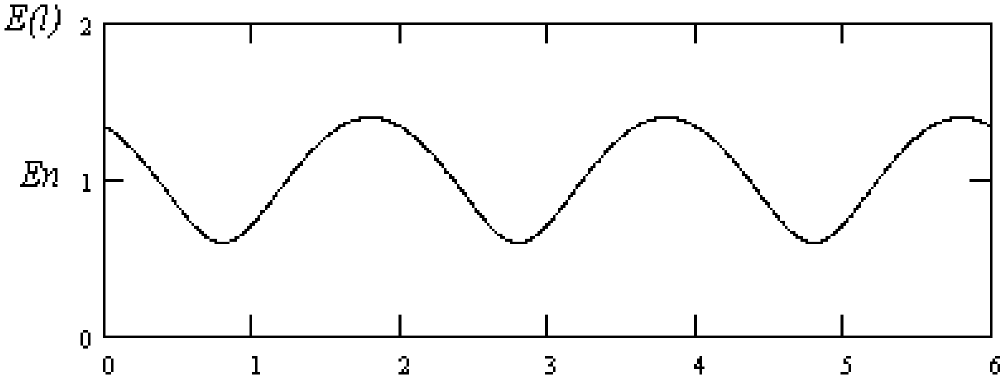

Рис. 8

Для того чтобы передавать по волноводу наибольшую энергию следует стремиться к максимальному повышению КБВ путем уменьшения отражений от нагрузки.

Выводы:

1.) В режиме бегущих волн амплитуда электрического поля, входное сопротивление не зависит от длины линии передачи.
2.) В режиме стоячих и смешанных волн амплитуда электрического поля, входное сопротивление зависит от длины линии передачи. Период равен $\lambda_в / 2$.
3.) Режим бегущих волн – самый благоприятный режим работы, так как вся энергия от генератора попадает в нагрузку.
4.) Режим стоячих волн – самый неблагоприятный режим работы, так как вся энергия отражается от нагрузки.

3. Резонансные свойства отрезков волноводов

В технике сверхвысоких частот находят применение отрезки волноводов, замкнутые или разомкнутые на конце. Это вызвано тем, что их входное сопротивление обладает специфическими свойствами

$$Z_{вх} = \frac{E(l)}{H(l)} = Z_c \frac{1+P_н e^{-i2\beta l}}{1-P_н e^{-i2\beta l}} = R_{вх} + i \cdot X_{вх}. \qquad (21)$$

Рассмотрим короткозамкнутый отрезок волновода $Z_н=0$, тогда $P_H=-1$. Выражение (6) при $P_H=-1$ преобразуется к виду

$$Z_{вх} = Z_c \frac{1-e^{-i2\beta l}}{1+e^{-i2\beta l}} = Z_c \frac{e^{i\beta l}-e^{-i\beta l}}{e^{i\beta l}+e^{-i\beta l}} = Z_c \cdot i \cdot tg(\beta l), \qquad (22)$$

$$X_{вх} = Z_c \cdot tg(\beta l). \qquad (23)$$

Входное сопротивление отрезка имеет чисто реактивный характер (рис. 9). Из анализов графика следует, что через расстояния ***λ_в/2*** характер входного сопротивления повторяется. Кроме того, данный отрезок волновода обладают резонансным характером сопротивления.

В частности, при значениях ***l= λ_в/4*** график $X_{вх}$ (рис. 9) напоминает зависимость реактивного сопротивления параллельного колебательного контура от длины волны. Его входное сопротивление равно бесконечности, что позволяет использовать такой отрезок в качестве колебательной системы или металлического изолятора на сверхвысоких частотах. С другой стороны при значениях ***l= λ_в/2*** и кратных им входное сопротивление равно нулю график $X_{вх}$ (рис. 9) напоминает зависимость реактивного сопротивления последовательного колебательного контура (при $\lambda_в$=4 см).

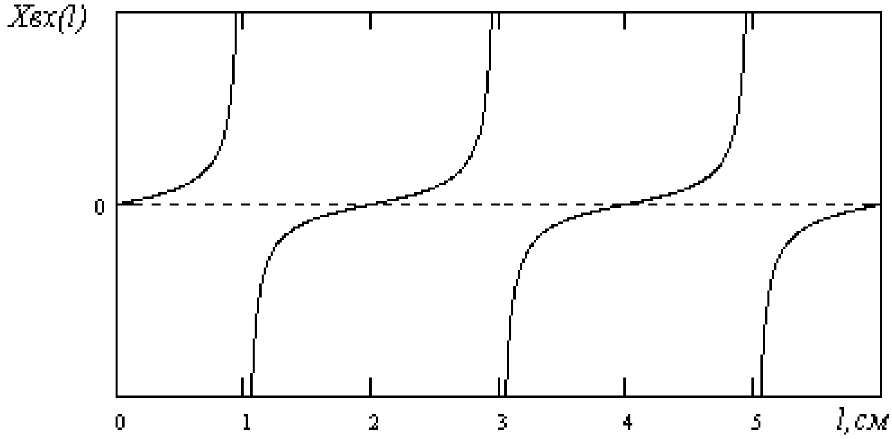

Рис. 9

Рассмотрим отрезок волновода, у которого $Z_н=\infty$ (P_H= 1). Выражение (6) при P_H= 1 преобразуется к виду

$$Z_{вх} = Z_c \frac{e^{i\beta l} + e^{-i\beta l}}{e^{i\beta l} - e^{-i\beta l}} = -i \cdot Z_c \cdot ctg(\beta l), \qquad (24)$$

$$X_{вх} = -Z_c \cdot ctg(\beta l). \qquad (25)$$

Входное сопротивление отрезка имеет чисто реактивный характер (рис. 10). Из анализов графика следует, что через расстояния ***λ_в/2*** характер входного сопротивления повторяется ($\lambda_в$=4 см). Кроме того, данный отрезок волновода также обладают резонансным характером сопротивления.

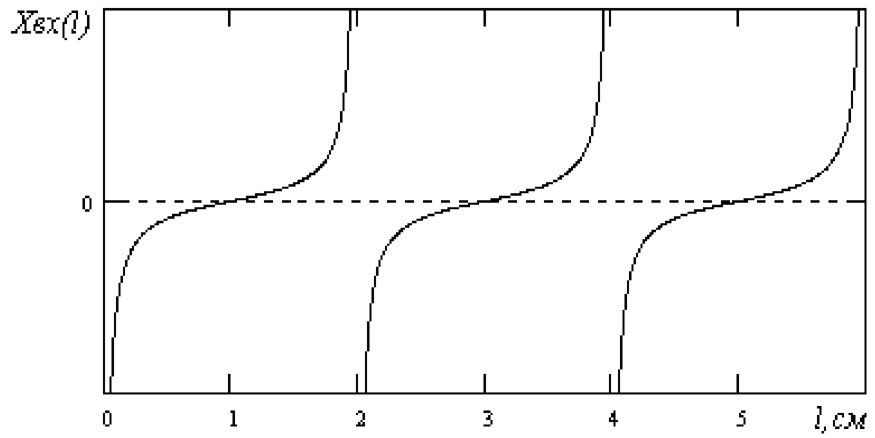

Рис. 10

В частности, при значениях $\boldsymbol{l= \lambda_в/2}$ график $\boldsymbol{X_{вх}}$ (рис. 10) напоминает зависимость реактивного сопротивления параллельного колебательного контура от длины волны. Его входное сопротивление равно бесконечности. С другой стороны при значениях $\boldsymbol{l=(2n+1)\lambda_в/4}$ (где $\boldsymbol{n=0,1,2,3,...}$) входное сопротивление равно нулю. График $\boldsymbol{X_{вх}}$ (рис. 10) напоминает зависимость реактивного сопротивления последовательного колебательного контура.

Резонансные отрезки короткозамкнутых и разомкнутых волноводов применяются в качестве колебательных систем генераторов, усилителей и фильтров диапазона СВЧ.

Выводы:

1.) Короткозамкнутые и разомкнутые отрезки волноводов могут использоваться для создания реактивных элементов в диапазоне СВЧ. Наибольшее распространение получили короткозамкнутые отрезки волноводов.
2.) Резонатор имеет наименьшую длину равную $\lambda_в/4$, если один конец замкнут, а другой разомкнут.

Если резонатор имеет короткозамкнутые или разомкнутые концы, то наименьшая длина равна $\lambda_в/2$.