

УДК 621.373

*В. В. БУГАЕНКО, В. И. ЩЕРБАК*, канд. техн. наук

**МЕТОДЫ СИНХРОНИЗАЦИИ КОЛЕБАНИЙ МНОГОЧАСТОТНЫХ  
ГЕНЕРАТОРОВ**

---

Для формирования сверхмощных импульсных сигналов в системах локации или сверхдальней связи помимо традиционных устройств в фазированных антенных решетках возможно применение многочастотных генераторов. Однако в обычном виде использование их не представляется возможным, так как генерируемые колебания в общем случае некогерентны. Чтобы выполнялись определенные фазовые соотношения между колеба-

ниями многочастотного генератора, необходимо обеспечить их синхронизацию.

Синхронизация колебаний одночастотных генераторов достаточно изучена [1, 2]. Характеристики многочастотных генераторов радиодиапазона практически не рассматривались, хотя синхронизация мод генераторов оптического диапазона (лазеры) подробно исследована.

Используем эквивалентные электрические модели лазеров [3, 4], структура которых практически не зависит от частоты,

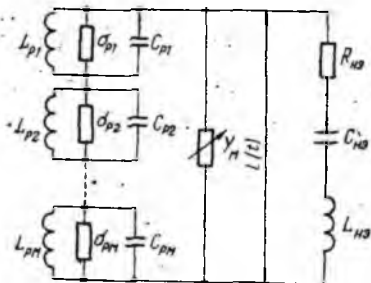


Рис. 1

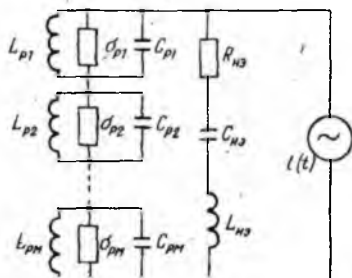


Рис. 2

в целях распространения методов синхронизации мод на многочастотные генераторы радиодиапазона. По аналогии с эквивалентными моделями лазеров с принудительной синхронизацией мод составим эквивалентные схемы многочастотного генератора, где предусмотрена принудительная синхронизация генерируемых колебаний (рис. 1, 2). Здесь нелинейный элемент отображается последовательным контуром с элементами  $R_{нз}$ ,  $C_{нз}$ ,  $L_{нз}$ , имеющими отрицательное значение. Нагрузкой генератора является цепочка параллельных колебательных контуров. Положим, что добротность контуров достаточно велика, поэтому  $j$ -я составляющая супермоды действует только в колебательном контуре  $L_{pj}$ ,  $C_{pj}$ ,  $\sigma_{pj}$ . Кроме того, связь между боковыми составляющими супермоды осуществляется только посредством модуляции, а другими связями, в частности через активный элемент, можно пренебречь. В таких схемах многочастотных генераторов могут одновременно существовать несколько устойчивых колебаний на частотах, близких к частотам настройки контуров [5]. Проводимость  $Y_m$  (рис. 1), изменяется с изменением частоты модуляции  $\omega_m$ . Модуляция может быть частотной и амплитудной. Синхронизирующий сигнал  $J(t)$  вырабатывается генератором тона (рис. 2).

Рассмотрим эквивалентную схему (рис. 1). Положим, что синхронизация осуществляется изменением потерь колебательных контуров, т. е.  $Y_m = \sigma_m(t)$ , где  $\sigma_m(t)$  — активная проводимость, а несущая частота супермоды  $\omega_p$  точно настроена на центральную частоту последовательного колебательного конту-

ра  $\Omega (\omega_p = \Omega)$ . В этом случае частота колебаний составляющей супермоды  $l_j$  вычисляется по формуле  $\nu_j = \omega_p + j\nu_m$ , где  $j = 0, 1, 2, \dots, m$ . В соответствии с законом Кирхгофа  $-J_{mj} = (y_{pj} + \bar{y}_{nj}) \times \times E_j$  (1). Здесь  $J_{mj}$  — комплексная амплитуда тока, протекающего через модулирующий элемент  $\sigma_m(t)$  и имеющего частоту  $\nu_j$ ;  $E_j$  — комплексная амплитуда составляющей  $l_j$ ;  $y_{pj}$ ,  $\bar{y}_{nj}$  — проводимости контуров;  $L_{pj}$ ,  $C_{pj}$ ,  $\sigma_{pj}$ ,  $\bar{L}_{nj}$ ,  $\bar{C}_{nj}$ ,  $\bar{R}_{nj}$  — элементы линеаризованного колебательного контура. Представим закон изменения потерь колебательных контуров так:  $\sigma_m(t) = \sigma_m(1 + \mu \cos \nu_m t)$  (2).

Преобразуя (1) с учетом (2), получим уравнение

$$E_{j-1} - E_{j+1} = \frac{4j\nu_m\sigma_{pj}}{\mu\sigma_m} \left[ T_{pj} \frac{\Delta\nu - \nu_m}{\nu_m} - \frac{\bar{\alpha}T_p}{2} \right] E_j,$$

стационарное решение которого имеет вид  $E_j = E_0 I_j(\Gamma)$  (3),

$$\text{где} \quad \Gamma = \frac{\mu\gamma}{2\nu_m T_p \left| \frac{\delta\nu}{\nu_m} - \frac{\bar{\alpha}}{2} \frac{T}{T_p} \right|};$$

$\mu$  — коэффициент модуляции;  $\gamma = \sigma_m \sigma_p^{-1}$ ;  $T_p$  — постоянная времени параллельного колебательного контура;  $\delta\nu = \Delta\nu - \nu_m$ ;  $\Delta\nu$  — частотный интервал между составляющими супермоды;

$\bar{\alpha} = \frac{\sigma_{nj}}{\sigma_p}$ ;  $\sigma_{nj} = R_{nj}^{-1}$ ;  $T$  — постоянная времени последовательного колебательного контура;  $I_j(\Gamma)$  — гиперболическая функция Бесселя  $j$ -го порядка. Принимая во внимание, что

$$l(t) = \sum_j E_j \cos(\nu_j t + \varphi_j), \quad (4)$$

с учетом (3) запишем выражение для интенсивности поля:

$$U = J(t) \cos^2 \left[ \left( \omega_p + \frac{m-1}{2} \nu_m \right) t + \varphi \right]. \quad (5)$$

Здесь

$$J(t) = J_0 \frac{e^{2\Gamma}}{2\pi\Gamma} \left( \frac{\sin\left(m \frac{\nu_m}{2} t\right)}{\sin\left(\frac{\nu_m}{2} t\right)} \right)^2. \quad (6)$$

Уравнение (5) связывает параметры генератора с характеристиками излучаемого поля и показывает, что электромагнитное

поле имеет вид импульсов длительностью  $t_{\text{и}} = 4\pi(m\Delta\nu)^{-1}$  и периодом следования  $\tau_{\text{и}} = 2\pi/\Delta\nu$ .

Анализ инжекционного метода синхронизации колебаний проведем на основании эквивалентной схемы (рис. 2). Из нее следует

$$l(t) = \sum_{j=1}^m l_j(t). \quad (7)$$

Синхронизирующий сигнал выберем в аналогичной форме:

$$J(t) = \sum_{j=1}^m J_j(t). \quad (8)$$

В этом случае для  $j$ -й составляющей супермоды составим дифференциальное уравнение

$$C_{pj} \frac{dl_j}{dt} + \sigma_{pj} l_j + \frac{1}{L_{pj}} \int l_j dt = -l_j \sigma_{\text{нз}} + J_j(t). \quad (9)$$

Здесь пренебрегаем реактивными членами  $L_{\text{нз}}$ ,  $C_{\text{нз}}$  колебательного контура. Подобное уравнение было решено в работе [6] при исследовании процесса установления режима захватывания для одночастотного генератора. Следовательно, все полученные выводы распространяются и на процесс синхронизации  $j$ -й компоненты супермоды. Генерируемые колебания в общем виде также описываются уравнением (5). Полагая, что синхронизирующий сигнал — синусоидальное колебание, модулированное гармоническим законом, и используя при решении (9) метод медленно меняющихся амплитуд [6], получаем укороченные уравнения вида

$$\begin{aligned} & \{[\omega_j + \dot{\varphi}_j(t)]^2 - \omega_{pj}^2\} A_j(t) \cos \varphi_j(t) + [2\dot{A}_j(t) + \\ & + \frac{\sigma}{C_{pj}} A_j(t)] \omega_j \sin \varphi_j(t) = \frac{J_j \omega_j}{C_{pj}} \sin \varphi_0; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} & \{[\omega_j + \dot{\varphi}_j(t)]^2 - \omega_{pj}^2\} A_j(t) \sin \varphi_j(t) - \left[ 2\dot{A}_j(t) + \right. \\ & \left. + \frac{\sigma}{C_{pj}} A_j(t) \right] \omega_j \cos \varphi_j(t) = -\frac{J_j \omega_j}{C_{pj}} \cos \varphi_0, \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\sigma = \sigma_{pj} + \sigma_{\text{нз}}$ ;  $\omega_{pj}^2 = (L_{pj} C_{pj})^{-1}$ ;  $\omega_j = \omega_{\text{в}} + j\nu_{\text{м}}$ ;

$\varphi_0$  — начальная фаза;  $A(t)$ ,  $\varphi(t)$  — временные амплитуда и фаза;  $\omega_{\text{в}}$  — частота несущей вынуждающего сигнала. Точка сверху обозначает производную по времени. Дальнейшее решение (10), (11) зависит от соотношения амплитуды синхронизирующего сигнала  $J_j$  и амплитуды колебаний свободного генератора  $J_{0j} = A_{0j} \sigma_{pj}$ . Здесь  $A_{0j}$  —  $j$ -я компонента амплитуды напряжения на

$j$ -м контуре при отсутствии внешнего воздействия. Когда  $J_j \ll J_{0j}$  (слабое воздействие), фазу  $\varphi_j$  в первом приближении можно определить, приняв допущение о том, что  $\dot{A}_j(t) = 0$ . Тогда для фазы и амплитуды колебания  $j$ -й компоненты супермоды

$$\varphi_j(t) = - \left\{ \Delta\omega + \frac{J_j}{J_{0j} T_{pj}} \sin [\varphi_j(t) - \varphi_0] \right\}; \quad (12)$$

$$A_j(t) = J_j \cos [\varphi_j(t) - \varphi_0], \quad (13)$$

где  $\Delta\omega = \omega_j - \omega_{pj}$ . При установлении режима синхронизации фаза  $\varphi_j(t)$  и амплитуда  $A_j(t)$  должны принять постоянные значения. Следовательно, если в (12) приравнять к нулю  $\dot{\varphi}_j(t)$ , получим уравнения для стационарных значений  $\varphi_{jст}$ ,  $A_{jст}$  в режиме синхронизации:

$$\sin [\varphi_{jст} - \varphi_0] = - \frac{\Delta\omega J_{0j} T_{pj}}{J_j}; \quad (14)$$

$$A_{jст} = \frac{J_j}{\sigma} \cos [\varphi_{jст} - \varphi_0]. \quad (15)$$

Для определения динамики установления фазы обратимся к соотношению (12), записав его в виде

$$\dot{\varphi}_j(t) = - \frac{J_{0j} T_{pj}}{J_j} [\beta + \sin \varphi_j(t)]. \quad (16)$$

Здесь  $\beta = \frac{\Delta\omega J_{0j} T_{pj}}{J_j}$ . Когда  $|\beta| < 1$ , существует такое значение  $\varphi_j(t)$ , при котором выполняется тождество  $\beta + \sin \varphi_j(t) = 0$  (17), а производная  $\dot{\varphi}_j(t) = 0$ , т. е. фаза  $\varphi_j$  принимает постоянное значение  $\varphi_{jст}$ , соответствующее стационарному состоянию. Это значит, что частота поля  $j$ -й компоненты супермоды

$$\omega = \frac{d[\omega_j t + \varphi_j(t)]}{dt} = \omega_j.$$

Следовательно, по истечении времени, необходимого для установления фазы  $\varphi_{jст}$  (теоретически  $t \rightarrow \infty$ ), генератор работает на вынуждающей частоте  $\omega_j$ . Иными словами, при  $|\beta| < 1$  имеет место режим принудительной синхронизации и генератор работает в режиме захватывания частоты. Если  $|\beta| > 1$ , тождество (17) не может иметь места, что указывает на несовпадение частоты генератора и вынуждающей частоты, а также на наличие «биений». Разница в частотах составляет  $\varphi_j(t)$ . Таким образом условие

$$\beta = |\Delta\omega|_{\max} T_{pj} \frac{J_{0j}}{J_j} \quad (18)$$

определяет полосу захвата генератора.

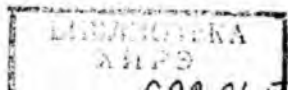
Экспериментальной проверке подвергались оба метода синхронизации многочастотных генераторов. С этой целью изготовили устройство для их проверки, состоящее из задающего генератора, управляемого генератора, устройства согласования и измерительных приборов.

Задающий генератор, собранный на одном транзисторе, представлял собой LC-генератор с колебательным контуром в цепи коллектора. Питание генератора осуществлялось по последовательной схеме. Частота генерируемых колебаний 1 МГц. Для создания спектра синхронизирующего сигнала в нем выполнялась модуляция потерь колебательного контура. Использовался полевой транзистор, со стороны затвора модулирующий сигнал в цепи управления практически не имел электрической связи с колебаниями в контуре.

Управляемый генератор, собранный на одном транзисторе, представлял собой LC-генератор с пятью колебательными контурами, включенными последовательно в цепь коллектора. Так как устройство автосмещения малоинерционно, в генераторе возбуждались пять устойчивых колебаний на частотах, близких к частотам настройки колебательных контуров. В качестве устройства согласования использовался стандартный усилитель из электронного тракта осциллографа С1-17, который служил для передачи синхронизирующего сигнала от задающего генератора к управляемому и предотвращал обратное проникновение сигнала. Для индикации и измерений применялись осциллограф С1-49 и спектроанализатор С4-8, которые подключались к колебательным контурам управляемого генератора.

Эксперимент проводили в два этапа. На первом проверяли внутреннюю принудительную синхронизацию управляемого генератора с модулированными потерями колебательных контуров по эквивалентной схеме (рис. 1). Для реализации проводимости  $Y_m$  параллельно цепочке из пяти колебательных контуров включали полевой транзистор с изолированным затвором, на который подавался модулирующий сигнал от генератора ГЗ-34. Частота его выбиралась равной разности резонансных частот соседних колебательных контуров и составляла 100 кГц. При этом первая гармоника модулированного сигнала совпадала с резонансной частотой соседнего контура и синхронизировала его колебания.

На втором этапе контролировали инжекционную принудительную синхронизацию (внешним сигналом). Экспериментальная установка была реализована в соответствии с эквивалентной схемой (рис. 2). Синхросигналы подавались с задающего генератора через устройство согласования. Каждая составляющая синхронизирующего сигнала совпадала с резонансной частотой соответствующего контура управляемого генератора. Достаточное число гармоник синхросигнала достигалось благодаря использованию параметрической модуляции задающего генера-



тора. Для синхронизации использовался сигнал, амплитуда которого на порядок меньше сигнала управляемого генератора. В колебательных контурах последнего предусмотрели регулировку потерь с помощью микрометрических потенциометров, что обеспечивало регулировку амплитуд составляющих. Это позволило в определенных пределах управлять спектром выходного сигнала.

Проведенный эксперимент показал, что оба метода синхронизации дают одинаковый результат. Вне области синхронизации вынужденные колебания существуют совместно с автоколебаниями, поэтому в системе образуется квазипериодический режим биений, характеризующийся сложными амплитудными и фазовыми соотношениями. Синхронный режим устанавливается лишь в определенной полосе расстроек колебательного контура относительно частоты спектральной составляющей внешнего синхронизирующего сигнала. Режим биений пропадает, и устанавливается режим, когда управляемый генератор в нагрузке возбуждает единое колебание, образованное синхронизированными составляющими, огибающая которого с высокой точностью описывается соотношением (6) и представляет собой последовательность импульсов длительностью порядка 20 мкс и периодом следования 60 мкс. Наилучшая форма импульса достигается при равенстве амплитуд колебаний пяти контуров, причем несущей выходного сигнала становится колебание с наибольшей амплитудой. Это позволяет в дискретной форме управлять частотой несущей выходного сигнала.

**Список литературы:** 1. Адлер Р. Исследование явлений синхронизации генераторов// Тр. Ин-та инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1973. 61. № 10. С. 5—11. 2. Курокава К. Принудительная синхронизация твердотельных СВЧ-генераторов//Тр. Ин-та инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1973. 61. № 10. С. 12—40. 3. Поляков Г. И. Методы эквивалентных электрических моделей в теории внутренней модуляции лазеров//Радиотехника и электроника. 1981. 26. № 7. С. 1461—1468. 4. Бугаенко В. В., Поляков Г. И. Использование методов исследования радиотехнических цепей при анализе синхронизации мод в лазере внешним сигналом//УПИМ. 1983. № 1. Д5698Н, Д5699Н. 5. Штейн Н. И. Автогенераторы гармонических колебаний. М.; Л., 1961. 200 с. 6. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1971. 672 с.

*Поступила в редколлегию 30.11.84.*