

Тема 4. РЕГУЛЯРНЫЕ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЭНЕРГИИ

Лекция № 13. Длинные линии.

1. Длинные линии: их классификация и параметры.
2. Методика нахождения параметров линии с помощью измерительной линии.
3. Круговая диаграммы полных сопротивлений.

1 Длинные линии: их классификация и параметры

Линия называется *длинной*, если длина регулярной линии передачи превышает четверть длины волны в линии.

Условие применения: линия работает в одноволновом режиме.

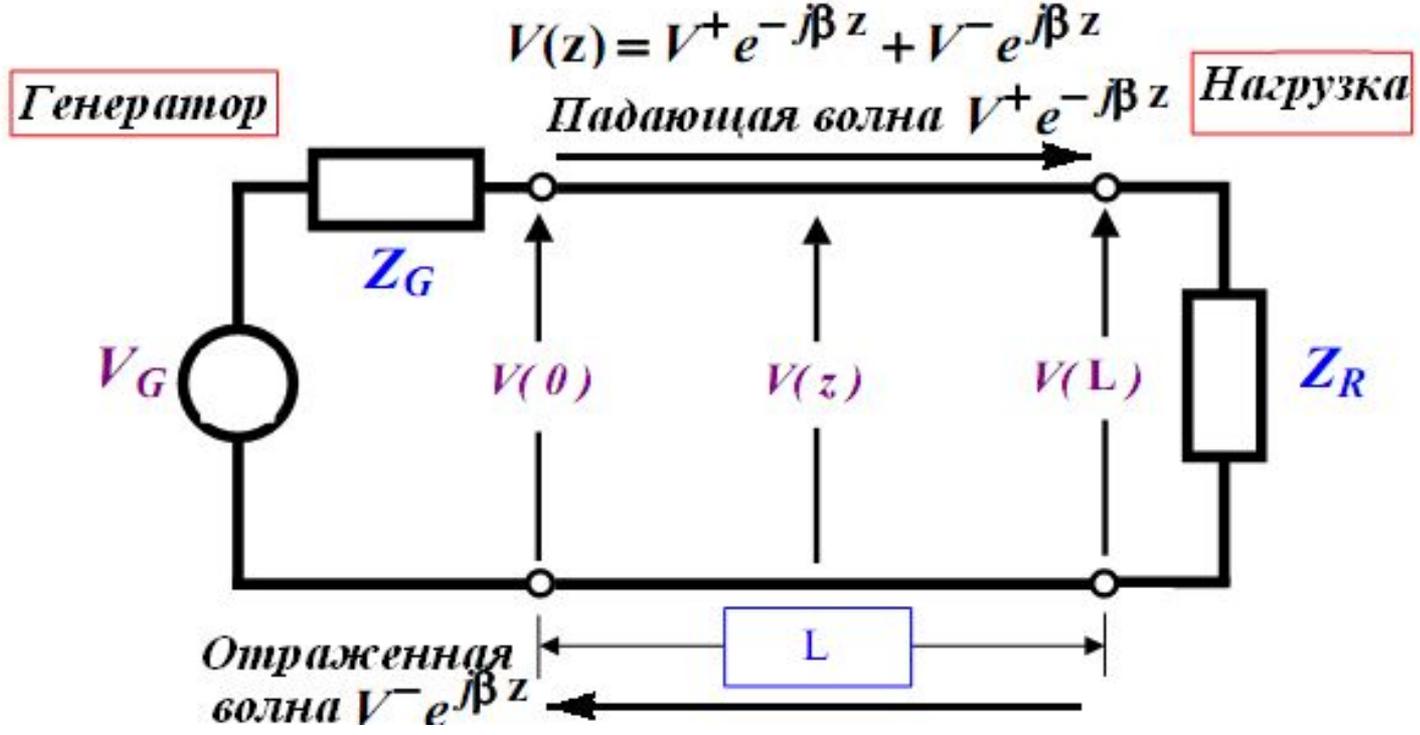


Рисунок 4.1 – Схема длинной линии

Особенности применения аппарата длинных линий

Процессы, протекающие в линии, определяются амплитудно-фазовыми соотношениями между падающей и отраженной волнами. Отказ от электродинамики. Применение *упрощенного математического аппарата – схем замещения (эквивалентных длинных линий)*. Для описания процессов в линии применяются величины напряжения и тока.

Физические свойства длинной линии определяются значениями четырех *распределенных* вдоль ее длины параметров: индуктивности L , емкости C , продольного активного сопротивления R и поперечной активной проводимости G .

В диапазоне СВЧ исключается погонное сопротивление и погонная проводимость (потери энергии малы) – *линии без потерь*.

Линия называется *однородной*, если параметры распределены вдоль линии равномерно (т.е. не зависят от z). В противном случае - *неоднородная* линия.

Построение эквивалентной схемы

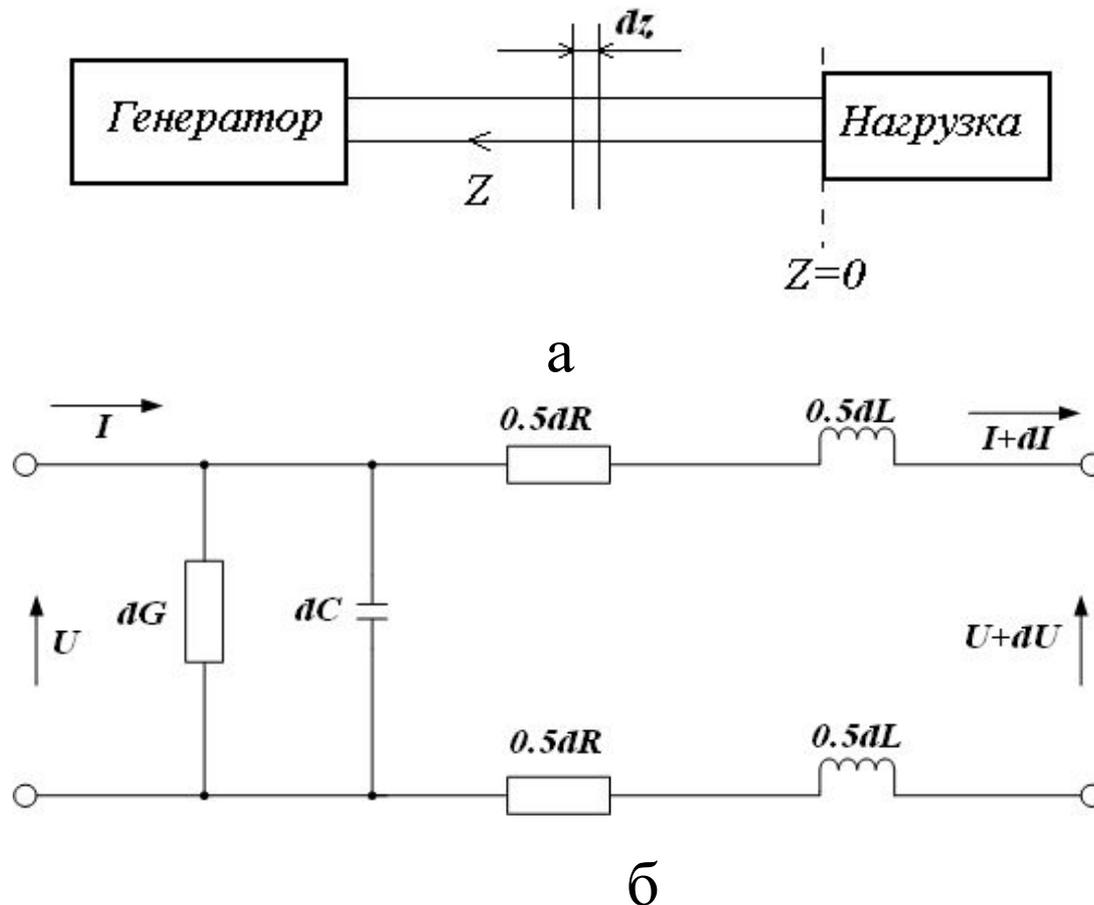


Рисунок 4.2 – Построение эквивалентной схемы:

а - исходная схема; б – эквивалентная схема;
стрелками обозначены направления отсчета напряжения U и
тока I в линии

Телеграфные уравнения

Приращения напряжения и тока на участке dz :

$$dU = I(dR + i\omega dL), \quad dI = U(dG + i\omega dC) \quad . \quad (4.1)$$

Телеграфные уравнения: $\frac{dU}{dz} = IZ$, $\frac{dI}{dz} = UY$. (4.2)

Волновые уравнения: $\frac{d^2U}{dz^2} - \gamma^2 U = 0$, $\frac{d^2I}{dz^2} - \gamma^2 I = 0$, (4.3)

где $\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)} = \alpha + i\beta$ - коэффициент распространения в длинной линии.

Решение уравнения (4.3):

$$U = \underbrace{A_U \exp(\gamma z)}_{\substack{\text{падающая} \\ \text{волна}}} + \underbrace{B_U \exp(-\gamma z)}_{\substack{\text{отраженная} \\ \text{волна}}} , \quad I = A_I \exp(\gamma z) + B_I \exp(-\gamma z) \quad . \quad (4.4)$$

Определение параметров длинной линии

Комплексный коэффициент отражения Γ определяет степень согласования линии передачи с нагрузкой:

$$\Gamma = \frac{B_U}{A_U} \quad (4.6)$$

Два способа определения: в месте нагрузки ($\Gamma(0)$) и в произвольной точке линии ($\Gamma(z)$):

$$\Gamma(z) = \Gamma(0) \exp(2i\gamma z) \quad (4.7)$$

Нормированное сопротивление нагрузки: $Z_H / W = \tilde{Z}_H = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma}$ (4.8)

Взаимосвязь между сопротивлением нагрузки и КО: $\Gamma = W \frac{1 - \tilde{Z}_H}{1 + \tilde{Z}_H}$

Волновое сопротивление линии W не изменяется и считается известным.

Коэффициент бегущей волны КБВ определяет степень согласования линии с нагрузкой:

$$КБВ = \frac{|A_U| - |B_U|}{|A_U| + |B_U|} = \frac{1 - |\Gamma|}{1 + |\Gamma|} \quad (4.9)$$

Коэффициент стоячей волны по напряжению КСВН определяет степень рассогласования линии с нагрузкой:

$$КСВН = \frac{|A_U| + |B_U|}{|A_U| - |B_U|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad (4.10)$$

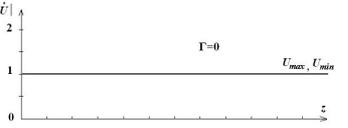
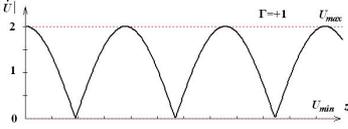
Коэффициент полезного действия:

$$\eta = 1 - |\Gamma|^2 \quad (4.11)$$

Входное сопротивление линии:

$$Z_{\text{вх}}(z) = W \frac{1 - \Gamma(0) \exp(-2\gamma z)}{1 + \Gamma(0) \exp(-2\gamma z)} \quad (4.12)$$

Таблица 4.1 – Режимы работы линии

| Режимы работы линии | Параметры линии | Характеристика работы |
|--|--|--|
| <p>Режим бегущей волны</p>  | <p>$\Gamma = 0$ КБВ=КСВН=1</p> | <p>Только падающая волна, распространяющаяся от генератора к нагрузке. Мощность полностью выделяется в нагрузку.</p> |
| <p>Режим смешанных волн</p> | <p>$0 < \Gamma < 1$ $0 < \text{КБВ} < 1$ $1 < \text{КСВН} < \infty$</p> | <p>Часть мощности падающей волны теряется в нагрузке, а оставшаяся часть в виде отраженной волны возвращается обратно в генератор.</p> |
| <p>Режим стоячей волны</p>  | <p>$\Gamma = 1$ КБВ=0, КСВН = ∞</p> | <p>Амплитуда отраженной волны равна амплитуде падающей. Энергия падающей волны полностью отражается от нагрузки и возвращается обратно в генератор</p> |

2 Методика нахождения параметров линии с помощью измерительной линии



Рисунок 4.2 – Измерительная линия на основе отрезка коаксиального кабеля

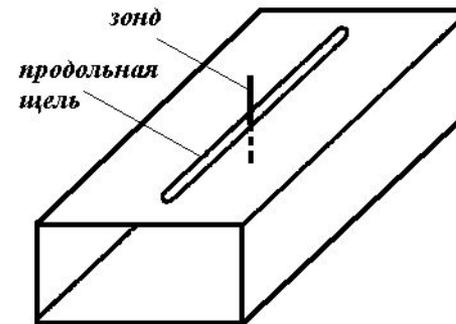
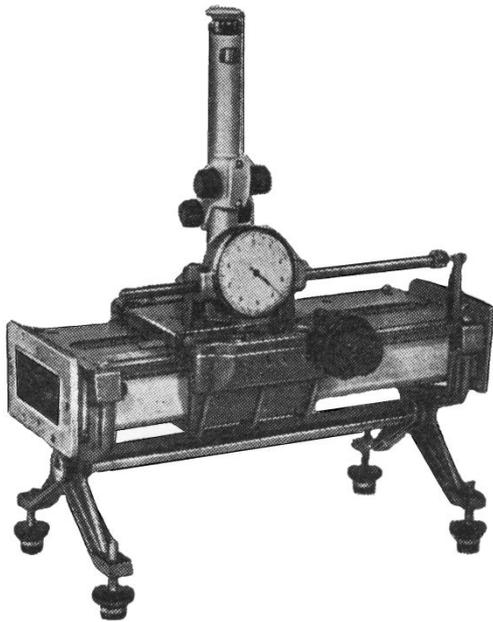


Рисунок 4.3 – Измерительная линия на основе отрезка волновода

Исходные данные для измерения – распределение напряжения в линии:

$$U(z) = \sqrt{1 + 2|\Gamma| \cos(\arg(\Gamma) - 2\beta z) + |\Gamma|^2}, \quad (4.13)$$

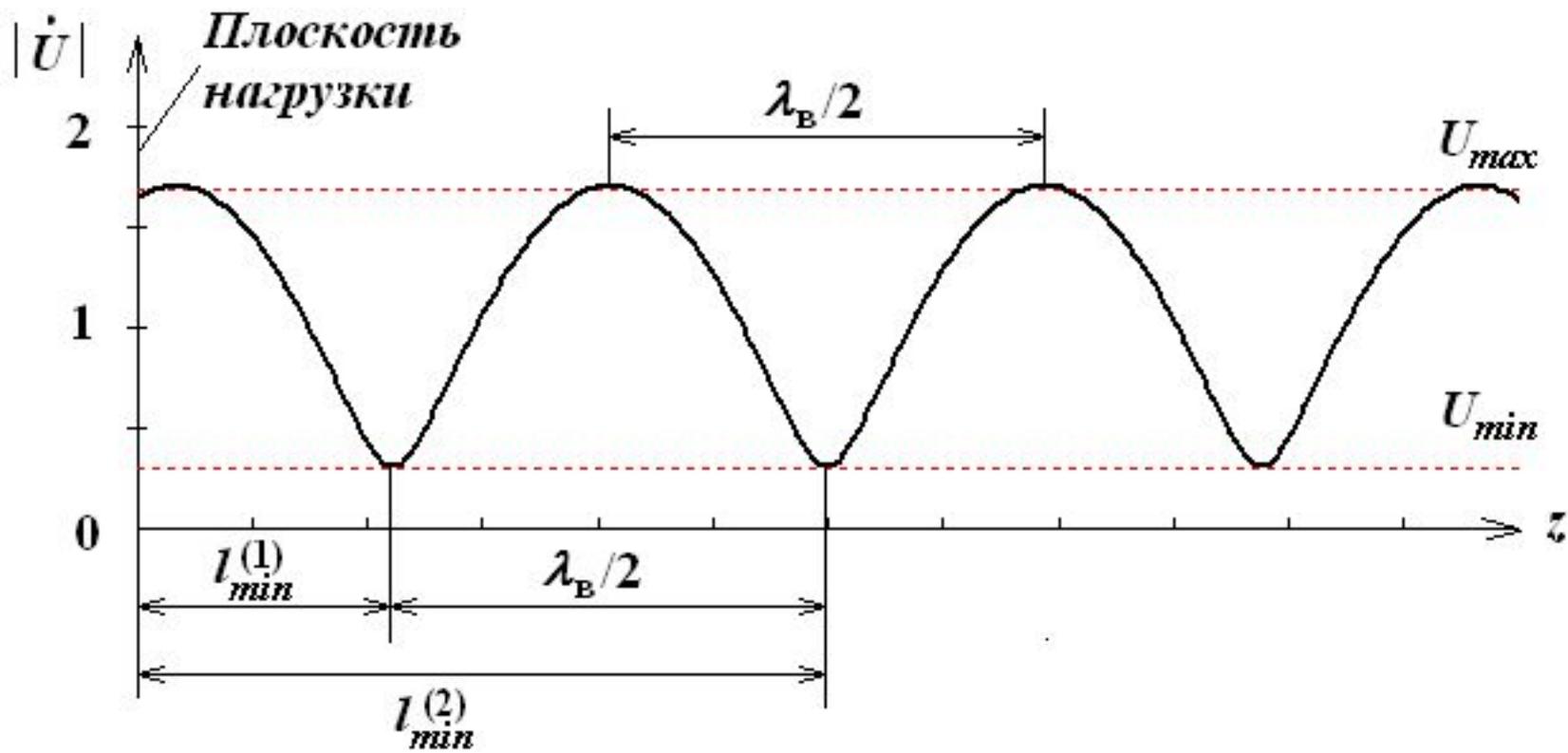


Рисунок 4.5 – Вид распределения в линии

Методика измерения:

1. По измеренным значениям минимального и максимального значений напряжения вычисляется КСВН:

$$\text{КСВН} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} \quad (4.14)$$

2. Определение модуля КО:

$$|\Gamma| = \frac{\text{КСВН} - 1}{\text{КСВН} + 1} \quad (4.15)$$

3. Вычисление длины волны в линии

$$\lambda_{\text{в}} = 2 \left(\varphi_{\min}^{(2)} - \varphi_{\min}^{(1)} \right) \quad (4.16)$$

4. Определение фазы коэффициента отражения

где $\beta = \frac{2\pi}{\lambda_{\text{в}}}$.

$$\varphi = 2\beta \varphi_{\min} - \pi, \quad (4.17)$$

5. Расчет комплексного коэффициента отражения:

$$\Gamma = |\Gamma| \exp(i\varphi) \quad (4.18)$$

6. Определение типа нагрузки по виду распределения. Тип нагрузки определяется по фазе коэффициента отражения или виду распределения напряжения.

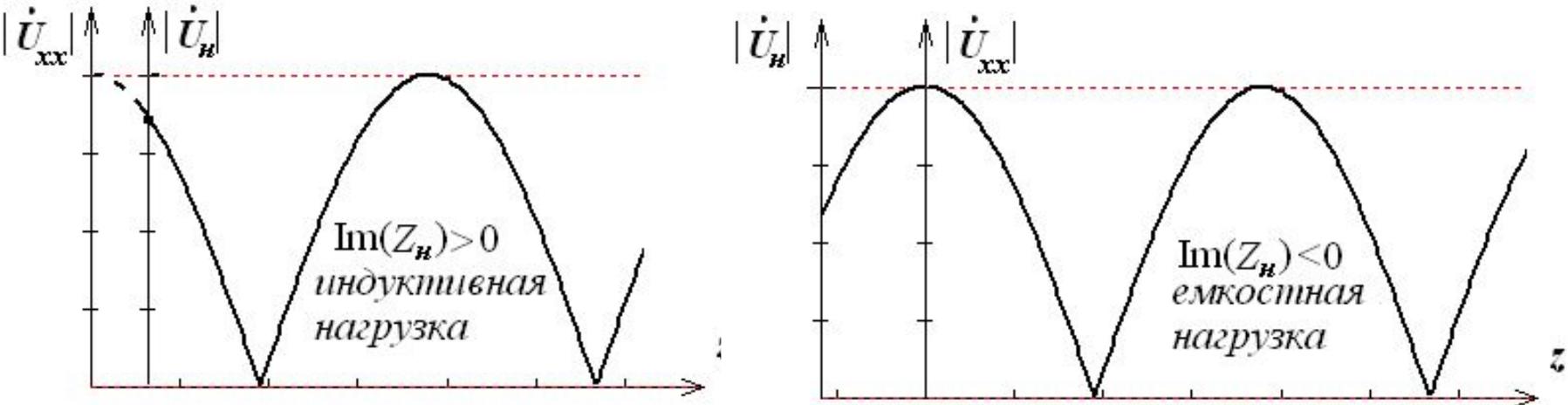


Рисунок 4.6 – Зависимость вида распределения от типа нагрузки

3 Круговая диаграмма полных сопротивлений

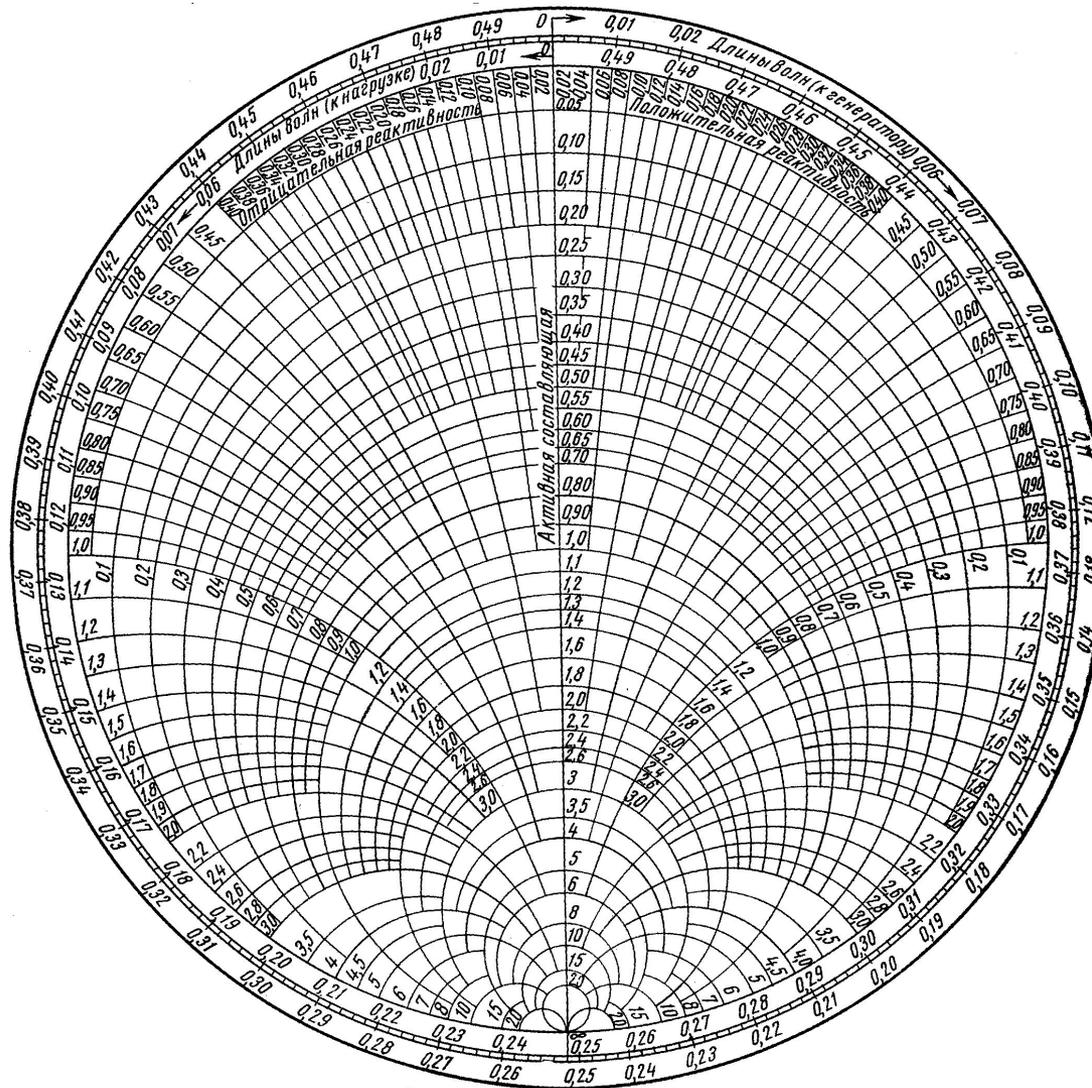


Рисунок 4.7 – Вид диаграммы Вольперта-Смита
Электромагнитные поля и волны. Лекция 13.

Пример применения круговой диаграммы полных сопротивлений для решения задачи нахождения параметров длинной линии.

Постановка задачи: По заданному комплексному сопротивлению нагрузки $Z = 25 + i100$ Ом и характеристическому сопротивлению линии 50 Ом определить коэффициент отражения в линии.

Решение задачи будем проводить следующим образом.

1. Определение нормированного сопротивления нагрузки:

$$z = \frac{Z}{W} = (25 + i100) / 50 = 0.5 + i2.0 \quad (4.19)$$

2. На диаграмме Вольперта ищем окружность, имеющую радиус $r = 0.5$

3. Поиск дуги, соответствующей значению реактанса $x = +2.0$

4. Вычисление комплексного значения коэффициента отражения Γ .

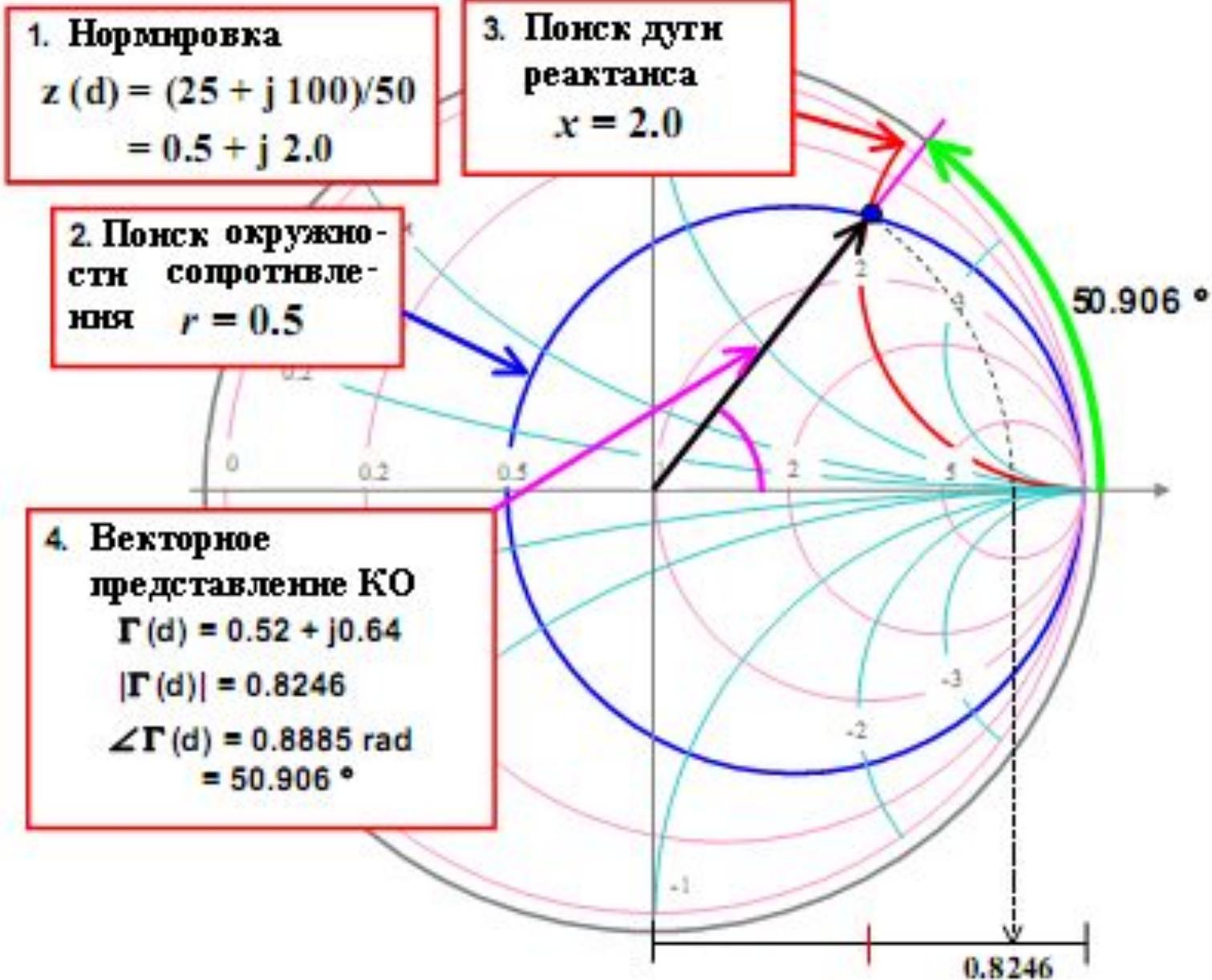


Рисунок 4.8 – Пояснения к алгоритму
 Электромагнитные поля и волны. Лекция 13.