

УДК 621.385.64

## СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВОСПРИИМЧИВОСТИ К ПОМЕХАМ ГЕНЕРАТОРА СВЧ С ВНЕШНЕЙ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

А.О. АШАМИС, А.М. БРИГИДИН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 16 декабря 2008

Предложен способ оценки восприимчивости генераторов СВЧ к электромагнитным помехам на основе параметра восприимчивости. Проанализированы уровни побочных колебаний на выходе автогенератора СВЧ при проникновении внешней помехи в его колебательную систему.

*Ключевые слова:* автогенератор, помеха, восприимчивость, интермодуляция, внешняя дополнительная обратная связь.

### Введение

Из-за интенсивного развития беспроводных технологий произошло многократное увеличение числа радиопередающих средств, что заметно усложнило электромагнитную обстановку [1]. В устройствах формирования радиосигналов в современной аппаратуре большое место занимают автогенераторы СВЧ. Эти автоколебательные системы не только весьма чувствительны к помехам, но и, в случае проникновения в них мешающих сигналов, сами могут служить источниками помех. Восприимчивость к помехам у автономных генераторов проявляется в виде отклонения рабочих параметров амплитуды, частоты и фазы от номинальных, искажения закона модуляции, появления на выходе интенсивных побочных излучений.

Успешное применение тех или иных способов по эффективному воздействию на восприимчивость генератора СВЧ без снижения его эксплуатационных показателей возможно только в результате выяснения природы взаимодействия помех и автоколебательной системы, определения количественных характеристик восприимчивости. Методы, теории и практики принудительной синхронизации генераторов СВЧ позволяют решить эту задачу. Целью работы является оценка восприимчивости автогенераторов СВЧ с внешней дополнительной обратной связью (ВДОС) [2] к гармоническим помехам и определение уровней восприимчивости, при которых происходит функциональный сбой в работе устройства.

### Теоретический анализ

При действии на автогенератор СВЧ с ВДОС внешней гармонической э.д.с с частотой  $\omega_{cn}$ , близкой к частоте свободных колебаний  $\omega_r$ , имеет место процесс синхронизации генератора, который приближенно описывается укороченными дифференциальными уравнениями [2] вида:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\omega_0}{2Q_n} \left[ U - \frac{I_{вхл1}}{G_k} \cos \Theta - \frac{Q_n}{Q_{вн}} \left( 1 - \frac{k + \cos \psi}{a + \cos \psi} \right) - E_{cn} \cos \varphi \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\frac{\omega_0}{2Q_H} \left[ \frac{\omega_{cn} - \omega_0}{\omega_0} 2Q_H - \frac{I_{\text{вых1}}}{G_k} \sin \Theta + \frac{2Q_H}{Q_{\text{вн}}} \frac{\sin \psi}{a + \cos \psi} - E_{cn} \sin \varphi \right], \quad (2)$$

где  $U$ ,  $\omega_0$ ,  $Q_H$  — соответственно амплитуда вынужденных колебаний, резонансная частота, нагруженная добротность автогенератора;  $G_k$ ,  $I_{\text{вых}}$ ,  $\Theta$  — соответственно активная проводимость резонатора, первая гармоника выходного тока автогенератора, угол запаздывания ВЧ тока относительно напряжения  $U$ ;  $E_{cn}$ ,  $\omega_{cn}$ ,  $\varphi$  — соответственно амплитуда внешней э.д.с., частота внешнего колебания, фазовый сдвиг между напряжением  $U$  и током внешнего колебания;  $Q_{\text{вн}}$ ,  $k$ ,  $\psi$ ,  $a$  — соответственно внешняя добротность контура автогенератора, модуль и фаза коэффициента отражения,  $a = 1 + k^2/2k$ .

Уравнения (1) и (2) не могут быть решены в квадратурах в общем виде. Однако, используя метод вариаций [3], их можно решить в общем виде. Применяя метод вариаций, найдем, что при воздействии малых внешних сил изменение амплитуды автогенерации  $U$  вызвано изменением фазы колебания  $\varphi$

$$U = U_0 + E_{cn} \cos \varphi. \quad (3)$$

При этом фаза колебания автогенератора СВЧ с ВДОС определяется дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = -\omega_{cn} - \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q_H} \operatorname{tg} \Theta + \frac{\omega_0}{Q_{\text{вн}}} \frac{\sin \psi}{a + \cos \psi} - \frac{\omega_0 E_{cn}}{2Q_H U} \sin \varphi, \quad (4)$$

Приняв

$$\omega_r = \omega_0 \left( 1 + \frac{\operatorname{tg} \Theta}{2Q_H} + \frac{1}{Q_{\text{вн}}} \frac{\sin \psi}{a + \cos \psi} \right), \quad (5)$$

запишем уравнение (4) в окончательном виде

$$\dot{\varphi} = \omega_r - \omega_{cn} - \frac{\omega_0 E_{cn}}{2Q_H U_0} \sin \varphi. \quad (6)$$

Чтобы выполнить поставленную в данной работе цель, необходимо сформулировать понятие "восприимчивость автогенератора СВЧ" к действию электромагнитных помех. За рабочий режим генератора примем режим работы устройства, при котором вырабатывается гармоническое колебание определенной амплитуды и частоты. Если в выходном спектре колебаний автогенератора кроме рабочего колебания появляются другие колебания, частоты которых кратны частоте биений  $\Omega$ , то режим работы генератора будем называть "аномальным". Для количественной оценки восприимчивости примем, что мощность на ближайшей к рабочей аномальной частоте колебаний не должна превышать  $-30$  дБ уровня амплитуды полезного сигнала. Тогда за параметр "восприимчивости генератора" можно принять некоторое значение  $p$ , определяемое с помощью формулы:

$$p = \Delta\omega/\alpha, \quad (7)$$

где  $\Delta\omega$  — частотная расстройка помехи от частоты генератора,  $\alpha = \omega_0 E_{cn}/2Q_H U_0$  при котором в выходном спектре появляется "аномальное" колебание с амплитудой  $-30$  дБ относительно сигнала генератора. Этот параметр объединяет между собой параметры генератора, помехи и частотный разнос между полезным сигналом и помехой и может использоваться в качестве показателя качества генератора, меры оценки способности устройства противостоять электромагнитному воздействию. В данной работе при анализе восприимчивости генераторов основное внимание уделяется автономным режимам, так как они наиболее широко используются в устройствах формирования радиосигналов. Пороговые минимальные уровни внешних воздей-

ствий зависят от конкретного выполнения схемы автогенератора, его назначения, а также возможности изменения его режима. Процедура расчета параметра восприимчивости, на наш взгляд, представляется следующей. Для определения спектра выходных колебаний используем выражение

$$u = U \cos \omega_{cn} t - \varphi . \quad (8)$$

Чтобы найти значение фазы  $\varphi$ , необходимо воспользоваться уравнением (6) и рассмотреть вариант работы автоколебательной системы в условиях действия посторонней внешней силы: режим частичного увеличения частоты (случай воздействия помехи на автогенератор).

Уровни и частоты спектральных составляющих выходных колебаний генератора при воздействии на него электромагнитных помех в общем виде определяются соотношением:

$$u = U_0 + E_{cn} \cos \varphi \cos \omega_{cn} t - \varphi . \quad (9)$$

### Расчет спектра интермодуляционных колебаний автогенератора

Поведение фазы в этом случае описывается уравнением (6). Уравнения подобного типа исследовались в ряде работ, например [2], однако спектр выходных колебаний автогенератора в этих работах определялся без учета изменения амплитуды колебания при частичном увлечении частоты, что приводит к расхождениям между теоретическими и экспериментальными результатами, особенно при значительных разносах частот автогенерации и помехи. Кроме того, решения дифференциального фазового уравнения (6) во всех ранее опубликованных работах достаточно сложны и громоздки.

Более короткий путь к конечному результату лежит в использовании решения уравнения фазы, найденного в работе [3] для частичной синхронизации автогенератора:

$$\cos \varphi = \frac{(1 - q^2) \cos \Omega t - q \sqrt{1 - q^2} \sin \Omega t}{1 + q^2 \cos \Omega t + q \sqrt{1 - q^2} \sin \Omega t} . \quad (10)$$

Здесь  $q = \frac{E_{cn} \omega_{\Gamma}}{2Q_H U_0 (\omega_{cn} - \omega_{\Gamma})}$ ,  $\Omega = (\omega_{cn} - \omega_{\Gamma}) \sqrt{1 - q^2}$ ,  $t$  — текущее время.

Выражение (10) примечательно тем, что  $q$  непосредственно связано с восприимчивостью автогенератора  $p = 1/q$ .

Осуществляя линейную комбинацию над гармоническими величинами, приведем равенство (10) к виду:

$$\cos \varphi = \frac{\sqrt{1 - q^2} \sin(\Omega t - \gamma)}{1 + q \cos(\Omega t - \gamma)} , \quad (11)$$

где  $\gamma = \arctg \frac{\sqrt{1 - q^2}}{q}$ .

Тогда

$$\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} = \frac{q + \cos(\Omega t - \gamma)}{1 + q \cos(\Omega t - \gamma)} . \quad (12)$$

Преобразуем выражение (9) к виду:

$$u = U_0 \cos(\omega_{cn} t - \varphi) + \frac{E_{cn}}{2} \cos \omega_{cn} t + \frac{E_{cn}}{2} \cos(\omega_{cn} t - 2\varphi) \quad (13)$$

Анализ показывает, что при расстройках больше полосы захватывания  $\omega_r - \omega_{cn} > E_{cn}\omega_0/2Q_H U_0$ , последнее слагаемое в выражении (13) слабо влияет на изменение амплитуд спектра выходных колебаний генератора и поэтому, в целях упрощения дальнейших выкладок, им можно пренебречь без ущерба для точности теоретического исследования.

Тогда

$$u = U_0 (\sin \omega_{cn} t \sin \varphi + \cos \omega_{cn} t \cos \varphi + \frac{E_{cn}}{2U_0} \cos \omega_{cn} t). \quad (14)$$

Выражения (11) и (12), можно разложить в ряд Фурье:

$$\sin \varphi = \frac{a_0}{2} + a_1 \cos(\Omega t - \gamma) + a_2 \cos 2(\Omega t - \gamma) + \dots \quad (15)$$

$$\cos \varphi = b_1 \sin(\Omega t - \gamma) + b_2 \sin 2(\Omega t - \gamma) + \dots \quad (16)$$

Коэффициенты рядов (15) (16) определяются известными формулами:

$$a_i = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{q + \cos(\Omega t - \gamma)}{1 + q \cos(\Omega t - \gamma)} \cos i(\Omega t - \gamma) d(\Omega t - \gamma), \quad (17)$$

$$b_i = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi \frac{\sqrt{1 - q^2} \sin(\Omega t - \gamma)}{1 + q \cos(\Omega t - \gamma)} \sin i(\Omega t - \gamma) d(\Omega t - \gamma). \quad (18)$$

Здесь  $i=0, 1, 2, 3, \dots$

После подстановки (15) и (16) в (14) и соответствующих преобразований получим соотношения, определяющие наибольшие амплитуды спектра выходных колебаний автономного генератора при действии на него помех:

$$u = U_0 \left\{ d_0 \sin \left( \omega_{cn} t - \arctg \frac{E_{cn}}{2a_0 U_0} \right) + d_1 \sin [ \omega_{cn} + \Omega t - \gamma ] + d_2 \sin [ \omega_{cn} + 2\Omega t - 2\gamma ] + \dots \right\}, \quad (19)$$

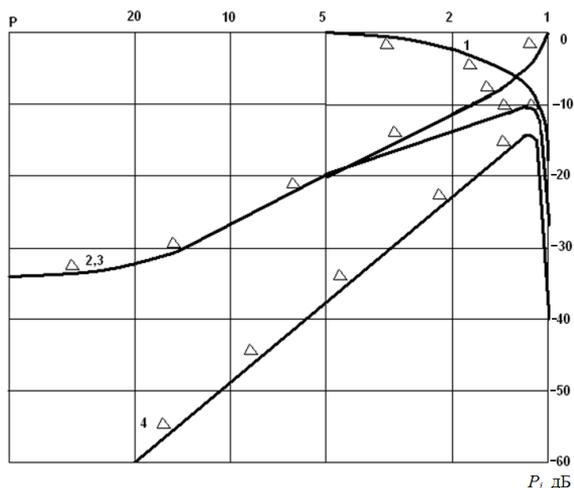
$$\text{где } d_0 = \sqrt{\left( \frac{1 - \sqrt{1 - q^2}}{q} \right)^2 + \left( \frac{E_{cn}}{a_0 U_0} \right)^2}; \quad \frac{d_0}{2} = \frac{1 - \sqrt{1 - q^2}}{q};$$

$$d_1 = \frac{a_1 + b_1}{2} = 1 - \left( \frac{1 - \sqrt{1 - q^2}}{q} \right)^2; \quad d_2 = \left[ 1 - \left( \frac{1 - \sqrt{1 - q^2}}{q} \right)^2 \right] \left( \frac{1 - \sqrt{1 - q^2}}{q} \right). \quad (20)$$

Величины  $d_0 U_0$ ,  $d_1 U_0$ ,  $d_2 U_0$  соответственно определяют амплитуды составляющих спектра на частоте помехи  $\omega_{cn}$ , частоте автогенератора  $\omega_r$ , комбинационной частоте  $2\omega_{cn} - \omega_r$ .

### Результаты и их обсуждение

На рисунке приведены результаты расчета по формулам (20) уровней интермодуляционных составляющих  $P_i$  в зависимости от параметра  $p$ , выполненные для генератора СВЧ на лавинно-пролетном диоде для случая  $\omega_r = \omega_0$ . Как следует из рисунка, расчетные кривые точно воспроизводят картину взаимодействия помехи и полезного сигнала в автогенераторе. В частности, вблизи полосы захвата ( $p \rightarrow 1$ ) амплитуды полезного сигнала и комбинационных составляющих приближаются к нулю, а  $U_{cn}$  стремится к уровню сигнала автогенерации, что хорошо подтверждается экспериментальными данными.



Зависимость уровней интермодуляционных составляющих  $P_i$  от параметра  $p$ : 1 — полезный сигнал; 2 — сигнал помехи; 3, 4 — составляющие третьего и пятого порядков соответственно;  $\Delta\Delta\Delta$  — результаты эксперимента

Генерируемая частота сигнала  $\omega_G$  по мере роста уровня помехового сигнала смещается ближе к частоте  $\omega_{cn}$ , амплитуда полезного сигнала  $\omega_G$  уменьшается. Как видно из графика восстановление рабочего уровня сигнала автогенерации происходит при значении  $p=5$  ( $q=0,2$ ).

С помощью полученных соотношений (19) и (20) оценим качественно восприимчивость автогенератора СВЧ с ВДОС. При включении ВДОС изменяется значение  $\omega_G$  (5) и, следовательно, меняются параметры  $q$  и  $\Omega$ . Так, при положительном знаке фазы  $\Psi$  коэффициента отражения и увеличении его модуля  $K$  параметры  $q$  и  $\Omega$  возрастают. Это обстоятельство приводит к уменьшению уровней интермодуляционных излучений, т.е. к уменьшению восприимчивости генератора к воздействию помехи. Поскольку фаза и модуль коэффициента отражения в петле ВДОС могут регулироваться, то в сложной помеховой обстановке можно вручную или автоматически изменять восприимчивость генератора к помехам, что невозможно выполнить в автономном генераторе без ВДОС.

новке можно вручную или автоматически изменять восприимчивость генератора к помехам, что невозможно выполнить в автономном генераторе без ВДОС.

### Заключение

Получены соотношения, связывающие параметры помехи с параметрами автоколебательной системы и цепью внешней дополнительной обратной связи. Для оценки способности автогенератора противодействовать влиянию электромагнитных помех введен параметр восприимчивости. Для примера расчета этого показателя принят уровень составляющей выходного спектра генератора на частоте  $\omega_{cn}$  по отношению к сигналу автогенерации равный  $P_{cn}=-30$  дБ. В связи с тем, что автогенераторы часто используются в передатчиках в режиме синхронизации целесообразно рассмотрение вопроса влияния помехи на синхронно возбуждаемый генератор.

## THE WAY OF SENSIBILITY DETERMINATION OF A SELF-CONTAINED SHF GENERATOR TO EXTERNAL INFLUENCE

A.O. ASHAMES, A.M. BRIGIDIN

### Abstract

The way to estimate sensibility of the SHF generators to electromagnetic interference, based on the sensibility parameter, was offered. Unwanted oscillation levels in the output of the self-contained SHF generator during the external interference into the oscillating system were analyzed.

### Литература

1. Апорович А.Ф. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. Минск, 2003.
2. Минаев М.И. Генераторы СВЧ с внешней дополнительной обратной связью. Минск, 1984.
3. Хохлов Р.В. // Докл. АН СССР 1954. Т. 97, № 3. С. 411–414.