



Конференция «Электрооборудование нового поколения на базе оптических и цифровых технологий. Перспективы развития и эффекты от применения»
22 июня 2020 г., Москва, НИУ «МЭИ»

Программа расчета энергетического баланса автономной системы

к.т.н., доцент Михалин С.Н.

Работа выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования РФ
(уникальный номер проекта: RFMEFI60719X0324)

Вводные замечания

Программа представляет реализацию алгоритма решения системы из четырех однородных уравнений на комплексной плоскости.

Система уравнений – математическое представление энергетического баланса (баланса амплитуд и фаз) в электрической цепи (рис. 1, 2).

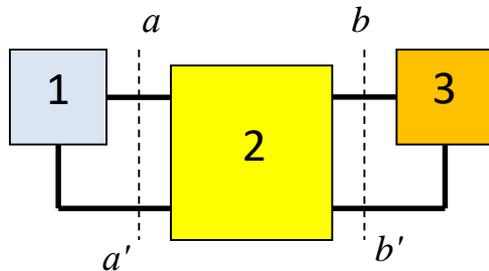


Рис. 1 – Структурная схема автономной электрической цепи
1 – источник электрических колебаний (нелинейный ЧП);
2 – согласующая цепь – восьмиполюсник;
3 – эквивалентная нагрузка цепи (ЧП).

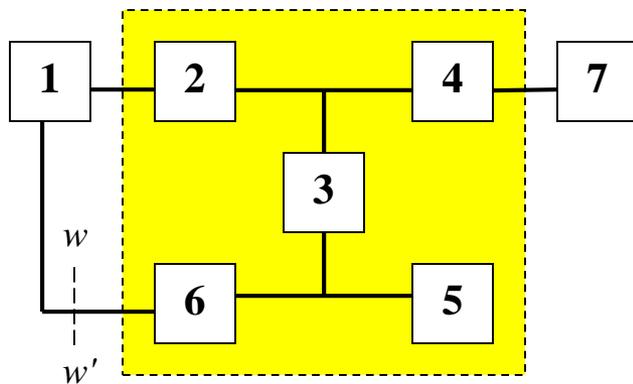


Рис. 2 – Структурная схема автогенератора с параллельной обратной связью
1 – нелинейный ЧП (усилительный элемент);
2, 6 – отрезки линий передачи сигнала с электрическими длинами $\theta=\beta x$ и $\psi=\beta y$;
3 – фильтр цепи обратной связи;
4 – согласующее устройство;
5 – эквивалентная нагрузка с электрической длиной βz ;
7 – полезная нагрузка цепи (согласованная)

Формирование схемной модели

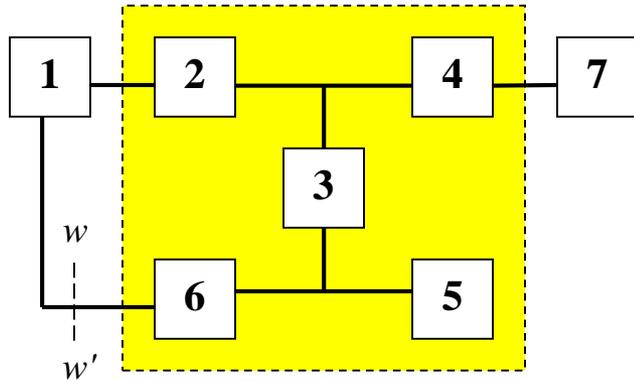


Рис. 2 – Структурная схема автогенератора с параллельной обратной связью

- 1 – нелинейный ЧП (усилительный элемент);
- 2, 6 – отрезки линий передачи сигнала с электрическими длинами $\theta = \beta x$ и $\psi = \beta y$;
- 3 – фильтр цепи обратной связи;
- 4 – согласующее устройство;
- 5 – эквивалентная нагрузка с электрической длиной βz ;
- 7 – полезная нагрузка цепи (согласованная)

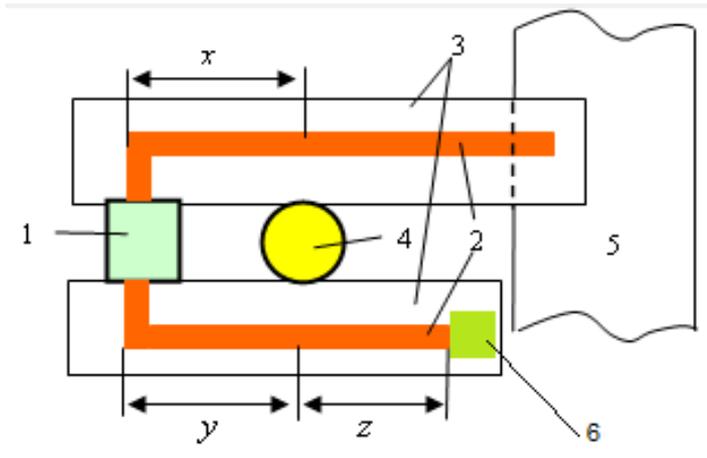


Рис. 3 – Функциональная схема автогенератора с параллельной обратной связью

- 1 – усилитель (АЧП);
- 2 – проводники микрополосковых линий (МПЛ);
- 3 – диэлектрическая подложка МПЛ;
- 4 – открытый диэлектрический резонатор (ДР), формирующий цепь обратной связи;
- 5 – нагрузка автогенератора;
- 6 – балластная нагрузка (реактивное сопротивление)

Формирование комплексной системы уравнений (традиционный подход)

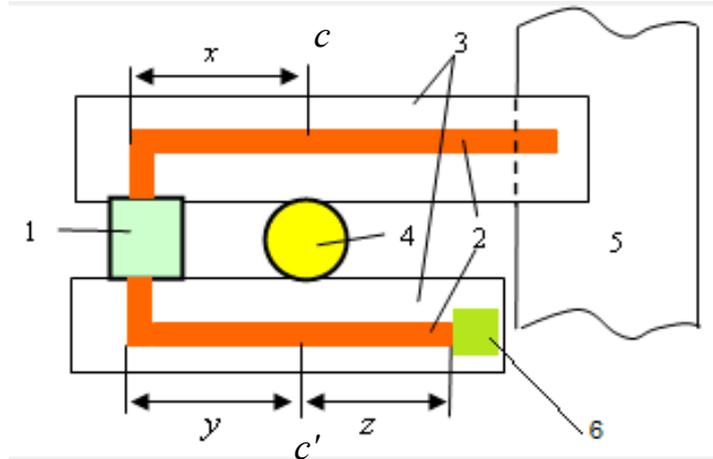


Рис. 3 – Функциональная схема автогенератора с параллельной обратной связью

- 1 – усилитель (АЧП);
- 2 – проводники микрополосковых линий (МПЛ);
- 3 – диэлектрическая подложка МПЛ;
- 4 – открытый диэлектрический резонатор (ДР), формирующий цепь обратной связи;
- 5 – нагрузка автогенератора;
- 6 – балластная нагрузка (реактивное сопротивление)

$$[\underline{S}] = \begin{bmatrix} a & (1-a) & -\sqrt{ab} & \sqrt{ab} \\ (1-a) & a & \sqrt{ab} & -\sqrt{ab} \\ -\sqrt{ab} & \sqrt{ab} & b & (1-b) \\ \sqrt{ab} & -\sqrt{ab} & (1-b) & b \end{bmatrix}$$

$$a = S_{11} = S_{22} = \frac{\beta_1}{(1 + \beta_1 + \beta_2)(1 + j\xi)};$$

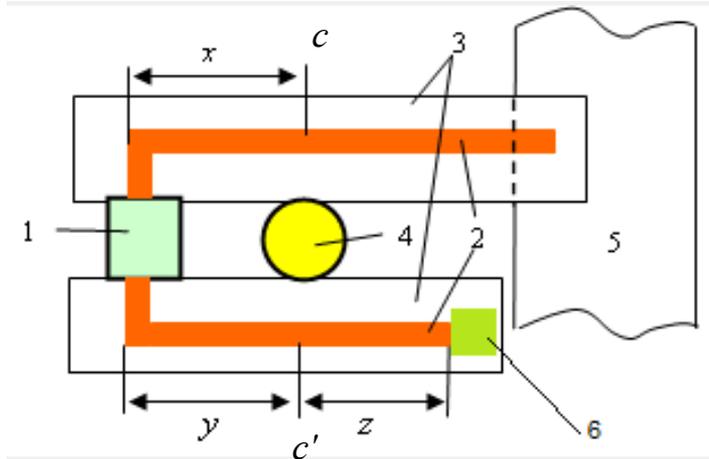
$$b = S_{33} = S_{44} = \frac{\beta_2}{(1 + \beta_1 + \beta_2)(1 + j\xi)};$$

β_1 – коэффициент связи ДР с линией, соединяющей нагрузку и выход усилителя;

β_2 – коэффициент связи ДР с линией, образующей обратную связь на вход усилителя;

ξ – относительная отстройка частоты.

Формирование комплексной системы уравнений



$\beta_1 = \beta_2 = \beta$ – симметричное расположение ДР

С учетом связи волн в цепи: $a_1^{(2)} = b_2^{(1)} \cdot e^{-jkx}$;

$a_2^{(2)} = 0$; $a_3^{(2)} = b_3^{(2)} \cdot e^{-j2kz}$; $a_4^{(2)} = b_1^{(1)} \cdot e^{-jky}$;

$a_2^{(1)} = b_1^{(2)} \cdot e^{-jkx}$; $a_1^{(1)} = b_4^{(2)} \cdot e^{-jky}$;

где верхний индекс 2 соответствует элементам матрицы ДР;
 верхний индекс 1 соответствует элементам матрицы АЧП;
 a и b – падающая и отраженная волны на порт
 восьмиполюсника.

Матричное уравнение системы относительно портов восьмиполюсника ДР в сечении $c-c'$

$$\begin{bmatrix} b_1^{(2)} \\ b_2^{(2)} \\ b_3^{(2)} \\ b_4^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{(1+2\beta)} \begin{bmatrix} \beta & (1+\beta) & -\beta & \beta \\ (1+\beta) & \beta & \beta & -\beta \\ -\beta & \beta & \beta & (1+\beta) \\ \beta & -\beta & (1+\beta) & \beta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1^{(2)} \\ a_2^{(2)} \\ a_3^{(2)} \\ a_4^{(2)} \end{bmatrix}$$

С учетом коэффициентов $S^{(1)}$ – матрицы
 рассеяния АЧП, можно записать

$$\begin{cases} a_4^{(2)} = \underline{S}_{11}^{(1)} b_4^{(2)} \cdot e^{-j2ky} + \underline{S}_{12}^{(1)} b_1^{(2)} \cdot e^{-j(ky+kx)} \\ a_1^{(2)} = \underline{S}_{21}^{(1)} b_4^{(2)} \cdot e^{-j(ky+kx)} + \underline{S}_{22}^{(1)} b_1^{(2)} \cdot e^{-j2kx} \end{cases}$$

Матричное уравнение условия энергетического баланса

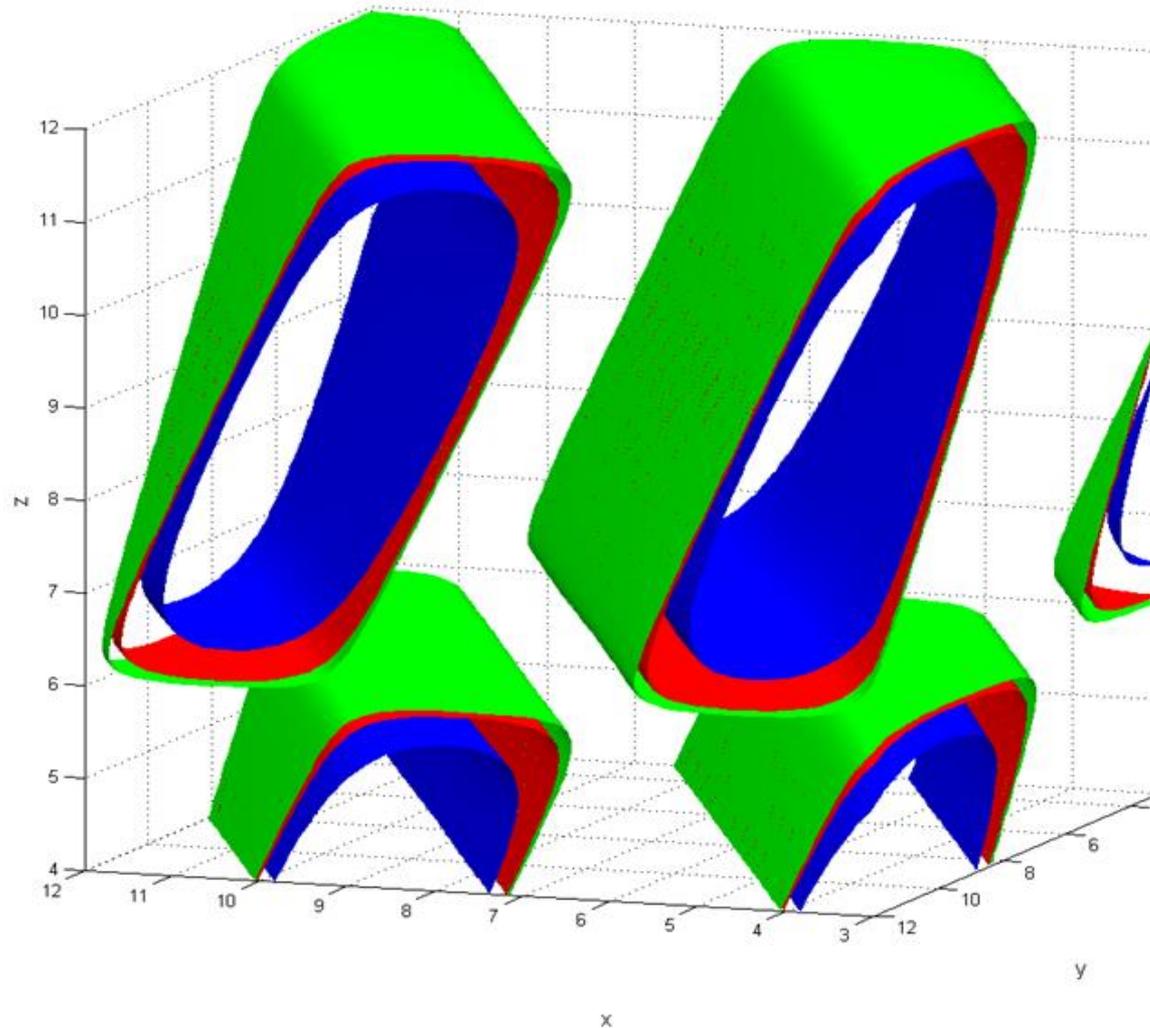
$$\begin{bmatrix} b_1^{(2)} \\ b_2^{(2)} \\ b_3^{(2)} \\ b_4^{(2)} \end{bmatrix} (1 + 2\beta) = \left[\underline{S}^{(2)} \right] \cdot \begin{bmatrix} b_4^{(2)} \cdot \underline{S}_{21}^{(1)} \cdot e^{-j(ky+kx)} + b_1^{(2)} \cdot \underline{S}_{22}^{(1)} \cdot e^{-j2kx} \\ 0 \\ b_3^{(2)} e^{-j2kz} \\ b_4^{(2)} \cdot \underline{S}_{11}^{(1)} \cdot e^{-j2ky} + \underline{S}_{12}^{(1)} \cdot b_1^{(2)} \cdot e^{-j(ky+kx)} \end{bmatrix}$$

Систему из четырех комплексных однородных уравнений, ненулевое решение которой соответствует равенству нулю определителя системы $\underline{A}(e^{jkx}, e^{jky}, e^{jkz}, \beta) = 0$. Его вид:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} 1 + 2\beta - \beta \underline{S}_{22} e^{-jk4x} - \beta \underline{S}_{12} e^{-jk(2x+y)} & 0 & \beta e^{-jk2z} & -\beta \underline{S}_{21} e^{-jk(2x+y)} - \beta \underline{S}_{11} e^{-jk2y} \\ -(1 + \beta) \underline{S}_{22} e^{-jk4x} + \beta \underline{S}_{12} e^{-jk(2x+y)} & 1 + 2\beta & -\beta e^{-jk2z} & -(1 + \beta) \underline{S}_{21} e^{-jk(2x+y)} + \beta \underline{S}_{11} e^{-jk2y} \\ \beta \underline{S}_{22} e^{-jk4x} - (1 + \beta) \underline{S}_{12} e^{-jk(2x+y)} & 0 & 1 + 2\beta - \beta e^{-jk2z} & \beta \underline{S}_{21} e^{-jk(2x+y)} - (1 + \beta) \underline{S}_{11} e^{-jk2y} \\ -\beta \underline{S}_{22} e^{-jk4x} - \beta \underline{S}_{12} e^{-jk(2x+y)} & 0 & -(1 + \beta) e^{-jk2z} & 1 + 2\beta - \beta \underline{S}_{21} e^{-jk(2x+y)} - \beta \underline{S}_{11} e^{-jk2y} \end{bmatrix}$$

Решение уравнения может быть получено любым оптимизационным методом. Специально разработанная программа формирует решение в виде трехмерной поверхности возможных значений x, y, z при известном коэффициенте связи β .

Вид результатов расчета



$\beta=0.05$ - синий
 $\beta=0.2$ - красный
 $\beta=0.5$ - зеленый
цвет.

Рисунок 4 – Изоповерхности соответствующие решению уравнения

Пример расчета параметров системы уравнений автогенератора

АЧП в виде усилителя СВЧ модели 0815 производства ООО "Планета-ИРМИС" г. С.-Петербург. Расчет проведем для частоты 11 ГГц при коэффициентах матрицы рассеяния АЧП:

$$\underline{S}_{11} = 0.02 \angle 0.1^\circ$$

$$\underline{S}_{12} = 0.00012 \angle -148.7^\circ$$

$$\underline{S}_{21} = 31.6 \angle -129.2^\circ$$

$$\underline{S}_{22} = 0.0216 \angle 13.6^\circ$$

$$\beta = 0.05$$

Результаты расчета топологии автогенератора:

$z = 0.5\lambda = 5.39$ мм разомкнутый на конце,

$y = 0.844\lambda = 9.1$ мм,

$x = 0.516\lambda = 5.5$ мм,

где λ – длина волны в линии.

При создании макета АГ рис. 5 показало удовлетворительное совпадение полученных экспериментальных данных с ожидаемыми значениями, соответствующими расчетной точке энергетического баланса.

Характеристики АГ с ДР отличались от расчетных по частоте в пределах 2%.

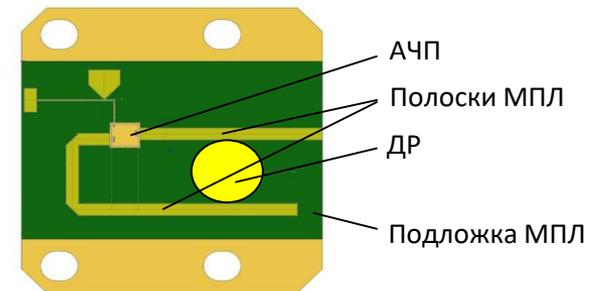


Рис. 5 – Топология генератора фиксированной частоты

Спасибо за внимание