

УДК 621.3.08:537.2

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ГЕНЕРАТОРА ЛПД

Куценко Ю.М., к.т.н.

Таврійський державний агротехнологічний університет

Тел. (0619) 42-31-59

E-mail: kucenkoua@mail.ru

Анотація – обґрунтовано параметри генератора міліметрового діапазону в системі вимірювання діелектричної проникності газового середовища рослин, представлено аналіз флуктуаційних характеристик.

Ключові слова – генератор мм діапазону на ЛПД, електронна перебудова частоти, флуктуаційні характеристики, діелектрична проникність, газове середовище рослин

Постановка проблеми. Одним з основних вузлів електронної системи вимірювання діелектричної проникності газового середовища рослин є високостабільне за частотою КВЧ- джерело.

КВЧ – джерело повинне забезпечити електронну перебудову частоти в широкому діапазоні частот і вихідну потужність, достатню для компенсації втрат в хвилеводному тракті.

Однією із важливих позицій в процесі вимірювань є флуктуаційні характеристики генератора мм діапазону на лавинно-прольотному діоді (ЛПД).

Аналіз останніх досліджень. До одного з перспективних джерел 3-мм діапазону хвиль можуть бути віднесені ГЛПД з варакторною перебудовою частоти, керовані напругою.

Дослідженню флуктуаційних характеристик в ГЛПД присвячено значне число робіт [1,2,3]. Аналіз цих робіт показує, що основними джерелами нестабільності амплітуди і частоти коливань вихідного сигналу є природні і технічні флуктуації. До природних флуктуацій відноситься шум лавини (дробовий шум), обумовлений флуктуаціями струму в шарі множення за рахунок лавинного процесу, а також тепловий шум, що генерується в дрейфовій області і на омичних опорах діода і контуру. До технічних – фліккер-шум, обумовлений неоднорідністю пробою за площею $p-n$ переходу і умов на його межі, а також модуляційний шум, обумовлений флуктуаціями параметрів ЛПД, струму змішування і резонансної системи.

Проте результати цих робіт не можуть бути використані для систем вимірювання ДП дихання рослин, у зв'язку з чим виникає необхідність проведення додаткових наукових досліджень.

Основна частина. Розглянемо конструкцію ГЛПД з послідовним включенням варактора, що є хвилеводом перетином $2,4 \times 1,2 \text{ мм}^2$ з двома діодотримувачами 1 різних діаметрів, розташованими на одній осі широкої стінки хвилеводу (рис. 1).

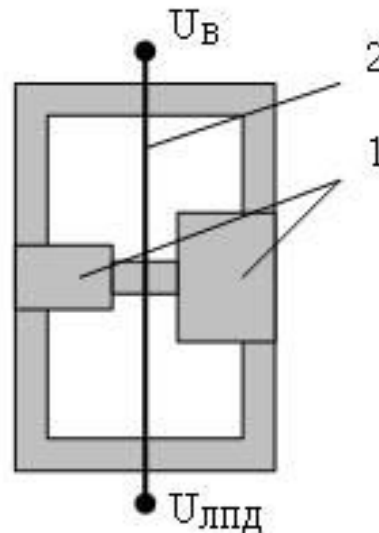


Рис.1. Конструкція генератора, що електрично перебудовується.

На одному утримувачі знаходиться варактор типу АА631, на іншому – ЛПД. Живлення на діоди подається за допомогою струмопровідних мікросмугових ліній 2. Щоб смугові лінії не замикалися одна на одну, вони покриті полімідною плівкою з діелектричною проникністю $\epsilon=4$. У ланцюг живлення включені фільтри нижніх частот. Варактор має коефіцієнт перекриття 2,2 і ємність при напрузі $U=6,0 \text{ В}$, рівну $0,1 \text{ нФ}$. У мм діапазоні довжин хвиль ємність корпусу варактора $C_{KB}=0,1 \text{ нФ}$, індуктивність корпусу $L_{KB}=0,1 \text{ нГн}$, опір втрат $R_s = 10 \text{ Ом}$. Гранична напруга для вказаного типу варактора – 40 В .

З урахуванням технологічних чинників змінна ємність варактора обчислюється за формулою [4]

$$C(U) = \sqrt{\frac{0,25839}{10,4165 + U}} \text{ нФ}, \quad (1)$$

Для аналізу частотної характеристики ГЛПД з послідовним включенням варактора необхідно отримати рівняння, що пов'язує частоту з геометричними розмірами коливальної системи, технологічними і електричними параметрами діодів.

Вказане рівняння можна отримати, прирівнявши до нуля загальний реактивний опір еквівалентної схеми (рис. 2). На еквівалентній схемі L_{KB} , C_{KB} , R_s – індуктивність і ємність корпусу варактора, R_s –

опір втрат, $C(U)$ – змінна ємність, що створюється зміною напруги на варакторі, X_{LB} , X_{BB} , X_{LD} , X_{dd} – еквівалентні параметри стрижньових діодотримачів, на яких розташовуються варактор і ЛПД відповідно Z_b , X_d – реактивні опори смугових ліній у ланцюзі живлення варактора і ЛПД, R_d , X_d – активний і результаивний опір ЛПД, який визначається експериментально залежно від частоти, C_{kd} – ємність корпусу ЛПД.

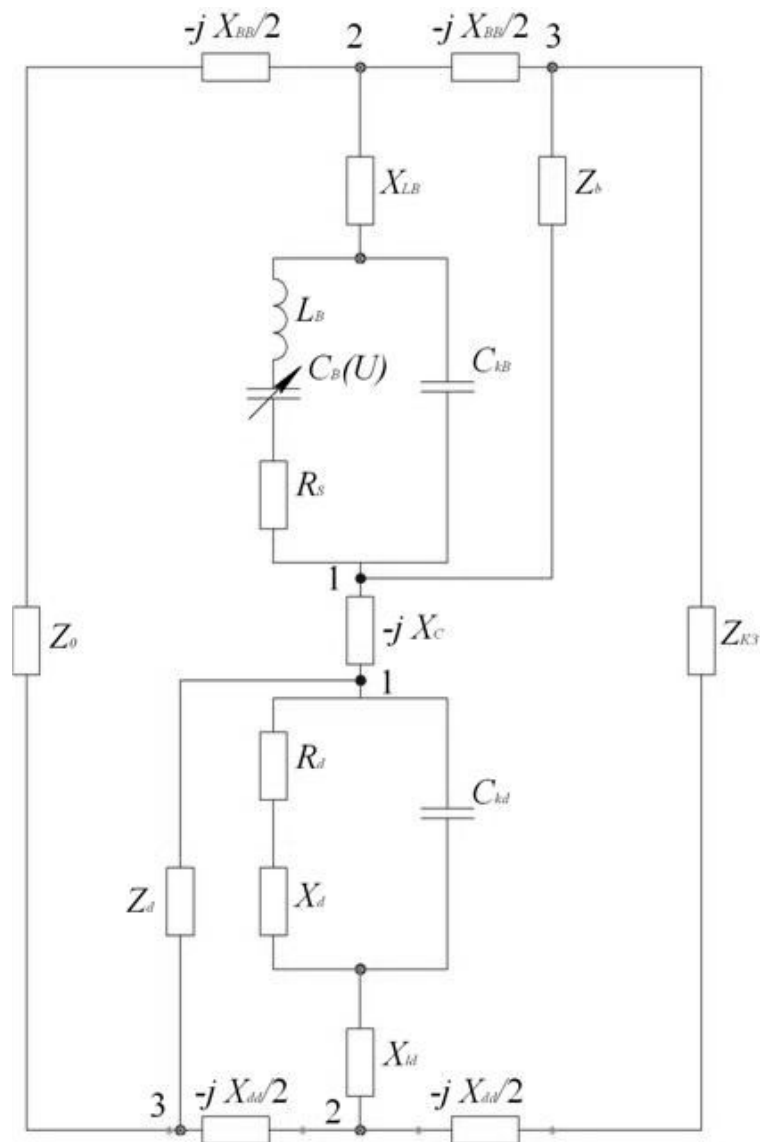


Рис.2. Еквівалентна схема ГЛПД з електронною перебудовою частоти.

Зліва на еквівалентній схемі генератор навантажений на хвильовий опір хвильоводу, справа – короткозамкнутим відрізком з опором $Z_o \tan \beta l_k$, де l_k – довжина короткозамкненого відрізка (відстань від стінки короткозамикача до центру діодоутримувача) $\beta = 2\pi / \lambda_0$ (λ_0 – довжина хвилі в хвильоводі).

Варактор і ЛПД по високій частоті зв'язані ємністю, яка утворюється в результаті перекриття струмопровідних смужок. Вона може бути визначена як ємність плоскопаралельного конденсатора

$$C_s = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{lW}{d}, \quad (2)$$

де d – відстань між пластинами;
 l – довжина ділянок, що перекриваються;
 W – найменша ширина смужок.

Еквівалентна схема (рис. 1) за допомогою перетворення трикутника (точки 1, 2, 3) в зірку може бути зведена спочатку в схему на рис. 2, потім до схеми на рис. 3.

Параметри узагальненої еквівалентної схеми на рис. 3 мають наступні позначення

$$Z_0 = Z_0 - j \frac{X_{\theta\theta}}{2}, \quad (3)$$

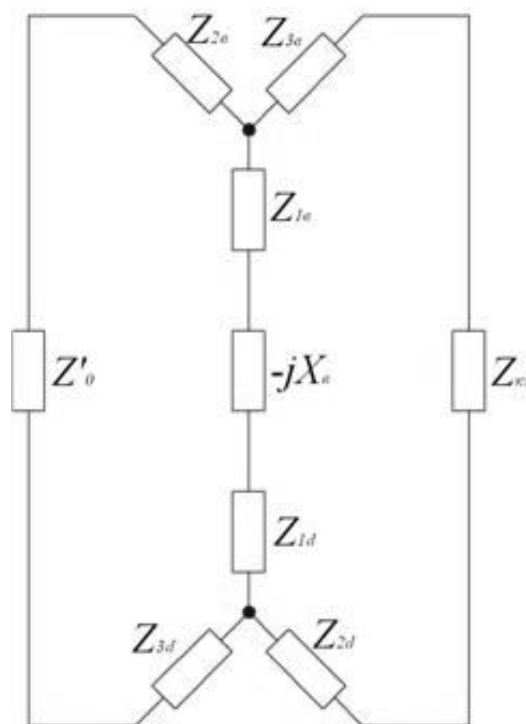


Рис.3. Узагальнена схема ГЛПД з електронною перебудовою частоти.

$$Z_{кз} = j \left(Z_0 \tan \beta l - \frac{X_{\theta\theta}}{2} \right), \quad (4)$$

$$Z_{1\theta} = \frac{Z_{\theta}}{V_{\theta}} \left\{ R_{\theta} X_{z\theta} + j \left[R_{\theta}^2 + Z_{x\theta} (X_{\theta} + X_{L\theta}) \right] \right\}, \quad (5)$$

$$\text{де } X_{z\epsilon} = Z_{\epsilon} - \frac{X_{\epsilon\epsilon}}{2};$$

$$Z_{x\epsilon} = X_{\epsilon} + X_{L\epsilon} - \frac{X_{\epsilon\epsilon}}{2}, \quad (6)$$

$$R_{\epsilon} = R_S / S_H, \quad (7)$$

$$X_{\epsilon} = - \left[R_S^2 \omega C_L + \omega L_{\epsilon} - \frac{1}{\omega C(U)} \right] \left[\omega^2 C_L L - 1 - \frac{C_L}{C(U)} \right] / S_H, \quad (8)$$

$$S_H = (\omega C_L R_S)^2 + \left[\omega^2 C_k L_{\epsilon} - \left(1 + \frac{C_k}{C(U)} \right) \right]^2, \quad (9)$$

$$V_{\epsilon} = R_{\epsilon}^2 + Z_{x\epsilon}^2, \quad (10)$$

$$Z_{2\epsilon} = \frac{Z_{1\epsilon} X_{\epsilon\epsilon}}{2Z_{\epsilon}}; \quad Z_{3\epsilon} = - \frac{Z_{\epsilon} X_{\epsilon\epsilon}}{2V_{\epsilon}} (R_{\epsilon} - jZ_{x\epsilon}), \quad (11)$$

$$Z_{\epsilon} = Z_{0\epsilon} \tan kl_S, \quad (12)$$

Хвильевий опір $Z_{0\epsilon}$ струмопровідної смугової лінії залежить від висоти лінії h (відстань від пластини до широкої стінки хвильоводу), її ширини W і визначається відповідним виразом

$$Z_{0\epsilon} = 120\pi \left[\frac{W}{h} + 1,393 + 0,997 \ln \left(\frac{W}{h} + 1,444 \right) \right], \quad (13)$$

Вираз для обчислення параметрів Z_{1d} , Z_{3d} отримуємо заміною індексу ϵ на d в (1-2), наприклад,

$$Z_{1d} = \frac{Z_d}{V_d} \{ R_d X_{zd} + j [R_d^2 + Z_{xd} (X_d + X_{Ld})] \}, \quad (14)$$

$$X_{zd} = Z_d - \frac{X_{dd}}{2} Z_{xd} = X_d + X_{Ld} + Z_d - \frac{X_{dd}}{2}, \quad (15)$$

де R_d, X_d – параметри еквівалентної схеми на рис. 3.

У явному вигляді загальний реактивний опір еквівалентної схеми має громіздкий вигляд, тому не наводиться. Для розрахунків, після нескладних перетворень схеми на рис. 3, були отримані рівняння для еквівалентної схеми на рис. 4.

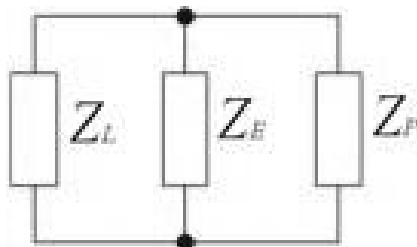


Рис.4. Еквівалентна схема для частоти генератора на ЛПД.

$$Z_L = Z_0 + R_{2\epsilon} + R_{3d} + j \left(X_{2\epsilon} + X_{3d} - \frac{X_{dd}}{2} \right), \quad (16)$$

$$Z_{\Sigma} = R_{1e} + R_{1d} + j \left(X_{1e} + X_{1d} - \frac{1}{\omega C_s} \right), \quad (17)$$

$$Z_p = R_{3e} + R_{2d} + j \left(X_{3e} + X_{2d} - \frac{X_{ee}}{2} \right), \quad (18)$$

Розраховуючи опір стрижньових діодотримувачів, використовували співвідношення для стрижня круглого поперечного перетину, встановленого паралельно вектору електричного поля в центрі поперечного перетину хвилеводу, в якому розповсюджується H_{10} -хвиля [5].

$$X_{ee(dd)} = Z_0 \frac{d}{\lambda_e} \frac{\left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2}{1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\pi d}{\lambda} \right)^2 \left(S_2 + \frac{3}{4} \right)}, \quad (19)$$

$$X_{Le} = \frac{X_{ee}}{2} + \frac{aZ_0}{2\lambda_e} \left[S_0 - \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^2 - \frac{5}{8} \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 - 2 \left(\frac{\pi d}{2\lambda} \right)^4 \left(S_0 - 2S_0 \frac{\lambda^2}{\lambda_e^2} \right) \right], \quad (20)$$

$$S_2 = \ln \frac{4a}{\pi d} - \frac{5}{2} + \frac{11}{3} \left(\frac{\lambda}{2a} \right)^2 \sum_{n=35}^{\infty} \left[\sqrt{h^2 - \left(\frac{2a}{\lambda} \right)^2} - n + \frac{2}{n} \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right], \quad (21)$$

де a – ширина хвилеводу;
 d – діаметр стрижня.

Вказані співвідношення справедливі для стрижня, що повністю замикає хвилевід по вузькій стінці. Утримувачі не мають конкретної висоти, тому $X_{ee(dd)}$, X_{Le} визначалися з урахуванням прямої пропорційності опору висоті стрижня.

Дослідження показали, що таке наближення при розрахунку реактивних опорів стрижньових утримувачів не вносить істотних розбіжностей між теоретичними і експериментальними результатами.

Аналіз еквівалентної схеми (рис. 3) показує, що реактивний опір може дорівнювати нулю тільки в другій і третій гілках. Рівність нулю Z_p обумовлена резонансом в області, обмеженою короткозамикаючою стінкою і стрижньовими діодотримувачами, а Z_{Σ} – резонансом в реактивному ланцюзі, створеному стрижнями варактора і ЛПД, безпосередньо самими діодами, а також ємністю зв'язку.

На рис. 5 наведені розрахункові залежності частоти генератора від напруги живлення на варакторі для різних значень діаметра утримувача варактора і ширини струмопровідної смужки.

З результатів графічного матеріалу видно, що із збільшенням діаметра утримувача варактора можна змістити межу діапазону перебудови частоти генератора вгору по діапазону, зменшити величину напруги на варакторі практично з постійною крутизною перебудови частоти генератора.

Аналіз флуктуаційних характеристик ГЛПД показує, що є необхідність проведення досліджень щодо мінімізації частотних (фазових) флуктуаційних процесів генератора на ЛПД.

Вплив частотних флуктуацій ГЛПД на точність вимірювання ДП дихання рослин визначимо за критерієм мінімуму дисперсії частоти коливань на виході ГЛПД, яка визначається виразом [1]

$$\sigma^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\infty} S_{\varphi}(\Omega) \frac{1}{1 + (0,5\Omega\tau)^2} d\Omega, \quad (22)$$

де $S_{\varphi}(\Omega)$ – енергетичний спектр частотних флуктуацій на виході ГЛПД;

τ – інтервал вимірювання

Енергетичний спектр частотних флуктуацій на виході системи вимірювання ДП дихання рослин може бути представлений виразом [6]

$$S_{\varphi}(\Omega) = S_{\varphi r}(\Omega) \left| \frac{1}{1 + W(j\Omega)} \right|^2, \quad (23)$$

де $S_{\varphi r}(\Omega)$ – енергетичний спектр флуктуацій частоти ГЛПД;

$W(j\Omega)$ – передавальна функція розімкненої системи ЧАП.

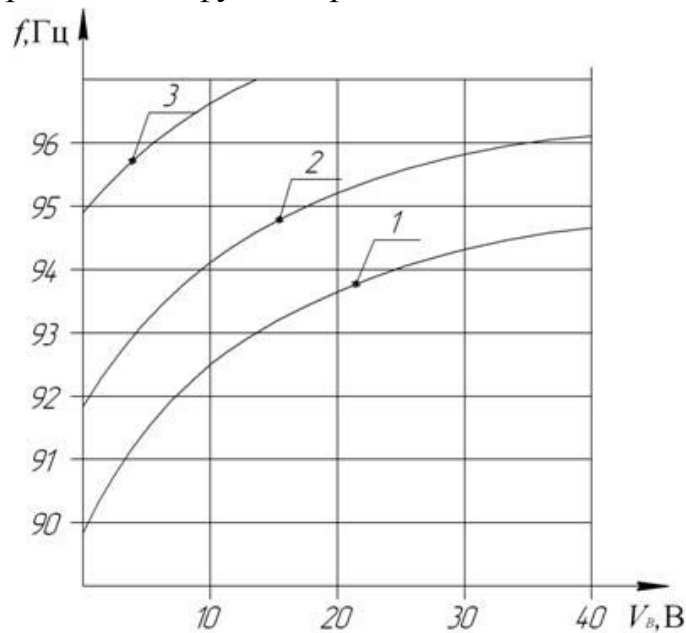


Рис. 5. Залежність частоти генератора від напруги живлення

1 – діаметр утримувача варактора $d_B = 1$ мм, ширина струмопровідної смужки $W = 2,1$ мм; 2 – $d_B = 1,5$ мм, $W = 2,1$ мм; 3 – $d_B = 2,2$ мм, $W = 2,1$ мм.

Оцінка шумів системи, обумовлених флуктуаціями параметрів ПД (диференціальна провідність і ємність діода), проводиться за умови, що флуктуації параметрів носять флікерний характер.

Крім того передбачається, що флуктуації параметрів малі в порівнянні з середніми значеннями провідності діода.

Зроблені припущення дозволяють використовувати метод, який полягає в тому, що нелінійний активний елемент представляється у вигляді двополюсника з активною і реактивною складовими провідності

$$Y_d(j\omega) = G_d + jB_d(\omega) = |Y_d(j\omega)|e^{j\varphi_{d1}}, \quad (24)$$

де φ_{d1} – зрушення фаз між першою гармонікою струму і напругою на діоді.

Відхилення частоти автоколивань $\Delta\omega$ від початкового значення ω_0 при зміні активної і реактивної провідності можна описати через фазовий кут середньої провідності діода

$$\varphi_{d1} = -\arctan \frac{Bd_1(\omega)}{Gd_1(\omega)}, \quad (25)$$

Флуктуації фазового кута φ_{d1} в лінійному наближенні дорівнюють

$$\Delta\varphi_{d1} \approx G_1 \frac{\partial\varphi_{d1}}{\partial G_1} \delta G_1 + B_1 \frac{\partial\varphi_{d1}}{\partial B_1} \delta B_1, \quad (26)$$

де $\delta G_1 = \Delta G_1 / G_1$; $\delta B_1 = \Delta B_1 / B_1$.

Враховуючи, що крутизна фазочастотної характеристики коливальної системи ($-\omega \partial\varphi_k / \partial\omega$) поблизу резонансної частоти дорівнює $2Q_H$, отримаємо вираз для спектральної щільності відносних флуктуації частоти коливань, що генеруються

$$S_\varphi(\Omega) = \left(\frac{\omega_0}{2Q_H} \right)^2 \left[A_1^2 S_{\delta G_1}(\Omega) + D_1^2 S_{\delta B_1}(\Omega) + 2A_1 D_1 \cdot P_{G_1 B_1}(\Omega) - S_{\delta G_1}(\Omega) \cdot S_{\delta B_1}(\Omega) \right], \quad (27)$$

де $A_1 = G_1 \frac{\partial\varphi_{d1}}{\partial G_1}$, $D_1 = B_1 \frac{\partial\varphi_{d1}}{\partial B_1}$, $S_{\delta G_1}(\Omega)$, $S_{\delta B_1}(\Omega)$ – спектральні щільності відносних флуктуації провідності і ємності ЛПД;

$P_{\delta G_1 B_1}(\Omega)$ – коефіцієнт взаємної кореляції між флуктуаціями G_1 і B_1 .

Оскільки флуктуації провідності і ємності ЛПД викликані однією і тією ж причиною $\delta G_1 \approx \delta B_1$, то $S_{\delta G_1}(\Omega) \approx S_{\delta B_1}(\Omega)$ і $P_{\delta G_1 B_1}(\Omega)$, то тоді (27) з урахуванням того, що $G_v(\Omega)$ носить фліккерний характер, набуває вигляду

$$S_{\varphi_r}(\Omega) = \omega_0^2 A_v(\Omega) \cdot \Omega^{-\alpha}, \quad (28)$$

де $A_v(\Omega) = [(A_1 + D_1) / 2Q_H]^2$, (29)

Чисельну оцінку коефіцієнтів A_1 і D_1 , обумовлених флуктуаціями параметрів ЛПД, знайдемо, скориставшись еквівалентною схемою ГЛПД (рис. 6).

У еквівалентній схемі ємність корпусу діода включена в ємність еквівалентного контура генератора С.

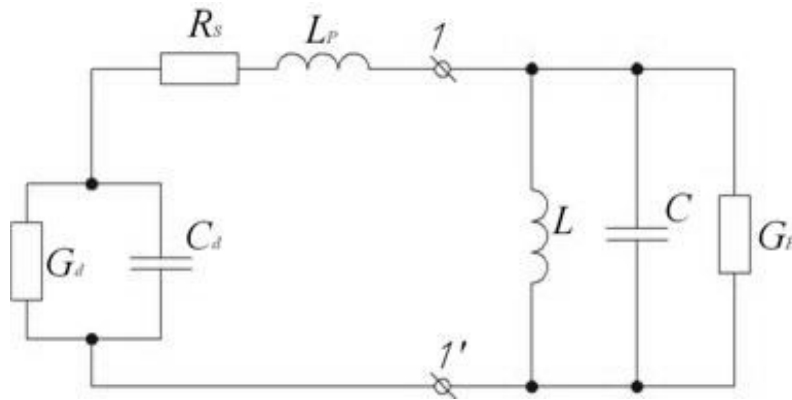


Рис. 6. Спрощена еквівалентна схема ГЛПД.

Як видно з еквівалентної схеми, провідність ЛПД з урахуванням реактивних параметрів характеризується комплексною величиною, що є функцією частоти

$$Y_d(j\omega) = G_d(\omega) + jB_d(\omega), \quad (30)$$

Виражаючи через параметри еквівалентної схеми, рівняння (30) запишемо у вигляді

$$|Y_d(j\omega)| = \frac{-G_d \left(1 - R_s G_d - R_s C^2 \omega^2 / C_d\right) + j\omega C \left(1 - C_d^2 \frac{L_p}{C} - L_p C \omega^2\right)}{\left(\frac{C\omega}{G_d}\right)^2 \left(-R_s G_d + \frac{L_p C_d^2}{C}\right) + \left(1 + R_s G_d - L_p C \omega^2\right)}, \quad (31)$$

де G_d – провідність діода;
 R_s – опір втрат;
 C_d – ємність діода;
 L_p – індуктивність контактного дроту.

Для аналізу флуктуаційних властивостей ЛПД за наявності нелінійних елементів C_d , C коливань великої амплітуди необхідно замінити параметри цих елементів їх середніми значеннями по першій гармоніці G_{d1} і C_1 . Це дозволить замінити нелінійну провідність ЛПД в точках 1 – 1' еквівалентної схеми (рис. 6) лінеаризованою провідністю (середньою по першій гармоніці).

$$Y_{d1}(j\omega) = G_{d1}(\omega) + jB_{d1}(\omega) = |Y_{d1}(j\omega)| e^{jY_{d1}}, \quad (32)$$

$$C_{d1}(\omega) = \frac{G_1 \left(1 - R_s G_1 - R_s C_1^2 \omega^2 / G_1\right)}{\left(\frac{C_1 \omega}{G_1}\right)^2 \left(-R_s G_1 + \frac{L_p C_1^2}{C_1}\right) + \left(1 - R_s G_1 - L_p C_1 \omega^2\right)^2}, \quad (33)$$

$$B_{d1}(\omega) = \frac{\omega C_1 \left(1 - G_1^2 \frac{L_p}{C_1} - L_p C_1 \omega^2 \right)}{\left(\frac{C_1 \omega}{G_1} \right)^2 \left(-R_s G_1 + \frac{L_p C_1^2}{C_1} \right) + \left(1 - R_s G_1 - L_p C_1 \omega^2 \right)^2}, \quad (34)$$

З виразів (33, 34) величини $G_{d1}(\omega)$ і $B_{d1}(\omega)$ залежавши від амплітуди першої гармоніки на контурі U_1 в точках 1 – 1' еквівалентної схеми, оскільки G_d і I_3 залежать від U_1 . Для ГЛПД в стаціонарному режимі рівняння балансу фаз записується у вигляді

$$\varphi_{d1} + \varphi_k = 0, \quad (35)$$

де φ_{d1} , φ_k – зрушення фаз між першою гармонікою КВЧ струму I_1 і напругою на діоді і контурі.

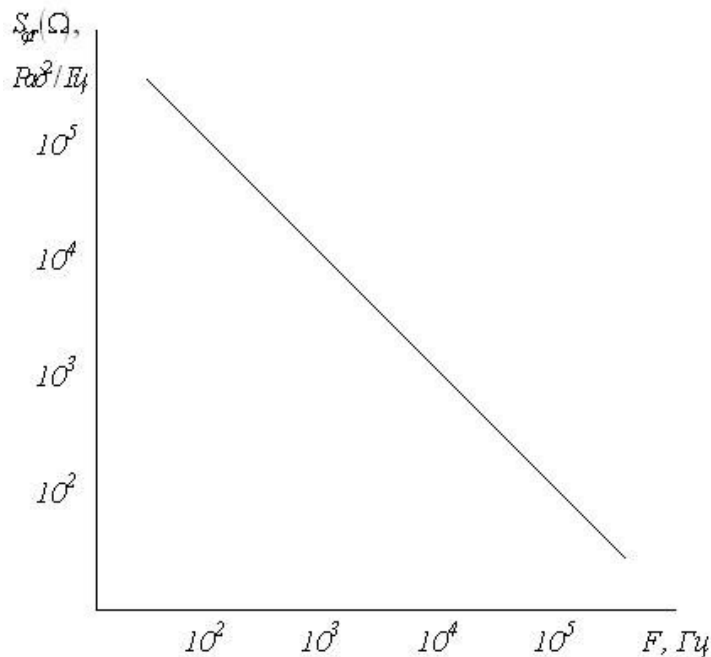


Рис.7. Залежність спектральної щільності частотних флуктуацій ГЛПД від частоти аналізу.

Фазовий кут середньої провідності визначається як

$$\varphi_{d1} = -\arctan \frac{\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p G_1^2}{G_1 - R_s G_1^2 \omega^2}, \quad (36)$$

Флуктуації фазового кута знаходимо як

$$\Delta \varphi_{d1} \approx A_1 \delta G_1 + B_1 \delta C_1, \quad (37)$$

$$A_1 = G_1 \frac{\omega L_p (C_1^2 - \omega^2 C_1) + \omega C_1 (1 - 2R_s G_1)}{(G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2)^2 + (\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2)^2}, \quad (38)$$

де

$$B_1 = C_1 \frac{\omega (G_1 - R_s G_1^2) + \omega^3 C_1^2 L_p \left(2G_1 - \frac{C_1}{L_p} R_s \right)}{(G_1 - R_s G_1^2 - R_s C_1^2 \omega^2)^2 + (\omega C_1 - \omega L_p G_1^2 - \omega^3 L_p C_1^2)^2}, \quad (39)$$

Для розрахунків дисперсії і нестабільності частоти ГЛПД були використані параметри: $f_0 = 95 \cdot 10^9$ Гц; $P_0 = 0,1$ Вт; $Q_n = 10^3$; $R_d = 3$ Ом; $R_s = 0,5$ Ом; $L_p = 0,1 \cdot 10^{-9}$ Гн; $C_1 = 0,2 \cdot 10^{-12}$ Ф; $U_0 = 15$ В; $I_0 = 0,1$ А; $K_1 = 10^{-7}$ В/Гц; $K_2 = 10^2$; $K_3 = 1$; $K_4 = 10^2$; $K_5 = 10^8$ Гц/В; $T_1 = 10^{-7}$ с; $T_2 = 10^{-6}$ с; $T_3 = 0,1$ с.

На рис. 7 наведена залежність спектральної щільності частотних флуктацій ГЛПД від частоти аналізу.

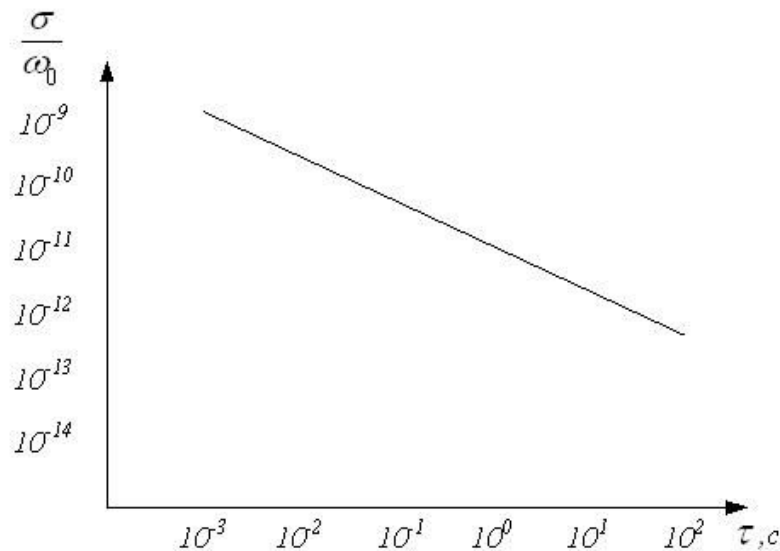


Рис. 8. Нестабільність частоти генератора на ЛПД від часу вимірювання.

Розрахункові результати нестабільності частоти ГЛПД від часу вимірювань в системі контролю ДП дихання рослин наведені на рис. 8. Наведені результати теоретичних досліджень показують, що ЛПД мають високий рівень флікерних шумів. В той же час збільшення добротності зовнішнього контура і вибір оптимальних режимів роботи дозволяють істотно понизити рівень частотних шумів і ефективно подавити швидкі флуктації частоти, що забезпечує малі значення короточасної нестабільності частоти ГЛПД в межах $10^{-8} \dots 10^{-9}$ степені

Висновки. В якості генератора мм діапазону в системі вимірювання ДП газового середовища рослин слід використовувати лавино-прольотний діод з крутизною електронної перебудови частоти 108 Гц/В і відносною нестабільністю частоти в межах $10^{-8} - 10^{-9}$.

Застосування в системі вимірювання ДП газового середовища рослин пристрою перетворення частоти з параметрами: $K_1 = 10^{-7}$ В/Гц; $K_2 = 10^2$; $K_3 = 1$; $K_4 = 10^2$; $K_5 = 10^8$ Гц/В; $T_1 = 10^{-7}$ с; $T_2 = 10^{-6}$ с; $T_3 = 0,1$ с. дозволить забезпечити величину перерегулювання менше 10%, час встановлення перехідного процесу $0,8 \cdot 10^{-5}$ с і дисперсію помилки в межах 10^{-2} .

Література

- 1 V. Prabhu. Noise performance of abrupt – junction varaktor frequency multipliers// Proc. IEEE. - 1966. - V.54, № 2. - p. 285.
- 2 Вальд-Перлов В.М. О минимальном уровне амплитудного шума генераторов на ЛПД / В.М.Вальд-Перлов, Л.С.Сибирцев, А.С.Тигер // Радиотехника и электротехника - 1977. - Т. 22. - № 10. - С. 2186-2189.
- 3 Бугаев А.В. Частотная зависимость модуляционных шумов ГЛПД / А.В.Бугаев // Электронная техника. Серия 1 - 1977. - № 2. - С. 103-105.
- 4 Бычков С.И. Стабилизация частоты генераторов СВЧ / С.И.Бычков, Н.И.Буренин, Р.Т.Сафаров - М.: Сов. радио, 1962. - 376 с.
- 5 Конструирование и расчет полосковых устройств / Голубев В.И., Ковалев И.С., Кузнецов Е.Г. и др.; под ред. И.С. Ковалева - М.: Сов. радио, 1974. - 295 с.
- 6 Коновалов Г.Ф. Радиоавтоматика: Учеб. для вузов / Г.Ф. Коновалов - М.: Высш. шк., 1990. - 335 с.

РАЗРАБОТКА ГЕНЕРАТОРА МИЛЛИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА НА ЛПД С ЭЛЕКТРОННОЙ ПЕРЕСТРОЙКОЙ ЧАСТОТЫ

Ю.М. Куценко

Аннотация – обоснованы параметры генератора миллиметрового диапазона в системе измерения диэлектрической проницаемости газовой среды растений, представлен анализ флуктационных характеристик.

DEVELOPMENT OF GENERATOR MILLIMETER RANGE FOR ATD WITH ELECTRONIC FREQUENCY TUNING

Yu. Kutsenko

Summary

The parameters of the generator milimet-rovogo range in the measurement system of the dielectric-bility of the gas medium of plants, represented analiz fluktatsion-acteristics.