



УДК 636.085:002.61

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФЛУКТУАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ У ВАРАКТОРНИХ ПОМНОЖУВАЧАХ ЧАСТОТИ

Мунтян В.О., д.т.н.,

Лобода О.І., інженер

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

Тел.: (0619) 42-11-74, e-mail: muntjan@yandex.ru

Тел.: (0619) 42-57-97, e-mail: aleks\_loboda@mail.ru

**Анотація** – представлено визначення флуктуаційних процесів у варакторних і транзисторних помножувачах частоти, які працюють в міліметровому діапазоні електромагнітного поля.

**Ключові слова** – діелектрична проникливість, варактор, електромагнітне поле НВЧ, помножувач, флуктуація.

*Постановка проблеми.* У зв'язку зі створенням високочутливих пристроїв по виміру змін діелектричної проникності біоматеріалів, що перебувають під впливом низькоенергетичного електромагнітного поля, виникає необхідність проведення досліджень по відшукуванню спектрів флуктуацій, амплітуди та частоти (фази) на виході реальної помножувально - підсилювального кола, які використовуються у системах перетворення частоти.

*Аналіз останніх досліджень.* З аналізу методів формування високостабільних коливань НВЧ діапазону, флуктуаційні процеси в помножувачів частоти варто розглядати у варакторах і транзисторах, що використовують для помноження частоти нелінійні ємності й провідності. Зазначені флуктуаційні процеси можуть бути обумовлені як шумами так і флуктуаціями параметрів самого помножувача, та флуктуаціями вхідного коливання. Рішенню зазначеного завдання присвячено досить багато робіт [1-11]. Проте, у цих роботах не проведений цілий ряд, на наш погляд, важливих досліджень:

- не досліджені флуктуаційні процеси у помножувачах, що працюють із відмиканням *p-n* переходу варактору;
- не проведено аналіз технічних флуктуацій у варакторних помножувачах частоти;
- не досліджено проходження широкополосних (у порівнянні зі смугами пропускання контурів помножувача) флуктуацій амплітуди й фази вхідного коливання через помножувач частоти;

- практично не досліджені особливості флуктуаційних процесів у транзисторних помножувачах частоти.

*Формулювання цілей статті.* Дослідження флуктуаційних процесів у варакторних помножувачах частоти з метою визначення таких параметрів, як стабільність та коефіцієнт помноження частоти підсилювачів та помножувачів які працюють в міліметровому діапазоні електромагнітного поля.

*Основна частина.* Для аналізу флуктуаційних процесів розглянемо схему одноконтурного помножувача частоти на варакторі, яка представлена на рис. 1 [2].

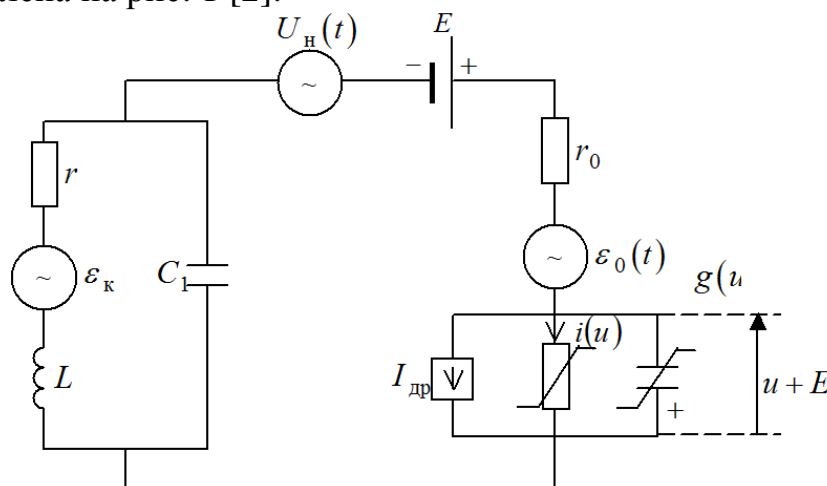


Рис. 1 Схема електрична принципова одноконтурного варакторного помножувача частоти.

В цій схемі (рис. 1)  $U_H(t) = U_0 \cos \omega_0 t$  – електро-рушійна сила (ЕРС) вхідного сигналу (накачки);  $u$  і  $E$  – змінна та постійна складова напруги на р-п переході варактору;  $I_{др}(t)$  – шумова компонента струму варактору, що визначається шумами дифузії - рекомбінації [8];  $\varepsilon_k(t)$  і  $\varepsilon_0(t)$  – ЕРС теплових шумів опору втрат контуру  $r$  і об'ємного опору варактору  $r_0$ ;  $i = i(u)$  і  $g = g(u)$  – активна компонента струму варактору і заряд, що накопичується варактором.

Врахуємо, що ємність контуру, ємність і провідність варактору випробують мали флуктуації, достатньо повільні в порівнянні з  $\cos \omega_0 t$ :

$$C_1(t) = C_1 [1 + \delta C_1(t)],$$

$$C(u, t) = C(u) [1 + \delta C_0(t)],$$

$$g(u, t) = g(u) [1 + \delta g(t)],$$

$$\langle \delta C_1^2 \rangle, \langle \delta C_0^2(t) \rangle, \langle \delta g^2(t) \rangle \ll 1.$$

не викликаючи якісних змін режиму роботи помножувача.

Введемо позначення:

$\omega_1 = [L(C_1 + C_0)]^{-1/2}$ ,  $Q_0 = \omega_1^{-1} [r(C_1 + C_0) + Lg_0]^{-1}$  – власна частота і добротність "холодного" коливального контуру. Де  $C_0 = [dg(u)/du]_{u=0}$ ,  $g_0 = [di(u)/du]_{u=0}$  – ємність і провідність варактору в робочій точці.

Нас цікавить режим множення частоти накачування  $\omega_0$  в  $N$  разів. Нехай відносне настроювання контуру стосовно частоти  $N \cdot \omega_0$  мале

$$\delta_{\text{Л}} = \frac{(N \omega_0)^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2} \ll N^{-1},$$

а добротність контуру, гранична частота і опір варактору великі:

$$Q_0 \gg N, \quad 1/C_0 r_0 \gg N \omega_0, \quad g_0^{-1} > Q_0 r_0.$$

Врахуємо, що всі гармоніки, які генеруються варактором, "закорочуються" контуром, крім гармоніки  $N \cdot \omega_0 \approx \omega_1$ . В цьому випадку в спектрі напруги  $u$  можливо обмежимося врахуванням тільки двох складових - з частотою накачування  $\omega_0$  і з частотою гармоніки  $N \cdot \omega_0$ :

$$u = B \cos \psi_1 + R \cos \psi_2; \quad \frac{du}{dt} = -\omega_0 B \sin \psi_1 - N \omega_0 R \sin \psi_2;$$

$$\psi_1 = \omega_0 t + \vartheta_1; \quad \psi_2 = N \omega_0 t + \vartheta_2. \quad (1)$$

Частота  $\omega_0$  не є резонансною для контуру. Тому для відшукування сталих значень амплітуди  $B_0$  і фази  $\vartheta_{10}$  першої складової в (1) можна зневажити усіма втратами, нелінійностями і шумами схеми. В результаті маємо:

$$B = U_0 [C_1 + C_0(1 - N^{-2})] (C_1 + C_0)^{-1}, \quad u_{10} = 0.$$

Тепер знаходимо скорочені рівняння для  $R$  і  $\vartheta_2$ :

$$\frac{dR}{dt} = -\frac{\omega_1 R}{2Q_0} - \frac{\omega_1^2 L}{2} [\omega_1 g_{s2} - i_{c2} - g_0 R] - \frac{\omega_1 r}{2} \times$$

$$\times [\omega_1 (g_{c2} - C_0 R) - i_{s2}] + \frac{\omega_0}{2} [\ell_1(t) + R b_1(t)];$$

$$\frac{d\vartheta_2}{dt} = -\frac{\omega_1 \delta_{\text{Л}}}{2} - \frac{\omega_1^2}{2R} [\omega_1 (g_{c2} - C_0 R) - i_{s2}] +$$

$$+ \frac{\omega_1 r}{2R} [\omega_1 g_{s2} + i_{c2} - g_0 R] - \frac{\omega_1}{2R} [\ell_2(t) + R b_2(t)]. \quad (2)$$

В цьому виразі  $g_{s2, c2}$  та  $i_{s2, c2}$  визначаються як Фур'є - амплітуди синусної і косинусної складової з фазою  $\psi_2 = N \omega_0 t + \vartheta_2$  заряду і струму варактору, а  $l_1(t)$  і  $l_{11}(t)$ ,  $b_1(t)$  і  $b_{11}(t)$  – випадкові процеси, обу-

мовлені існуванням в схемі помножувача природних шумів і технічних флуктуацій параметрів. Ці процеси визначаються так як і у випадку автоколивальних систем [9].

Перш, ніж урахувати вплив шумів на роботу помножувача, знайдемо сталі значення амплітуди й фази коливання  $R \cos \psi_2$ . Для цього в (2) врахуємо  $dR/dt$ ,  $d\vartheta_2/dt$  і флуктуаційні впливи рівними нулю. Отримана при цьому система трудна для аналізу, так як функція  $g_{S2,C2}$  та  $i_{S2,C2}$ , що визначаються видом вольт - кулоновської  $g(u)$ , вольтамперної  $i(u)$  характеристик варактору, що залежать від  $B_0$ ,  $R$ , та  $\vartheta_2$ , як правило, не визначаються через елементарні функції.

В реальних помножувачах виконується нерівність  $R \ll B_0$ . Враховуючі цю обставину, розкладемо  $g(u)$  і  $i(u)$  по ступеням  $(R \cos \psi_2)$  і обмежимося урахуванням тільки перших двох членів розкладення:

$$g(B \cos \psi_1 + R \cos \psi_2) \approx g(B \cos \psi_1) + C(B \cos \psi_1) R \cos \psi_2; \quad (3)$$

$$i(B \cos \psi_1 + R \cos \psi_2) \approx i(B \cos \psi_1) + g(B \cos \psi_1) R \cos \psi_2,$$

де  $C(u) = dg(u)/du$ ,  $g(u) = di(u)/du$  – ємність і провідність варактору.

Для проведення подальшого аналізу виділимо із  $g(u)$  та  $i(u)$  компоненти, що представляють коливання з частотами  $\omega_0$  та  $N \cdot \omega_0$ :

$$g(\dots) = g_1 \cos \psi_1 + g_N \cos[\psi_2 + N \vartheta_1 - \vartheta_2] + C_{CP} R \cos \psi_2 + \dots; \quad (4)$$

$$i(\dots) = i_1 \cos \psi_1 + i_N \cos[\psi_2 + N \vartheta_1 - \vartheta_2] + g_{CP} R \cos \psi_2 + \dots$$

Тут  $C_{CP} = C_{CP}(B) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} C(B \cos \psi) d\psi$  – середня ємність ва-

рактору,  $g_n = g_n(B) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} g(B \cos \psi) \cos n\psi d\psi$  – амплітуда  $n$ -ої гар-

моніки в спектрі  $g(u)$  ( $n=N$ ). Величини  $g_{CP} = g_{CP}(B)$  і  $i_N = i_N(B)$  визначаються аналогічно.

У виразі (4) для спрощення подальшого аналізу не враховано існування в спектрах  $C(u)$  і  $g(u)$  члена, пропорційного  $\cos 2N\omega_0 t$ . Врахування цього члена, тобто зміна  $C(u)$  та  $g(u)$  з частотою  $2N\omega_0$ , приведе до виявлення параметричних ефектів. Однак, оскільки розглянутий помножувач є пасивною системою, (тобто не містить активних елементів), зазначені параметричні ефекти не повинні істотно вплинути на його роботу.

Враховуючі (3) і (4), знаходимо:

$$R_0 = \sqrt{\frac{R_{0C}^2 + R_{0g}^2}{1 + \eta^2}};$$

$$\sin \vartheta_{20} = \frac{k - \eta}{\sqrt{(1 + k^2)(1 + \eta^2)}};$$

$$\cos \vartheta_{20} = \frac{k\eta + 1}{\sqrt{(1 + k^2)(1 + \eta^2)}},$$

де  $R_{0C} = Z_{0e} \omega_1 g_N$  та  $R_{0g} = Z_{0e} i_N$  – компоненти амплітуди  $R_0$ , обумовлені нелінійностями ємності і провідності варактору, відповідно;

$k = R_{0C} / R_{0g}$  – коефіцієнт, що вказує, за рахунок якої нелінійності варактору відбувається множення частоти;

$\eta = Q(\delta_L + \delta_H)$  – приведена розлаштування (в реальних помножувачах  $0 \leq |\eta| \approx 1$ );

$\delta_H = (C_{CP} - C_0) / (C_1 + C_{CP})$  – нелінійне розлаштування контуру;

$t_{0C} = \omega_1 L Q$ ;  $Q = \omega_1^{-1} [r(C_1 + C_{CP}) + L g_{CP}]^{-1}$  – резонансний опір і добротність "гарячого" контуру.

При  $k \gg 1$  множення частоти відбувається, в основному, на нелінійної ємності варактору. Якщо  $k \ll 1$ , то отримуємо помножувач на нелінійної провідності, а при  $k \approx 1$  в процесі множення частоти приблизно так само беруть участь і нелінійна провідність, і нелінійна ємність варактору.

Аналізуючи звичайним методами систему (2), не виклика складнощів показати, що значення  $R_0$  та  $\nu_{20}$  скрізь стійкі.

Через наявність шумів і флуктуацій параметрів в схемі помножувача амплітуда і фаза вихідного коливання випробують повільні (в порівнянні з  $\cos \omega_1 t$ ) флуктуації поблизу своїх сталих значень:  $R = R(t) = R_0 [1 + \varepsilon(t)]$ ;  $\vartheta_2 = \vartheta_2(t) = \vartheta_{20} + \varphi(t)$ .

Так як шуми мали, то і флуктуації  $\varepsilon(t)$  та  $\varphi(t)$  повинні бути малими (в силу стійкості стаціонарного стану):  $\langle \varepsilon^2(t) \rangle \ll 1$ ;  $\langle \varphi(t)^2 \rangle \ll 1$ .

Лінеаризує систему (2) поблизу  $(R_0, \nu_{20})$ , отримуємо такі остаточні рівняння для флуктуацій амплітуди і фази на виході варакторно-го помножувача частоти при монохроматичному накачуванні:

$$\begin{aligned} \left(\frac{1}{N} \frac{d}{dt} + 1\right) \varepsilon - \eta \varphi &= \frac{Q}{R_0} \varepsilon_1(t) + Qb_1(t); \\ \eta \varepsilon + \left(\frac{1}{N} \frac{d}{dt} + 1\right) \varphi &= -\frac{\varphi}{R_0} \ell_1(t) - Qb_1(t). \end{aligned} \tag{5}$$

Тут  $2\Pi = \frac{\omega_1}{Q}$  – полоса пропускання "гарячого" контуру;  $\ell_1(t)$  і  $\ell_2(t)$  – випадкові статистичні незалежні процеси.

Форма спектрів при різних значеннях розлад показана на рис. 2. Розлаштування контуру (рис. 2) амплітудні та фазові спектральні частоти флуктуацій можна зменшити майже в 2 рази.

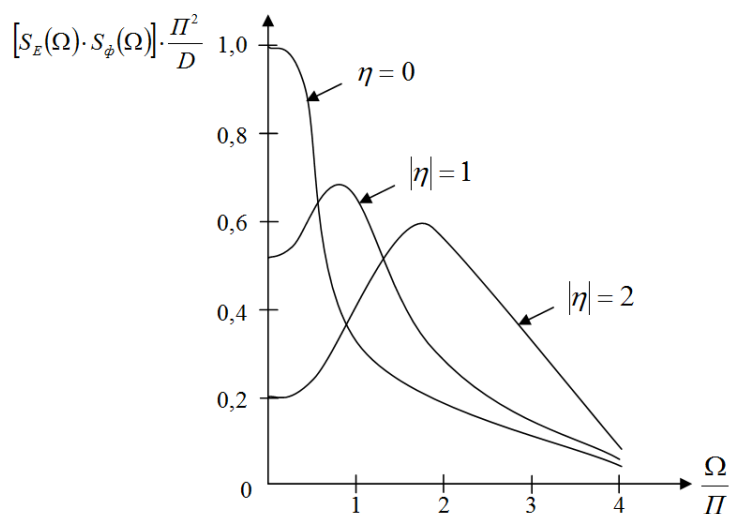


Рис. 2. Спектри амплітудних та фазових флуктуацій на виході помножувача частоти при різних величинах розладу  $\eta$ .

Технічні флуктуації в помножувачі частоти також описуються рівнянням (1), але при цьому  $\ell_1$  та  $\ell_2$  дорівнюють 0.

Їх спектральні щільності рівні відповідно:

$$\begin{aligned} S_1(\Omega) = S_2(\Omega) &\equiv 2S_{III}(\omega_1), \\ S_{III}(\omega_1) &= \frac{\ell}{2\pi} \left\{ 2\mathfrak{G}_1 \left[ r + \left( \frac{C_0}{C_1 + C_0} \right)^2 r_0 \right] + \omega_1^2 L^2 [i_{CP} + 2I_0] \right\}. \end{aligned} \tag{6}$$

Спектральна щільність напруги шумів схеми, перерахованих на варактор, на частоті  $\omega_1 \approx N \cdot \omega_0$ ;  $i_{CP}$  та  $I_0$  – середній струм і струм насичення варактору;

$$\begin{aligned} -Qb_2(t) &= -K_1 Q \delta C_1 - K_0 Q \delta C_0 - \frac{K - \eta}{1 + K^2} \delta g; \\ Qb_1(t) &= \frac{K_1}{\Pi} \frac{d\delta C_1}{dt} + \frac{K(K - \eta)}{1 + K^2} \delta C_0 - \frac{K_0}{\Pi} \frac{d\delta C_0}{dt} + \left[ \frac{1 + K\eta}{1 + K^2} - k g \right] \delta g - \end{aligned} \tag{7}$$

випадкові сили, обумовлені наявністю в схемі помножувача флюктууючих параметрів;

$$K_1 = \frac{C_1}{C_1 + C_{CP}}; \quad K_0 = 1 - K; \quad K_g = Z_{0\ell} g_{CP} - \text{коефіцієнт включення}$$

ємності контуру, ємності і провідності варактору у схемі помножувача. Звичайно  $K_1, K_0, K_g \leq 1$ .

Рішення системи (5) можна знайти спектральні щільності відносних флюктуацій амплітуди  $S_\varepsilon(\Omega)$  фази  $S_\varphi(\Omega)$ , парну і непарну компоненти їх сумісної спектральної щільності  $S_{\varepsilon\varphi}^{0,1}(\Omega)$ , а також форму п'єдесталу в спектрі вихідного коливання. Помітимо, що спектр цього коливання має вигляд

$$W(\omega_1) = \frac{R_0^2}{2} \left[ \delta(\omega - N\omega_0) + W_I(\omega - N\omega_0) \right], \quad (8)$$

тобто крім п'єдесталу він має монохроматичну лінію потужності  $R_0^2/2$ .

Таким чином, з (5) - (6) можна отримати всі важливі для практики спектрально - кореляційні характеристики коливань на виході помножувача у випадку подачі на вхід його монохроматичного сигналу.

#### Висновки.

1. У багатокаскадних помножувачах частоти, для зменшення фазових флюктуацій слід в перших каскадах реалізувати максимальний коефіцієнт множення частоти, а необхідний ступінь придушення побічних гармонік вхідного сигналу (60...70 дБ) забезпечити фільтрами зосередженої селекції.
2. З аналізу структурної схеми виходить, що наймогутніший внесок в природні флюктуації фази дає помножувач першого каскаду.
3. В першому каскаді потужність корисного сигналу складає 3 мВт.
4. При проходженні через усі подальші помножуючі елементи потужність флюктуацій збільшується в  $N^2 = 3,24 \cdot 10^6$  разів.
5. Нестабільності вихідної частоти помножувача за 1 мс дорівнює  $4 \cdot 10^{-10}$ , а за 1 с -  $3 \cdot 10^{-13}$ .

#### Література

1. Малахов Л.Н. Флуктуации в автоколебательных системах / Л.Н. Малахов. - М.: Сов. радио, 1977. - 608 с.
2. Аппаратура для частотных и временных измерений / Под ред. А.П. Горшкова. - М.: Сов. радио, 1971. - 260 с.
3. Бруевич А.Н. Умножение частоты / А.Н. Бруевич. - М.: Сов. радио, 1970. - 283 с.
4. Parker O. Varactor multiplier arrays give increased frequency multipliers/ O. Parker, A.I. Grayzel // Proc. IEEE. - 1967. - V. 55, № 3. - P. 473.

5. *Prabhu V.* Noise performance of abrupt-junction varactor frequency multipliers/ *V. Prabhu* // Proc. IEEE. - 1966. - V. 54, № 2. - P. 285.
6. *Гомзин В.М.* Исследования прохождения случайной помехи и сигнала через многокаскадный умножитель частоты/ *В.М. Гомзин, А.А. Елисейев, В.И. Метельский, С.Д. Соловьев* // Радиотехника и электроника. - 1968. - Т. 13, №6. - стр.1016.
7. *Андерсон.* Варакторные генераторы гармоник: параметры и шумовые характеристики/ *Андерсон, Хискок, Шенпард, Райт* // Зарубежная радиоэлектроника. - 1967. - № 7. - 60 с.
8. *А. Ван-дер-Зил.* Шумы в полупроводниках / *А. Ван-дер-Зил* // Шумы в электронных приборах. - М.: Энергия, 1964. - 280 с.
9. *Малахов А.Н.* О некоторых методах и результатах измерения флуктуаций амплитуды и частоты колебаний генераторов / *А.Н. Малахов, В.Н. Никонов, Т.Д. Разина* // Радиофизика. - 1961. - № 4. - С. 1052 - 1054.
10. *Мунтян В.О.* Природні флуктуації в помножувачах частоти на варакторі / *В.О. Мунтян, С.В. Адамова* // Праці Таврійської державної агротехнічної академії. – Мелітополь: ТДАТА. – 2005. – Вип. 32. – С. 100-104.
11. *Малахов А.Н.* Ширина спектральной линии выходного колебания систем стабилизации и преобразования частоты / *А.Н. Малахов, Л.Г. Шепелевич*// Радиотехника и электроника. - 1970. - Т. 15, №2. - С. 328.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ФЛУКТУАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ВАРАКТОРНЫХ УМНОЖИТЕЛЯХ ЧАСТОТЫ**

*Мунтян В.А., Лобода А.И.*

**Аннотация** - представлено определение флуктуационных процессов в варакторных и транзисторных умножителях частоты, работающие в миллиметровом диапазоне электромагнитного поля.

## **STUDY FLUCTUATION PROCESSES IN THE VARACTOR FREQUENCY MULTIPLIERS**

*V. Myntian, A. Loboda*

### *Summary*

**Presented by the definition of the fluctuation processes in the transistor and varactor frequency multiplier operating in the millimeter range of electromagnetic field.**