

УДК 621.373.12.026

О ВЗАИМНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ ЦЕПОЧКИ РЕЗИСТИВНО СВЯЗАННЫХ АВТОГЕНЕРАТОРОВ

А. А. Дворников, Г. М. Уткин, А. М. Чуков

Методом медленно меняющихся амплитуд анализируется взаимная синхронизация цепочки одноконтурных автогенераторов, резистивно связанных на основном тоне. Определены возможные стационарные режимы, исследована их устойчивость. Приводятся экспериментальные результаты.

В настоящее время интерес к системам взаимно синхронизированных автогенераторов постоянно растет. В существенной степени это объясняется часто возникающей на практике необходимостью сложения мощности многих активных элементов как в одной общей нагрузке, так и в пространстве [4]. При практической реализации подобных систем, как правило, возникают технические сложности, связанные с обеспечением взаимной связи между автогенераторами, особенно при использовании ансамблей взаимосинхронизированных автогенераторов в составе активной фазированной антенной решетки. Здесь часто возникает необходимость сочетания структуры ансамбля с пространственной структурой антенной решетки. В этом смысле представляет интерес анализ работы цепочки взаимосвязанных автогенераторов. При этом наиболее удобной для практики является резистивная связь между автогенераторами. В этом случае не возникают скачки режима, система легче настраивается, полоса синхронизации увеличивается. В литературе есть работы, содержащие исследование цепочки автогенераторов с реактивной связью [1-3]. Аналогичного исследования цепочки автогенераторов с резистивной связью в литературе не описано. Настоящее сообщение является попыткой восполнить этот пробел.

Укороченные уравнения. Стационарные режимы. Используя [4], нетрудно получить следующую систему укороченных уравнений, описывающих цепочку из n автогенераторов (рис. 1):

$$2C \frac{dU_k}{dt} = U_k [S_a(U_k) - g] + \varepsilon_1(k) g_{св} + \varepsilon_2(k) g_{в} U_{k-1} \cos \Delta_{k-1,k} + \varepsilon_3(k) g_{св} U_{k+1} \cos \Delta_{k,k+1}; \quad (1)$$

$$2C \frac{d\psi_k}{dt} = -2C \Delta\omega_k + \varepsilon_2(k) \frac{U_{k-1}}{U_k} g_{св} \sin \Delta_{k-1,k} - \varepsilon_3(k) \frac{U_{k+1}}{U_k} g_{св} \sin \Delta_{k,k+1}, \quad (2)$$

где S_a — активная составляющая крутизны активного элемента автогенератора по первой гармонике, $\Delta_{kj} = \psi_k - \psi_j$, ψ_k — медленно меняющаяся фаза колебаний k -го автогенератора, U_k — медленно меняющаяся амплитуда колебаний k -го автогенератора, $\Delta\omega_k = \omega_0 - \omega_k$, ω_k —

собственная частота резонатора k -го автогенератора, ω_0 — стационарная частота автоколебаний системы, $g_{св}$ — проводимость связи автогенераторов, $\varepsilon_1(k) = 2$, если $k \neq 1$, $k \neq n$, $\varepsilon_1(1) = \varepsilon_1(n) = 1$, $\varepsilon_2(k) = 1$, если $k_1 \neq 1$, $\varepsilon_2(1) = 0$, $\varepsilon_3(k) = 1$, если $k \neq n$, $\varepsilon_3(n) = 0$.

Рассмотрим возможные стационарные режимы анализируемой системы в отсутствие частотных расстроек, т. е. при $\Delta\omega_1 = \Delta\omega_2 = \dots = \Delta\omega_n = \Delta\omega$. В этом случае, используя (2), получим для стационарного режима следующую систему уравнений:

$$\left\| \begin{array}{cccccc} -\left(\frac{U_2^0}{U_1^0} + \frac{U_1^0}{U_2^0}\right) & U_3^0/U_2^0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ U_1^0/U_2^0 & -\left(\frac{U_3^0}{U_2^0} + \frac{U_2^0}{U_3^0}\right) & U_4^0/U_3^0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{U_{n-2}^0}{U_{n-1}^0} & -\left(\frac{U_{n-1}^0}{U_n^0} + \frac{U_n^0}{U_{n-1}^0}\right) \end{array} \right\| \times$$

$$\times \left\| \begin{array}{c} \sin \Delta_{12}^0 \\ \sin \Delta_{23}^0 \\ \dots \\ \sin \Delta_{n-1,n}^0 \end{array} \right\| = 0.$$

Анализируя (3), можно сделать вывод о том, что в рассматриваемой системе автогенераторов возможно множество стационарных режимов, для которых выполняется условие

$$\Delta_{k-1,k}^0 = \pm \pi m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (4)$$

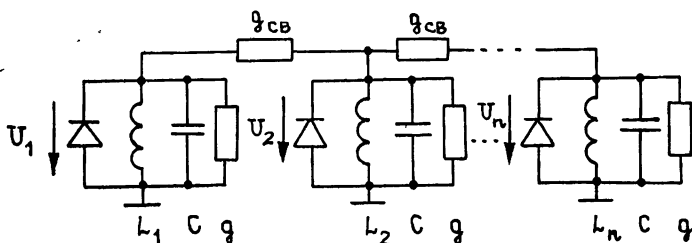


Рис. 1 Цепочка взаимосвязанных автогенераторов.

Среди этих режимов удобно выделить синфазный режим $\Delta_{k-1,k}^0 = 0$ ($k = 2, 3, \dots, n$) и противофазный режим, в котором фазовый сдвиг между колебаниями любых соседних автогенераторов равен (4) при значениях $m = 1, 3, 5, \dots$. В остальных — несинфазных — режимах разность фаз между колебаниями соседних автогенераторов принимает как нулевые значения, так и значения, равные π . Например, если в цепочке два автогенератора, то существуют лишь два режима — синфазный и противофазный. Это полностью соответствует известным результатам [4].

Для частного случая цепочки из трех автогенераторов ($n = 3$) число возможных режимов равно четырем (табл.1). Первый режим — синфазный, четвертый — противофазный. Вторым и третьим режимами — несинфазные. Как следует из (1), в синфазном режиме амплитуды всех автогенераторов равны ($U_1^0 = U_2^0 = U_3^0$), в противофазном — равны лишь амплитудам первого и третьего автогенераторов ($U_1^0 = U_3^0$), а в несинфазных режимах равны амплитуды или первого и второго автогенераторов (3-й режим), или второго и третьего автогенераторов (2-й режим).

Устойчивость стационарных режимов. Рассмотрим локальную устойчивость стационарных режимов (4) системы (1), (2). Нетрудно показать, что для малых вариаций амплитуд ϑ_k и разностей фаз $\delta_{k, k+1}$ ($U_k = U_k^0 + \vartheta_k$; $\Delta_{k, k+1} = \Delta_{k, k+1}^0 + \delta_{k, k+1}$; $U_k^0, \Delta_{k, k+1}^0$ — стационарные значения) имеем линеаризованную систему уравнений:

$$\begin{vmatrix} \|B\| & 0 \\ 0 & \|D\| \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \|\vartheta\| \\ \|\delta\| \end{vmatrix} = 0, \quad (5)$$

где

$$\|B\| = \begin{vmatrix} (-2Cp + \sigma_1 - g_{св} \cos \Delta_{12}^0 & 0 & \dots & 0 \\ -g - g_{св} & & & \\ g_{св} \cos \Delta_{12}^0 & (-2Cp + \sigma_2 - g_{св} \cos \Delta_{23}^0) & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & (-2Cp + \sigma_n - g - g_{св}) \end{vmatrix},$$

$$\|D\| =$$

$$= \begin{vmatrix} -\frac{2Cp}{g_{св}} - \left(\frac{U_1^0}{U_2^0} + \frac{U_2^0}{U_1^0} \right) \times \frac{U_3^0}{U_2^0} \cos \Delta_{23}^0 & 0 & \dots & 0 \\ \frac{U_1^0}{U_2^0} \cos \Delta_{12}^0 & -\frac{2Cp}{g_{св}} - \left(\frac{U_2^0}{U_3^0} + \frac{U_3^0}{U_2^0} \right) \times \frac{U_4^0}{U_3^0} \cos \Delta_{34}^0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots - \frac{2Cp}{g_{св}} - \left(\frac{U_{n-1}^0}{U_n^0} + \frac{U_n^0}{U_{n-1}^0} \right) \times \cos \Delta_{n-1, n}^0 \end{vmatrix},$$

$$\|\vartheta\| = \begin{vmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \dots \\ \vartheta_n \end{vmatrix}, \quad \|\delta\| = \begin{vmatrix} \delta_{12} \\ \delta_{23} \\ \dots \\ \delta_{n-1, n} \end{vmatrix}, \quad \delta_k = S_a \left(U_k^0 + U_k^0 \frac{dS_a(U)}{dU} \Big|_{U=U_k^0} \right),$$

$$p = d/dt.$$

Из (5) видно, что амплитудные и фазовые вариаций независимы. Это дает возможность исследовать отдельно амплитудную и фазовую устойчивость системы. Для вариаций фазы из (5) имеем

$$\|D\| \cdot \|\delta\| = 0. \quad (6)$$

В соответствии с теоремой Гершгорина [5], примененной к матрице $\|D\|$, можно сказать, что синфазный режим системы рис. 1 устойчив по фазе, если

$$g_{св} > 0, \quad (7)$$

и неустойчив, если

$$g_{св} < 0. \quad (8)$$

Легко также заметить, что противофазный режим устойчив по фазе, если выполняется (8), и неустойчив при выполнении (7). Следовательно, если устойчив по фазе синфазный режим, то неустойчив противофазный, и наоборот. Все несинфазные режимы, как следует из анализа (6), всегда неустойчивы.

С точки зрения практики наиболее интересен синфазный режим, для которого и рассмотрим далее амплитудную устойчивость. Для вариаций амплитуды из (5) получим характеристическое уравнение

$$\det \|B\| = 0. \quad (9)$$

Произведя замену переменной, считая $U_1^0 = U_2^0 = \dots = U_n^0 = U_0$,

$$\cos \theta = (1/2) (-Cp + \sigma_0 - g - g_{св}) / g_{св},$$

где $\sigma_0 = S_a(U_0) + U_0 dS_a/dU|_{U=U_0}$, уравнение (9) можно переписать в виде

$$(\cos \theta + 1) \sin n\theta / \sin \theta = 0. \quad (10)$$

Используя (10), нетрудно получить корни характеристического уравнения (9)

$$p_l = (\sigma_0 - g) - 2g_{св} (1 + \cos \pi l/n), \quad (11)$$

где $l = 1, 2, \dots, n$.

При выполнении условий фазовой устойчивости синфазного режима (7) из (11) следует условие амплитудной устойчивости

$$dS_a(U)/dU|_{U=U_0} < 0, \quad (12)$$

которое совпадает с условием устойчивости одиночного автогенератора.

Остановившись на частном случае цепочки из трех автогенераторов (табл. 1), можно сказать, что синфазный режим устойчив, если справедливо (7). При этом остальные (противофазный и несинфазные) режимы неустойчивы. Если же справедливо (8), то устойчив противофазный режим. Синфазный же и несинфазные неустойчивы.

Управление фазовым распределением. На практике часто требуется получить тот или иной закон изменения фаз колебаний по цепочке автогенераторов (например, при использовании ансамбля автогенераторов в составе активной фазированной антенной решетки). Как известно, этого можно достичь использованием в нагрузочных трактах автогенераторов фазовращателей. Наличие взаимосвязи автогенераторов дает возможность подойти к решению этой задачи иным путем.

Таблица 1

Фазовые соотношения в цепочке из трех автогенераторов

№ режима	Δ_{12}^0	Δ_{23}^0
1 (синфазный)	0	0
2 (несинфазный)	0	π
3 (несинфазный)	π	0
4 (противофазный)	π	π

Понятно, что расстройка автогенераторов в соответствии с (15) возможна лишь в полосе частот (полосе взаимной синхронизации). Исследование устойчивости системы расстроенных по частоте автогенераторов (рис. 1), которое проводится аналогично случаю нерасстроенных автогенераторов, показывает, что для устойчивости необходимо выполнение условий

$$dS_a(U)/dU|_{U=U_0} < 0; \quad (17)$$

$$g_{св} \cos \Delta^0 > 0. \quad (18)$$

Условие (17) совпадает с условием (12). Из неравенства (18) следует, что возможная разность фаз колебаний соседних автогенераторов в рассматриваемой цепочке лежит в пределах

$$-\pi/2 < \Delta^0 < \pi/2$$

и, согласно (15), полоса возможных расстроек равна

$$\Pi = |g_{св}|/C. \quad (19)$$

Интересно отметить, что величина Π не зависит от числа автогенераторов и равна полосе взаимной синхронизации двух резистивно связанных автогенераторов.

В частном случае трех автогенераторов при выполнении (7) расстройка первого и третьего автогенераторов возможна в пределах (19). При этом разность фаз колебаний второго и первого автогенераторов равна разности фаз третьего и второго автогенераторов и меняется от нуля до $\pm 90^\circ$ на краях полосы синхронизации (19).

Эксперимент. Экспериментально исследовалась система трех взаимосвязанных автогенераторов на диодах Ганна. Каждый автогенератор выполнен на основе стандартного волновода трехсантиметрового диапазона. В качестве резонатора использовался полуволновой короткозамкнутый отрезок волновода. Нагрузкой автогенератора служил открытый конец волновода, который одновременно выполнял функции излучателя.

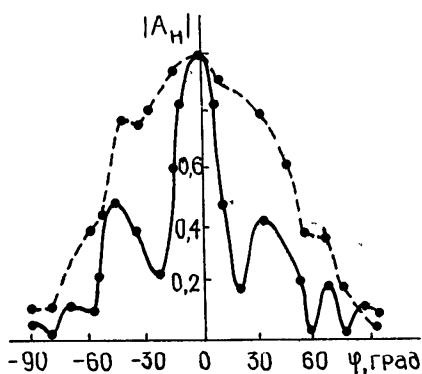


Рис. 2.

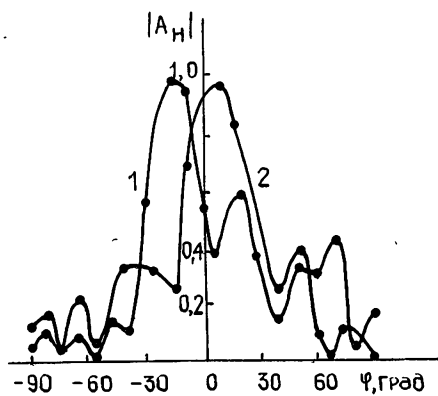


Рис. 3.

Рис. 2. Диаграммы направленности системы с тремя автогенераторами (сплошная линия) и одиночного излучателя (пунктирная линия).

Рис. 3. Диаграммы направленности системы с тремя автогенераторами при расстройке частот крайних автогенераторов;

$$1 - \frac{\Delta\omega_{12}}{\Pi/2} = \frac{\Delta\omega_{23}}{\Pi/2} = +0,56; \quad 2 - \frac{\Delta\omega_{12}}{\Pi/2} = \frac{\Delta\omega_{23}}{\Pi/2} = -0,56,$$

Три таких модуля располагались узкими стенками вплотную друг к другу и представляли простейшую трехэлементную автоколебательную фазированную антенную решетку. Взаимосвязь автогенераторов осуществлялась с помощью полосковой линии с резистивными элементами, впаянными в разрыв полоска. Связь полосковой линии с автогенераторами осуществлялась с помощью штырей, вставленных в широкие стенки волноводов.

Целью экспериментальных исследований было определение возможности взаимной синхронизации системы автогенераторов, а также возможности управления диаграммой направленности с помощью расстройки собственных частот автогенераторов.

На рис. 2 приведена экспериментальная диаграмма направленности (в плоскости H) системы с тремя излучающими автогенераторами в отсутствие частотных расстроек (сплошная линия). Из рис. 2 следует, что автогенераторы работают в синфазном режиме. Некоторая несимметрия диаграммы направленности объясняется разбросом параметров активных элементов автогенераторов. Для сравнения на том же рисунке пунктиром изображена экспериментально измеренная диаграмма направленности одиночного излучателя. Из сравнения диаграмм направленности рис. 2 видно, что главный лепесток диаграммы направленности системы с тремя автогенераторами уже диаграммы направленности одиночного излучателя (по уровню 0,7) примерно в 4 раза. Измерения показали, что напряженность поля в направлении главного максимума возросла в 2,4 раза. Это соответствует увеличению плотности потока излучаемой мощности в 5,7 раза.

На рис. 3 изображены диаграммы направленности системы с тремя автогенераторами при расстройках крайних автогенераторов. Из рис. 3 видно, что симметричная расстройка частот автогенераторов приводит к повороту главного лепестка диаграммы направленности. Полоса синхронизации в этом случае составила примерно 0,5% от средней частоты генерации.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Парыгин В. Н. — Радиотехника и электроника, 1956, № 2, с. 197.
- 2 Малафеев В. М., Поляков М. С., Романовский Ю. М. — Изв вузов—Радиофизика, 1970, 13, № 6, с. 936.
- 3 Tetsuho Endo, Shinsaku Mori — IEEE Trans, 1976, CAS-23, № 2, p. 100
- 4 Дворников А. А., Уткин Г. М. Фазированные автогенераторы радиопередающих устройств. — М.: Энергия, 1980
- 5 Ланкастер П. Теория матриц / Пер. с англ — М.: Наука, 1978.

Московский энергетический институт

Поступила в редакцию
31 мая 1983 г

MUTUAL SYNCHRONIZATION OF A CHAIN OF RESISTIVELY CONNECTED AUTOGENERATORS

A. A. Dvornikov, G. M. Utkin, A. M. Chukov

Mutual synchronization of a chain of one-contour autogenerators resistively connected on the fundamental tone is analysed by the method of slowly varying amplitudes. Possible stationary regimes are defined and their stability is investigated. Experimental results are presented.