

АНАЛІЗ ШУМОВИХ КОМПОНЕНТІВ ДІОДНИХ АВТОГЕНЕРАТОРІВ НВЧ

Вступ

Останнім часом при проектуванні автогенераторів НВЧ підвищився інтерес до використання діодів з так званим негативним опором. Серед найбільш розповсюджених діодних генераторів є такі, як генератори на тунельних діодах, генератори на діодах Ганна та лавино-пролітних діодах, що працюють в режимах IMPATT або TRAPATT. Цим автогенераторам властивий певний рівень паразитних флуктуацій. Особливо цей недолік присутній у генераторах на лавино-пролітних діодах.

Робота присвячена як теоретичному, так і практичному дослідженню флуктуаційних компонентів діодних автогенераторів. Проведені дослідження свідчать про узгодженість теоретичних висновків з практичними результатами. Висновки, що витікають з проведених досліджень, можуть бути використані при проектуванні діодних генераторів НВЧ з заданими флуктуаційними характеристиками.

Механізм формування флуктуаційних компонентів діодних автогенераторів

Шумові флуктуації діодних автогенераторів НВЧ в основному складаються з двох компонентів: флуктуації основної частоти (високочастотний шум) і флуктуації, що зумовлені низькочастотною модуляцією (низькочастотний шум).

З метою теоретичного аналізу впливу низькочастотних та високочастотних джерел шумових флуктуацій розглянемо модель, діодного автогенератора, яка враховує обидві ці шумові компоненти. Одна з таких можливих моделей наведена на рис. 1.

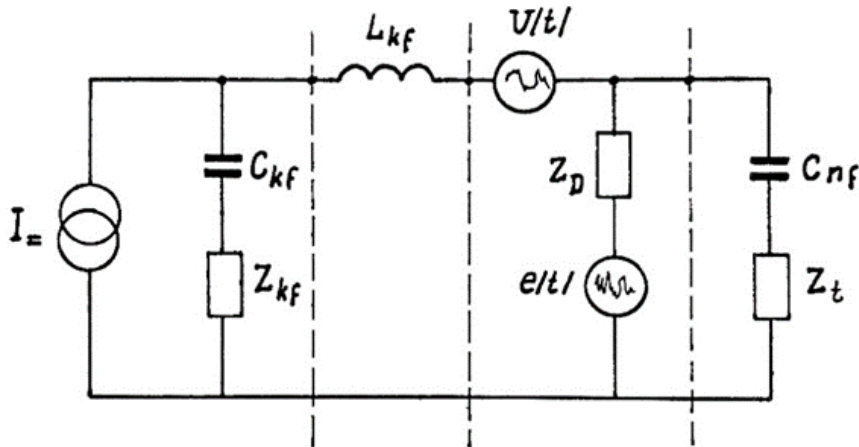


Рис. 1. Схема моделі автогенератора з урахуванням його шумових флуктуаційних компонентів

На еквівалентній схемі (рис. 1) генератор напруги $e(t)$ презентує високочастотну, флуктуаційну компоненту шуму і під'єднується послідовно з комплексним опором діода Z_D . Модуляційний шум, що виникає в результаті флуктуацій постійного струму δI , може бути представлений генератором напруги $U(t)$, підключеним послідовно до ланцюга живлення. Таке представлення генератора дозволяє роздільно враховувати флуктуації, що породжені, як флуктуаціями струму джерела живлення, так і високочастотними флуктуаціями, джерелом яких є фізичні процеси в напівпровіднику діода. Фільтр, що складається з ємності C_{kf} та індуктивності L_{kf} служить для розділу високочастотної та низькочастотної частин генератора.

Комплексний опір Z_{kf} , в свою чергу, презентує вхідний опір джерела живлення автогенератора. Ланцюг C_{pf} та Z_t моделює елементи розділу навантаження та коливальної системи і комплексне навантаження діодного генератора.

У випадку обмежених флуктуацій, високочастотна напруга $e(t)$, що представляє собою високочастотну флуктуаційну компоненту шуму, може бути визначена як

$$e(t) = \operatorname{Re} [n(t) \exp j\omega t] = \operatorname{Re} \{ [e_c(t) + je_s(t)] \exp j\omega t \},$$

де $e_c(t)$ та $e_s(t)$ – синусоїдальні та косинусоїдальні компоненти шумової функції $n(t)$.

Зазначимо, що компоненти $e_c(t)$ та $e_s(t)$ являються функціями, що відносно повільно змінюються та характеризуються відповідними спектрами $S_{ec}(\omega)$ та $S_{es}(\omega)$.

Модуляційні флуктуації, в свою чергу, можуть бути описані флуктуацією постійного струму $\delta i(t)$, що відповідає певному спектру потужності $S_{ii}(\omega)$.

Механізм формування флуктуаційних компонентів діодного автогенератора можна проілюструвати наступним чином (рис. 2).

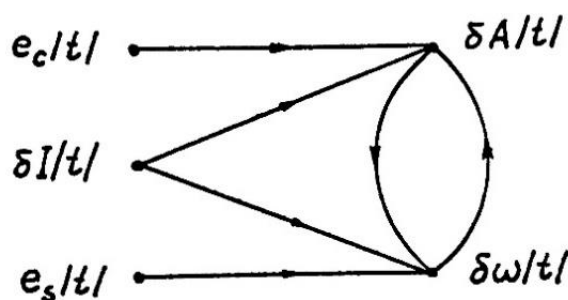


Рис. 2. Схема механізму формування флуктуаційних компонентів автогенератора

Згідно з таким механізмом косинусоїдальна компонента флуктуаційного шуму викликає флуктуацію амплітуди, а це призводить, завдяки нелінійності системи, до наступного відхилення частоти; в той час, як синусоїдальна компонента флуктуаційного шуму викликає коливання частоти, що, в свою чергу, призводить до коливання амплітуди через елементи генератора, які залежать від частоти.

Таким чином, модуляційний шум може безпосередньо спричиняти компоненти шуму, як амплітудно модульовані, так і частото модульовані.

Експериментальне дослідження флуктуаційних компонентів автогенераторів

Для експериментального дослідження флуктуаційних компонентів було вибрано генератор на лавино-пролітному діоді як приклад діодного автогенератора, що має досить великий рівень власних шумів. На рис. 3 і 4 представлені результати досліджень амплітудно-модульованих та частото-модульованих шумових компонентів автогенератора на лавино-пролітному діоді в залежності від добротності його коливальної системи.

Звертає на себе увагу, як і слід було передбачити за результатами теоретичного аналізу, експоненційний характер цих залежностей, що є природньо. По мірі наближення до несучої частоти амплітуда коливань повинна збільшуватися, а по мірі віддалення від несучої частоти рівень флуктуаційних компонентів зменшується та дещо стабілізується.

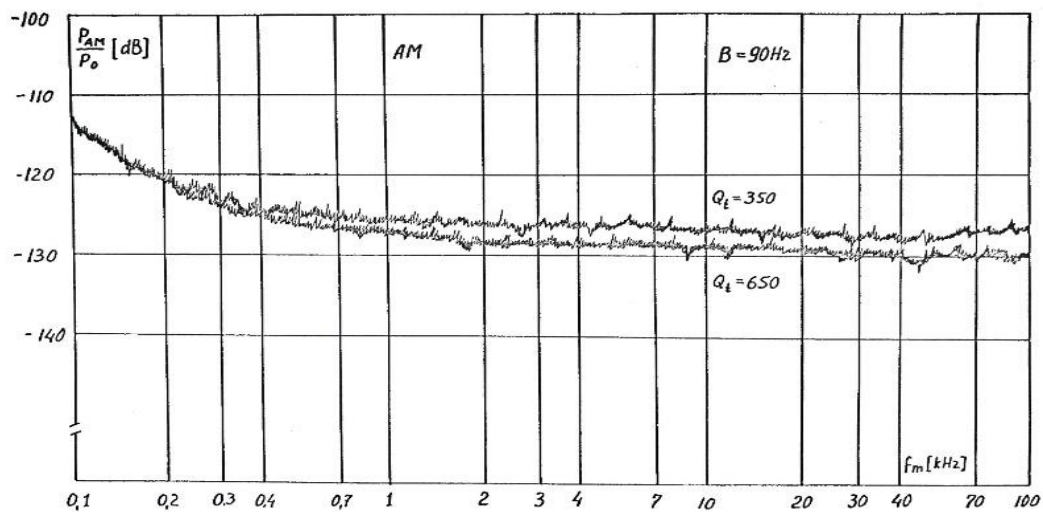


Рис. 3. Результати досліджень амплітудно-модульованих шумових компонентів автогенератора в залежності від добротності його коливальної системи

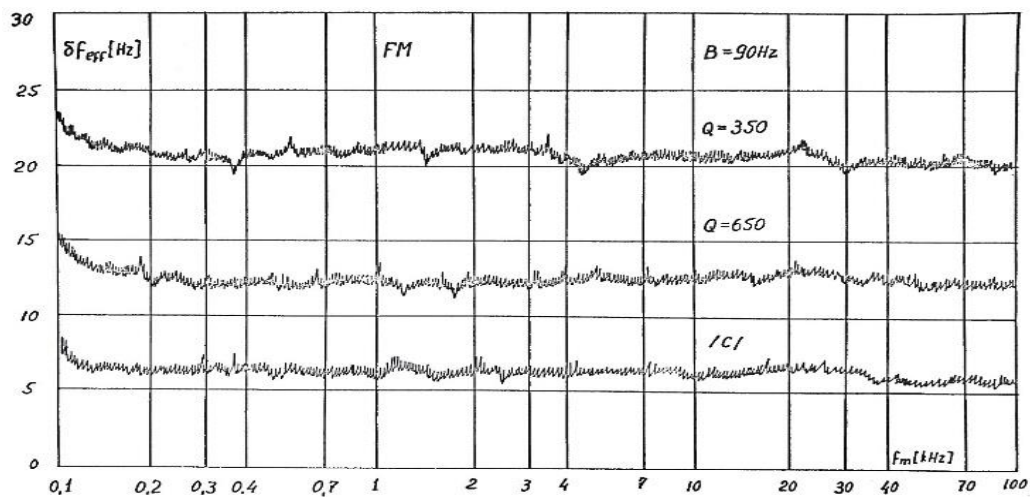


Рис. 4. Результати досліджень частото-модульованих шумових компонентів автогенератора в залежності від добротності його коливальної системи

Експериментальні данні свідчать про те, що добротність коливальної системи генератора більше впливає на частото-модульовану шумову компоненту ніж на амплітудно-модульовану компоненту.

Результати досліджень свідчать, також, що частото-модульовані шумові компоненти при певній величині струму живлення досягають свого мінімуму. Цей факт демонструє крива, зображена на рис. 5. Для автогенератора, що досліджувався, цей мінімум знаходився в діапазоні від 90 мА до 95 мА.

У той же час, залежність амплітудно-модульованих компонентів шуму від постійного струму живлення значно слабша, що дає можливість, при подальшому аналізі, нею знехтувати.

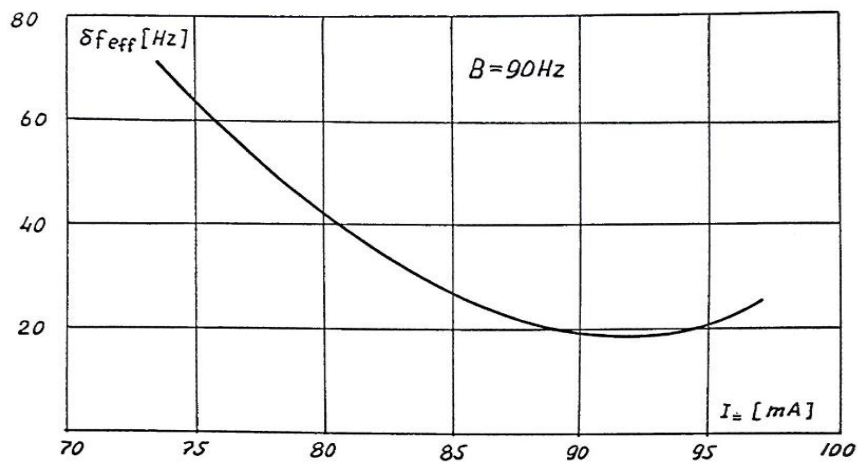


Рис. 5. Залежність частото-модульованих шумових компонентів від струму живлення автогенератора

В якості прикладу на рис. 6 наведено вид типових спектрів частото-модульованих компонентів автогенератора на лавино-пролітному діоді фірми Hewlett Packard, зроблений з екрана аналізатора спектру.

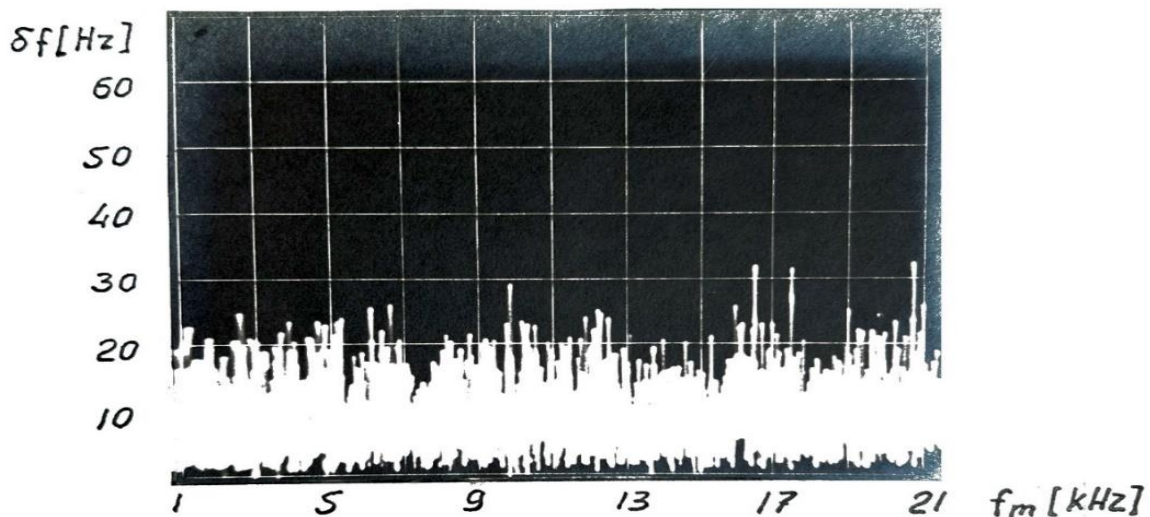


Рис. 6. Вид експериментального частото-модульованого спектру компонентів генератора на лавино-пролітному діоді

Як свідчать дані, представлені на рис. 6, в діапазоні частот від 1 до 21 кГц флуктуаційні відхилення частоти носять рівномірний характер та знаходяться в межах від 0 до 20 Гц.

Висновки

Результати проведеного теоретичного та практичного аналізу свідчать про наступне:

- серед флуктуаційних компонентів діодних автогенераторів доцільно виділяти низько-частотні та високочастотні компоненти – модуляційні та флуктуаційні;
- у разі невеликих відхилень від несучої, модуляційні флуктуації, при відповідному вхідному опорі джерела живлення, можна зробити досить малими;
- високочастотні флуктуації визначаються трьома основними параметрами: безпосередньо, флуктуаціями струму діода, нелінійністю активної та пасивної частин лавинного діода,

частотною залежністю навантаження. Враховуючи ці три параметри, можна звести флуктуації до мінімуму, або відповідним чином впливати на них;

– в загальному випадку частото-модульований шум генератора на лавино-пролітному діоді більш значний ніж амплітудно модульований шум.

Список літератури:

1. Prager H.J., Chang K.K.N., Weisbrod J. A Theory for the High-Efficiency Mode of Oscillation in Avalanche Diode // Proc. IBBE, 55, 586, 1967.
2. Chang K.K.N., RCA Rev, 30, 3. 1969.
3. T.Misawa Multiple uniform laguer approximation in analysis of negativ resistance in p-n junction in breakdown // IEEE Tran. Electron Devices vol. ED-14 1967. pp. 795-808.
4. T.Misawa. Negative Resistance in p-n Junctions Under Avalanche Breakdown Conditions, pts.I and II // IEEE Trans. Electron Devices, vol. ED-13 pp 137-151. Jan. 1966.
5. М. Бондаренко. Мікроелектроніка НВЧ. Ч. 2. Напівпровідникові елементи та пристрої НВЧ : навч. посіб. для студ. спец. 153 «Мікро- та наносистемна техніка», 171 «Електроніка». Харків, 2019.
6. Осадчук О.В. Математичне моделювання генератора НВЧ на основі транзисторної структури з від'ємним опором / О.В. Осадчук, А.О. Семенов // Вісник Хмельн. нац. ун-ту, 2005.
7. Super Low Noise InGaAs HEMT MGF431×G. Technical description/ Mitsubishi Semiconductor as of Apr.' 98. P. 1238–1239. 96. Low Noise Pseudomorphic HEMT in a Surface Mount Plastic Package // Aqilent Technologies. Innovating the HP Way. 2001. P. 145–147. №4, Ч.1, Т.2. С. 256–259.
8. Патент на корисну модель 7411 Україна, МКИ Н 03 В 7/00. Генератор з електричним регулюванням частоти генерації / В.С. Осадчук, О.В. Осадчук, А.О. Семенов (Україна). №20041210199; Заявлено 13.12.2004; Опубл. 15.06.2005, Бюл. №6. 2 с.
9. Яненко О.П. Моделювання нормованих спотворень монохроматичних сигналів НВЧ генераторів / О.П. Яненко, Д.М. Ясінський // Вісник, НТУУ «КПІ». Сер. Радіотехніка радіоапаратобудування.
10. Лукин К.А., Максимов П.П. Динаміка двочастотних лавино-генераторних діодів мікрохвильового діапазону // Радіофізика та електроніка. 2015. Т. 6(20), № 4. С. 54–61.
11. Коцержинський, Б.О. Фазові шуми малошумлячих транзисторних НВЧ генераторів // Вісник НТУУ «КПІ». Радіотехніка, радіоапаратобудування: збірник наукових праць. 2009. № 39. С. 88–90.

Надійшла до редколегії 04.01.2025

Відомості про авторів:

Меняйло Олександр Дмитрович – канд. техн. наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: oleksandr.meniailo@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3760-0523>

Григор'єва Ольга Володимирівна – Харківський національний університет радіоелектроніки, старший викладач кафедри проектування та експлуатації електронних апаратів, Україна; e-mail: olha.hryhorieva@nure.ua; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5759-8897>