

УДК 621.396.614

## ВОЗДЕЙСТВИЕ МАЛОГО СИГНАЛА НА ГЕНЕРАТОР СВЧ

В.А. ОСИПОВ, С.А. ШОСТАК

Военная академия Республики Беларусь  
Минск-57, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 9 июня 2011

Рассматриваются основные параметры СВЧ-автогенератора с точки зрения энергообмена отрицательной электронной проводимости активного прибора автогенератора с нагруженной колебательной системой при воздействии малого внешнего синхронизирующего сигнала. Физически прозрачная трактовка, дополненная векторными диаграммами, и полученные соотношения позволяют оценить значения частоты, фазы и мощности синхронизируемого автогенератора в зависимости от параметров сигнала синхронизации.

*Ключевые слова:* синхронизация, автогенератор, эквивалентная схема, отрицательная проводимость.

### Введение

В последнее время существенно возрос интерес разработчиков СВЧ радиопередающих устройств к вопросам синхронизации автогенераторов-двухполюсников малым внешним синхронизирующим сигналом. Известны две возможности применения двухполюсников-автогенераторов в качестве усилителей: в виде регенеративных усилителей и в виде синхронизированных автогенераторов.

В регенеративных усилителях искусственно нарушаются амплитудные условия самовозбуждения, поэтому собственные автоколебания в них подавлены, и они могут быть использованы как усилители с положительной обратной связью. Однако, в силу целого ряда причин на практике они не нашли широкого применения.

В синхронизированных автогенераторах автоколебания на частоте генерации подавляются внешним синхронизирующим сигналом и возникают вынужденные колебания на частоте этого сигнала. Поскольку сигнал синхронизации имеет много меньшую мощность, чем сигнал собственно генератора, то можно говорить о коэффициенте усиления синхронизированного генератора.

Вопросам синхронизации посвящено большое количество научных работ. Процесс синхронизации нелинеен и описывается сложными дифференциальными уравнениями. Простые, пригодные для инженерных расчетов соотношения, характеризующие процесс синхронизации, можно получить, рассматривая влияние внешнего синхронизирующего сигнала на автогенератор как результат воздействия волны отраженной от нагрузки. Такая трактовка очень наглядна, поскольку явления при синхронизации становятся эквивалентными явлению затягивания частоты и она применима для всех без исключения автогенераторов-двухполюсников. С другой стороны, такое упрощенное представление процесса синхронизации часто не позволяет оценить параметры синхронизированного автогенератора и связать их с механизмом передачи энергии конкретных автогенераторов, поскольку эти механизмы в разных автогенераторах различны. Кроме того, такое представление принципиально не позволяет рассмотреть вопросы, связанные с динамикой входа автогенератора в синхронизм, в частности выяснить зависимости полосы частот синхронизации от параметров синхросигнала, поскольку в данном случае частота синхросигнала всегда точно равна частоте автогенератора, при пренебрежительно малом его запаздывании.

Это, в свою очередь, затрудняет оценку возможностей тех или иных синхронизированных генераторов. В данной статье предложен упрощённый векторный метод анализа синхронизации, позволяющий установить зависимости основных параметров синхронизированного генератора (выходной мощности, частоты и фазы) от параметров синхронизирующего сигнала.

### Структура и эквивалентная схема синхронизированного генератора СВЧ

Для ввода сигнала синхронизации в колебательную систему СВЧ синхронизируемого автогенератора в настоящее время чаще всего применяют схему с ферритовым циркулятором (рис. 1), [1–3].

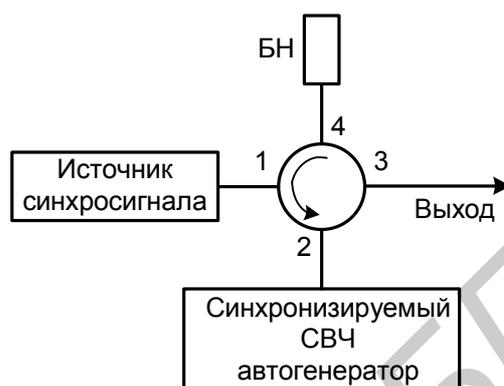


Рис. 1. Структурная схема синхронизированного генератора СВЧ

Синхронизирующий СВЧ-сигнал поступает от источника через плечи 1 и 2 ферритового циркулятора в синхронизируемый автогенератор, который является активным двухполосником (магнетрон, генератор на диоде Ганна, генератор на ЛПД и т.д.). Выходной сигнал синхронизируемого СВЧ-автогенератора через плечи 2 и 3 поступает на выход (в нагрузку). Отражённая от нагрузки мощность в случае ее рассогласования поступает в плечо 4 и через него в балластную нагрузку (БН). Применение четырёхплечевого циркулятора позволяет обеспечить развязку порядка 20–25 дБ между входом и выходом каскада, а для синхронизируемого СВЧ-автогенератора – режим односторонней синхронизации, т.е. значительное ослабление обратной реакции на источник синхронизирующего сигнала. Одновременно существенно уменьшается крайне нежелательный «эффект длинной линии» [4–7]. Для упрощения анализа процесса синхронизации можно пренебречь изменением электронной проводимости  $Y_{эл}$  синхронизируемого генератора под действием синхронизирующего сигнала и, кроме того, ограничиться случаем малого синхросигнала:  $U_c \ll U$ , где  $U_c$  – амплитуда синхронизирующего напряжения, пересчитанная к колебательной системе генератора,  $U$  – амплитуда напряжения самого синхронизируемого генератора. При таком допущении влияние синхросигнала на амплитуду  $U$  синхронизируемого автогенератора оказывается пренебрежительно малым. Принятые допущения вполне оправданы, поскольку соответствуют эксплуатационным режимам синхронизированных генераторов [1, 2, 7, 8].

Рассмотрим условия самовозбуждения в СВЧ-автогенераторах резонансного типа.

Общим условием установившихся колебаний СВЧ-автогенератора является равенство нулю суммы полной проводимости колебательной системы вместе с нагрузкой и полной электронной проводимости [2, 3, 7, 9].

$$Y_k + Y_{эл} = 0 \quad (1)$$

$$\text{или } G_{эл} + G_{пол} = 0, \quad (2)$$

$$B_{эл} + B = 0 \quad (3)$$

$$\text{где } B = 2Q_n G_{пол} (\omega / \omega_0 - 1) \quad (4)$$

В самом общем случае  $B_{эл} \neq 0$  и ток первой гармоники запаздывает относительно первой гармоники напряжения на колебательной системе на угол  $\theta$ . Учитывая соотношение (4), можно определить угол запаздывания:

$$\theta = \arctg[(\omega_2 - \omega_0) / \omega_0] 2Q. \quad (5)$$

Исходя из приведенных соотношений, можно составить эквивалентную схему автономного автогенератора, представленную на рис. 2.

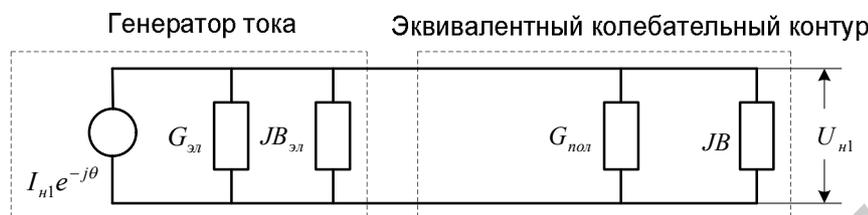


Рис. 2. Эквивалентная схема автономного автогенератора

Параметры  $G_{пол}$  и  $JB$  характеризуют колебательную систему автогенератора. Активная проводимость  $G_{пол}$  является суммой активной проводимости резонатора  $G$  и трансформированной активной проводимости нагрузки  $G'_н$ .

$$G_{пол} = G + G'_н. \text{ Аналогично } B = B_p + B'_н,$$

где  $B_p$  – реактивная проводимость резонатора,  $B'_н$  – трансформированная реактивная проводимость нагрузки.

Генератор тока  $I_n$  есть воображаемый (фиктивный) источник энергии, ток которого не зависит от напряжения на контуре. Отрицательная внутренняя проводимость  $Y_c$  генератора тока является комплексной величиной. Предположим также, что генератор тока потенциально может генерировать любую частоту. Векторная диаграмма, иллюстрирующая фазовые соотношения в автономном автогенераторе, приведена на рис. 3. Из неё следует, что по цепи генератора циркулирует активная  $I_{на1}$  и реактивная  $I_{нр1}$  составляющие первой. Т.о., равенство (3), которое можно переписать в виде  $\varphi_{эл} + \varphi_p = 0$ , обеспечивает устойчивую работу автогенератора на частоте  $\omega_2$ . Любое изменение фазового сдвига генератора тока  $\varphi_{эл} = \theta$  влечет за собой изменение частоты генератора тока, а соответственно фазового сдвига контура  $\varphi_p$ , автоматически изменится фазовый угол генератора тока, а это ведёт к изменению частоты последнего. Следовательно, существует несколько способов управления частотой автогенератора гармоники тока. При первом способе частотой управляют, изменяя режим работы самого автогенератора. Перестройка частоты при втором способе происходит при изменении конструктивных параметров колебательной системы.

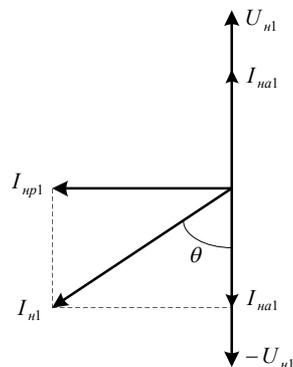


Рис. 3. Векторная диаграмма токов и напряжений в автономном автогенераторе

Третий способ осуществляется посредством ввода в систему «генератор тока – колебательный контур» дополнительного фазового сдвига извне. Такой ввод дополнительного фазо-

вого сдвига в систему обеспечивается синхронизацией автогенератора с помощью вспомогательного источника СВЧ-колебаний.

### Анализ механики синхронизации

Для исследования механизма синхронизации, в качестве исходной модели синхронизированного автогенератора примем эквивалентную схему, представленную на рис.4, которая соответствует схеме рис. 1 [3].

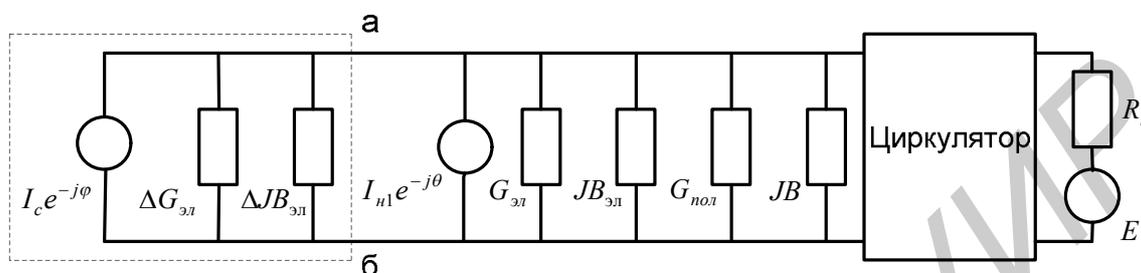


Рис. 4. Эквивалентная схема синхронизированного автогенератора

Применение невзаимного элемента развязки (ферритового циркулятора), через который подается синхронизирующий сигнал, обеспечивает его одностороннее влияние на автогенератор. Это дает возможность рассматривать действие напряжения синхронизирующего источника на автогенератор вне зависимости от действующих напряжений в схеме самого автогенератора. Так как электронная проводимость автогенератора отрицательна, то действие на генератор тока напряжения

$$U_c = U_c \cos(\omega_1 t - \varphi),$$

где  $\varphi$  – характеризует задержку синхронизирующего сигнала в колебательном контуре, означает появление в этой цепи тока  $i_c = I_c (\cos \pi + \omega t - \varphi)$ , фаза которого на  $\pi$  сдвинута относительно напряжения, вызвавшего этот ток. Это положение справедливо только для малых значений  $U_c$  [7, 9]. Таким образом из-за несовпадения частот  $\Delta\omega = \omega_c - \omega_0$  в систему «генератор тока – эквивалентный контур» вносится фазовый сдвиг, а по цепи генератора тока будут циркулировать реактивная и активная составляющие синхронизирующего тока, что аналогично подключению к генератору тока (выводы а, б рис. 4.) дополнительного генератора тока  $I_c$  с отрицательной проводимостью  $\Delta Y_{эл}$ , следствием чего является изменение частоты генератора тока и его амплитуды.

Таким образом, для эквивалентной схемы синхронизированного генератора справедливо следующее равенство:

$$I_c \cos(\omega_1 t - \varphi - \varphi_i) + I_{н1} \cos(\omega_2 t - \theta) = I'_{н1} \cos(\omega_1 t - \psi), \quad (6)$$

где  $\varphi_i$  – начальный фазовый сдвиг. Для удобства примем  $\varphi_i = 0$ .

По существу задача синхронизации сводится к анализу динамического согласования колебательной системы автогенератора и его электронной проводимости с целым рядом параметров синхронизирующего сигнала.

Построим векторную диаграмму, характеризующую фазовые соотношения в автогенераторе, работающем в режиме синхронизации.

В начальный момент времени векторы  $I_c$  и  $I_{н1}$  вращаются в комплексной плоскости с разными угловыми скоростями. Если вообразить наблюдателя вращающимся со скоростью  $\omega_c$ , то вектор  $I_c$  будет представляться ему неподвижным, а вектор  $I_{н1}$  – вращающимся со скоростью  $\omega = \omega_c - \omega_2$ . Вектор результирующего тока  $I'_{н1}$  равен геометрической сумме  $I_c$  и  $I_{н1}$ . Конец его описывает на плоскости окружность радиуса  $I_{н1}$ , а сам он качается, периодически изменяясь как по своей величине, так и по начальной фазе (частоте).

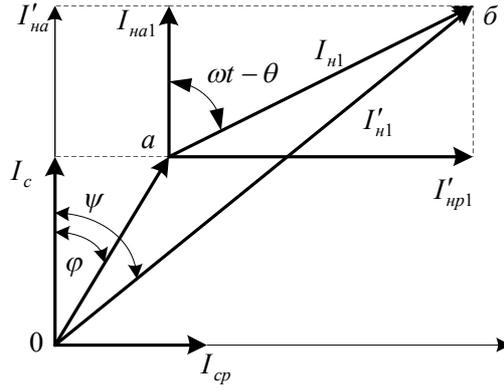


Рис. 5. Векторная диаграмма токов синхронизированного автогенератора

Так как отношение  $I_c / I_{n1}$  много меньше единицы, то можно принять, что амплитуда  $I'_{n1}$  постоянна. Это положение векторов поясняет диаграмма на рис. 5. Здесь  $\varphi$  – фазовый сдвиг синхронизирующего тока, поступившего в систему «генератор тока-эквивалентный контур».

Результирующее колебание можно, с одной стороны, рассматривать как колебание частоты  $\omega_c$ , начальная фаза которого периодически (с частотой  $\Omega$ ) колеблется в пределах  $\pm\psi$ , а с другой стороны известно, что изменение начальной фазы колебания неразрывно связано с изменением его частоты. Поэтому можно утверждать, что результирующее колебание, имея неизменную начальную фазу, изменяется во времени с частотой

$$\omega = \omega_c + \frac{d\psi}{dt}.$$

Из треугольника  $0ab$  следует, что амплитуда суммарного колебания

$$I'_{n1} = [I_{n1}^2 + I_c^2 + 2I_c I_{n1} \cos(\Omega t - \theta - \varphi)]^{1/2} \quad (7)$$

а отклонение фазы

$$\psi = \arctg \frac{I_{n1} \sin(\Omega t - \theta) - I_c \sin \varphi}{I_{n1} \cos(\Omega t - \theta) - I_c \cos \varphi} \quad (8)$$

В установившемся режиме частота генератора тока  $\omega_c$  станет равной  $\omega_c$ , т.е.  $\Omega = 0$  и векторы относительно наблюдателя займут неподвижное положение.

Стационарная амплитуда в синхронизированном генераторе будет равна

$$I'_{n1} = [I_{n1}^2 + I_c^2 + 2I_c I_{n1} \cos(\theta - \varphi)]^{1/2}, \quad (9)$$

а стационарная фаза

$$\psi = \arctg \frac{I_{n1} \sin \theta - I_c \sin \varphi}{I_{n1} \cos \theta - I_c \cos \varphi}. \quad (10)$$

Активная составляющая наведенного тока в синхронизированном генераторе равна

$$I'_{na} = I'_{n1} \cos \psi = I_{n1} \cos \theta + I_c \cos \varphi. \quad (11)$$

Чтобы поддерживались колебания на частоте синхронизирующего источника, контур согласно (5) должен обеспечивать сдвиг фаз между первой гармоникой тока и первой гармоникой напряжения на угол

$$\arctg \left( -\frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} 2Q \right). \quad (12)$$

Условие фазового равновесия в «системе» запишется [3]:

$$\frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} 2Q = - \frac{I_{n1} \sin \theta - I_c \sin \varphi}{I_{n1} \cos \theta + I_c \cos \varphi} \quad (13)$$

Умножим правую часть уравнения (13) на  $\frac{1}{q}$ , где  $q$  – проводимость колебательной системы генератора. Учитывая, что в стационарном режиме

$$u = \frac{I_{n1} \cos \theta + I_c \cos \varphi}{q}, \quad (14)$$

перепишем уравнение (13) в виде

$$\frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} 2Q_n = \frac{I_{n1} \sin \theta}{qu} + \frac{I_c \sin \varphi}{qu}. \quad (15)$$

Таким образом, для определения установившихся амплитуды и фазы в синхронизированном генераторе можно составить следующую систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} U - \frac{I_{n1}}{q} \cos \theta &= \frac{I_c}{q} \cos \varphi \\ \frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} 2Q + \operatorname{tg} \theta + \frac{I_{n1}}{qu} \sin \theta &= \frac{I_c}{qu} \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

С учетом равенства (5) система уравнений (16) примет вид

$$\left. \begin{aligned} U - \frac{I_{n1}}{q} \cos \theta &= \frac{I_c}{q} \cos \varphi \\ \frac{\omega_c - \omega_0}{\omega_0} 2Q + \frac{I_{n1}}{qu} \sin \theta &= \frac{I_c}{qu} \sin \varphi \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Амплитуда колебаний при синхронизации равна

$$U_1 = \frac{I_{n1} p(q, \theta)}{qr(q, \theta)} \left\{ 1 \pm \left[ 1 - \frac{(1 - \beta)^2 r(q, \theta)}{p^2(q, \theta)} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} \quad (18)$$

где  $p(q, \theta) = \cos \theta - (q - \operatorname{tg} \theta) \sin \theta$ ;  $r(q, \theta) = 1 + (q + \operatorname{tg} \theta)^2$ ;  $\beta = I_c / I_{n1}$ .

Из (17) и (18) можно найти выражение для фазы

$$\varphi = \arcsin \left\{ \frac{1}{\beta} \left[ \sin \theta + (q + \operatorname{tg} \theta) \frac{p(q, \theta)}{r(q, \theta)} \left[ 1 + \left( 1 + \frac{(1 - \beta)^2 r(q, \theta)}{p^2(q, \theta)} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right] \right\} \quad (19)$$

### Выводы

Из полученных выражений (18) и (19) видно, что амплитуда и фаза в синхронизированном генераторе зависят как от параметров синхронизирующего сигнала, так и от параметров генератора тока. Используя эти уравнения, зная параметры электронной проводимости и параметры колебательной системы автогенератора, можно оценить фазу и мощность его колебаний в синхронном режиме.

Полученные соотношения справедливы для любых СВЧ синхронизированных автогенераторов, независимо от физических процессов передачи энергии носителей их резонансным колебательным системам.

# INFLUENCE OF SMALL SIGNAL ON MICROWAVE FREQUENCY GENERATOR

V.A. OSIPOV, S.A. SHOSTAK

## Abstract

Key parameters of the microwave self-contained generator in terms of interchange of energy negative electronic conductivity of the active device of the oscillator with the loaded oscillatory system at influence of small external synchronizing signal are considered. Physically treatment added with vector diagrams and the received parities allow estimating values of frequency, phase and capacity of the time-based oscillator depending on parameters of synchronization signal.

## Литература

1. *Лебедева И.В.* Генераторы и усилители СВЧ. М., 2005.
2. *Райнер М.М.* // Вопросы радиоэлектроники. 1961. №8.
3. Отчет по НИР. №71018825. Минск, 1974.
4. *Каргин А.Н.* // Электронная техника. 1984. Вып. 2.
5. *Гуцайт Э.М.* // Радиотехника. 1965. Т.8, №6.
6. *Рубаник В.П.* // Радиотехника. 1962. Т.5, №3.
7. *Уманский В.С.* Усилительный тракт импульсных передающих устройств СВЧ. М., 1973.
8. *Вайнштейн Л.А., Солнцев В.А.* Лекции по сверхвысокочастотной электронике. М., 1973.
9. *Бычков С.И.* Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М., 1967.