

УДК 621.317

О.П. Яненко, к.т.н., доц.

Науково дослідний центр квантової медицини "Відгук" МОЗ України

**ОЦІНКА ПОХИБКИ P-I-N-МОДУЛЯТОРНОГО КЛЮЧА
МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНОГО ЧОТИРИПОЛЮСНИКА**

Розглянуто похибку, що вноситься вхідним модулятором радіометричної системи, який працює в режимі ключа (вимикача). Аналіз модулятора, проведений з використанням еквівалентного чотириполосника. Показана можливість розрахунку похибок модулятора через параметри НВЧ-чотириполосника. Проведений розрахунок похибки модулятора з використанням стандартних характеристик серійного пристрою.

В області дециметрових та сантиметрових хвиль як комутаційні елементи можуть використовуватись як польові транзистори, так і *p-i-n*-діоди. В мм-діапазоні хвиль перевага надається модуляторам на *p-i-n*-діодах.

Основні вимоги до модуляторів радіометричних вимірювачів полягають у забезпеченні мінімальних втрат у відкритому та максимальних – у закритому станах. Якість модулятора визначається за формулою [1]:

$$\frac{A_0 - 1}{A_3 - 1} = K, \tag{1}$$

де A_0, A_3 – коефіцієнти передачі модулятора у відкритому та закритому станах.

Бажане придушення сигналу модулятором повинно складати 70–80 дБ, однак на НВЧ забезпечити такі вимоги неможливо, що призводить до збільшення похибки вимірювання.

Модулятор на *p-i-n* діоді може підєднуватись у лінію в режимі ключа (вимикача) або перемикача. Доцільність застосування *p-i-n*-модулятора в режимі перемикача очевидна, але використання хвилеводних ліній не завжди забезпечує можливість реалізації подібної схеми, яка, окрім того, є більш складною.

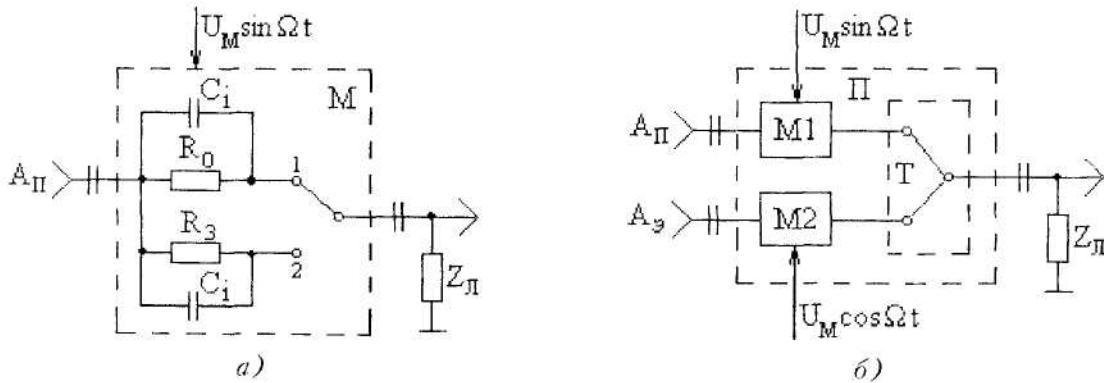


Рис. 1. Варіанти використання модулятора в режимі вимикача та перемикача

На рис. 1, *a* приведена еквівалентна схема модулятора на *p-i-n*-діоді в режимі вимикача. В положенні 1 (*p-i-n*-діод відкритий) сигнал вільно проходить з приймальної антени на вихід модулятора. За малого опору відкритого діода R_0 вплив C_1 відсутній. У положенні 2 *p-i-n*-діод закривається, його опір (R_3) значно збільшується. Оскільки опір ємності C_1 є величиною

залежною від частоти $\left(X_C = \frac{1}{\omega C_1} \right)$, то зменшить шунтує R_3 , зменшуючи при цьому придушення

вхідного сигналу та “якість” модулятора, особливо зі збільшенням робочої частоти модулятора.

Еквівалентну схему модулятора (рис. 1, *a*) можна подавати у вигляді двох еквівалентних чотириполосників – для закритого та відкритого режимів роботи (рис. 2).

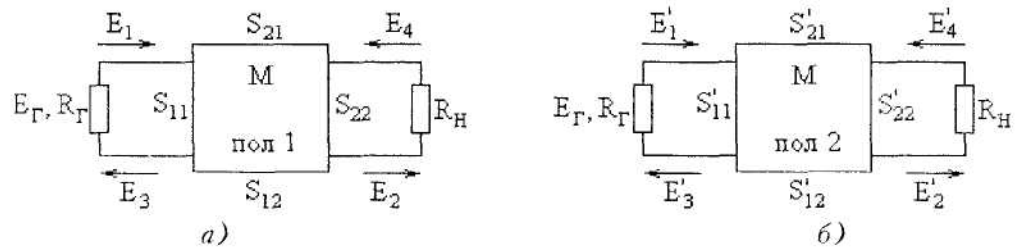


Рис. 2. Еквівалентні чотириполосники модулятора у відкритому та закритому станах

На рис. 2: R_{Γ} – вихідний опір джерела електромагнітних коливань, наприклад, генератора міліметрового діапазону Г4-142; $R_{\text{Н}}$ – навантаження чотириполосника, наприклад, поляризаційного атенюатора міліметрового діапазону ДЗ-38.

З [2] відомо, що коефіцієнти відбиття з боку входу та виходу чотириполосника:

$$S_{11} = \frac{E_3}{E_1} \quad \text{за} \quad E_4 = 0, \tag{2}$$

$$S_{22} = \frac{E_2}{E_4} \quad \text{за} \quad E_1 = 0, \tag{3}$$

а коефіцієнти передачі в прямому та зворотному напрямках:

$$S_{21} = \frac{E_2}{E_1} \quad \text{за} \quad E_4 = 0, \tag{4}$$

$$S_{12} = \frac{E_1}{E_4} \quad \text{за} \quad E_1 = 0. \tag{5}$$

Проходження сигналу через модулятор як у відкритому, так і закритому станах характеризуються втратами. Амплітуда хвилі, що проходить через відкритий модулятор:

$$E_2 = E_{\Gamma} k_1, \tag{6}$$

де k_1 – коефіцієнт передачі відкритого модулятора,

а закритого модулятора:

$$E'_2 = E_{\Gamma} k_2, \tag{7}$$

де k_2 – коефіцієнт передачі закритого модулятора.

На рис. 3 наведений розподіл амплітуди сигналу за період комутації модулятора в режимі вимикача.

Позначення на рисунку: E_2, E'_2 – амплітуди хвилі на виході модулятора; E_i – амплітуда, що вимірюється.

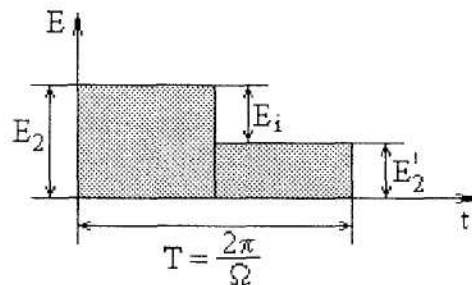


Рис. 3. Етори амплітуд сигналу за період комутації

З рис. 3 випливає:

$$E_i = E_2 - E'_2 = E_{\Gamma} (k_1 - k_2). \tag{8}$$

Абсолютна похибка вимірювання за рахунок проходження сигналу через закритий модулятор, яка має адитивний характер, визначається за формулою:

$$\Delta E = E_{\Gamma} - E_i = E_{\Gamma} (1 - k_1 + k_2), \tag{9}$$

а відносна:

$$\delta E = (1 - k_1 + k_2) \cdot 100\%. \tag{10}$$

Визначення коефіцієнтів передачі модулятора k_1 та k_2 пов'язана з узгодженням входу та виходу модулятора з джерелом сигналу та каналом вимірювача (навантаженням). Використовуючи методику [3] та позначення рис. 2 можна записати:

$$E_2 = E_\Gamma \frac{S_{21}}{1 - \Gamma_\Gamma S_{11} - \Gamma_H S_{22} - \Gamma_\Gamma S_{21} \Gamma_H S_{12} + \Gamma_\Gamma S_{11} \Gamma_H S_{22}}, \tag{11}$$

$$E'_2 = E_\Gamma \frac{S'_{21}}{1 - \Gamma_\Gamma S'_{11} - \Gamma_H S'_{22} - \Gamma_\Gamma S'_{21} \Gamma_H S'_{12} + \Gamma_\Gamma S'_{11} \Gamma_H S'_{22}}. \tag{12}$$

Враховуючи, що чотирьохполюсник взаємний і коефіцієнти передачі модулятора в прямому та зворотному напрямках $S_{21} = S_{12}$ та $S'_{21} = S'_{12}$, проводимо спрощення (11) та (12):

$$E_2 = E_\Gamma \frac{S_{21}}{(1 - \Gamma_\Gamma S_{11})(1 - \Gamma_H S_{22}) - S_{21}^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_H}, \tag{13}$$

$$E'_2 = E_\Gamma \frac{S'_{21}}{(1 - \Gamma_\Gamma S'_{11})(1 - \Gamma_H S'_{22}) - (S'_{21})^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_H}. \tag{14}$$

Таким чином, коефіцієнти передачі модулятора у відкритому та закритому станах мають вигляд:

$$k_1 = \frac{S_{21}}{(1 - \Gamma_\Gamma S_{11})(1 - \Gamma_H S_{22}) - S_{21}^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_H}, \tag{15}$$

$$k_2 = \frac{S'_{21}}{(1 - \Gamma_\Gamma S'_{11})(1 - \Gamma_H S'_{22}) - (S'_{21})^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_H}. \tag{16}$$

Відносно адитивну похибку модуляційного перетворювача, що використовується в режимі вимикача, можна записати:

$$\delta E = \left[1 - \frac{S_{21}}{(1 - \Gamma_\Gamma S_{11})(1 - \Gamma_H S_{22}) - S_{21}^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_H} + \frac{S'_{21}}{(1 - \Gamma_\Gamma S'_{11})(1 - \Gamma_H S'_{22}) - (S'_{21})^2 \Gamma_\Gamma \Gamma_H} \right] \cdot 100\%. \tag{17}$$

Як комутатор модуляційного радіометричного вимірювача діапазону частот 53-78 ГГц можна використовувати модулятор на *pin*-діодах типу М347, основні паспортні та, відповідно, розрахункові параметри якого наведені в табл. 1.

Таблиця 1

М34707-2	Максимальне	Номінальне	Примітка
1. Початкове ослаблення, дБ	1,5	0,9	паспорт
	$S_{21} = 0,710$	$S_{21} = 0,813$	розрахунк
2. Коефіцієнт стоячої хвилі 0-10 дБ (модулятор відкритий)	2,5	2,1	паспорт
	$S_{11} = S_{22} = 0,42$	$S_{11} = S_{22} = 0,35$	розрахунк
10-30 дБ (модулятор закритий)	3,5	2,1	паспорт
	$S'_{11} = S'_{22} = 0,55$	$S'_{11} = S'_{22} = 0,35$	розрахунк

Підключення на вхід модулятора генератора мм-діапазону Г4-142 забезпечує за КСХН = 1,5 $\Gamma_\Gamma = 0,2$, а на виході поляризаційного генератора ДЗ-38 за КСХН = 1,2 $\Gamma_H = 0,1$.

Результати розрахунку адитивної похибки за формулою (17), що виникає за використання модулятора в режимі ключа (вимикача) з врахуванням параметрів типового підключення радіометричного вимірювача до джерела сигналу наведені в табл. 2 та на рис. 4.

Таблиця 2

Режим	S'_{21}	S_{21}	K_1	K_2	$\delta E\%$
Максимальне значення параметрів модулятора	0,1	0,71	0,8675	0,119	25,1
	0,05	0,71	0,8675	0,0594	19,2
	0,01	0,71	0,8675	0,0118	14,4
	0,001	0,71	0,8675	0,0011	13,3
	0,0001	0,71	0,8675	0,0001	13,2
Номінальне значення параметрів модулятора	0,1	0,813	0,1114	0,9194	19,2
	0,05	0,813	0,0557	0,9194	13,6
	0,01	0,813	0,0111	0,9194	9,1
	0,001	0,813	0,0011	0,9194	8,1
	0,0001	0,813	0,0001	0,9194	8,0

На рис. 4: лінії 1, 2 характеризують розподіл похибок за максимального та номінального значення параметрів модулятора. Лінія 3 описує розподіл похибок гіпотетичного модулятора без початкових втрат ($K_1=1$) та цілком узгодженого з генератором і навантаженням. Використання такої моделі модулятора забезпечує виконання умови:

$$\delta E = k_2. \quad (18)$$

Аналіз рис. 4 показує, що максимальна похибка типового модулятора мм-діапазону М34707 за $S_{21} = 0,1$ може сягати 25,1 %, а мінімальна, за номінального значення параметрів та $S_{21} = 0,0001$, складає 8,0 %.

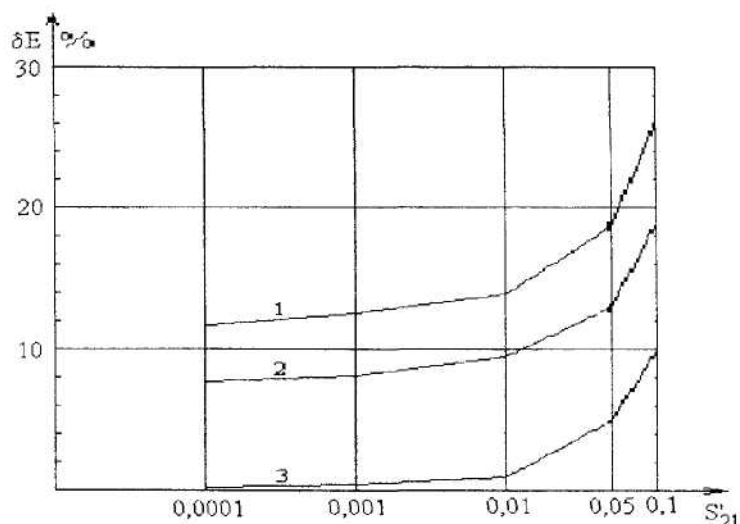


Рис. 4. Розподіл відносної похибки комутаційного перетворювача в режимі вимикача

Мінімальна похибка формується в основному за рахунок неузгодження модулятора з генератором сигналу і навантаженням, що добре видно з порівняння графіків 1 і 2 з графіком 3, ідеально узгодженого модулятора.

Слід відмітити також, що збільшення придушення сигналу (S'_{21}) на порядок (з 0,001 до 0,0001) призводить до зменшення похибки тільки на 0,8 % та 1,3 %, що пояснюється більш вагомым впливом на похибку параметрів неузгодження модулятора.

Таким чином, забезпечення збільшення придушення у варіанті використання модулятора як вимикача доцільне в межах до $S'_{21} \approx 0,001$. Подальше зменшення похибки модулятора можливе за рахунок поліпшення узгодження з його входом та виходом.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Дзехцер Г.Б., Орлов О.С. Р-І-Н-діоди в широкополосних пристроях. – М.: Советское радио, 1970. – 200 с.
2. Бова М.Т., Лайхтман І.Б. Вимірювання параметрів антен і пристроїв НВЧ. – К.: Вища школа, 1975. – 110 с.
3. Силаев М.А., Брянцев С.Ф. Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств. – М.: Советское радио, 1970. – 248 с.

ЯНЕНКО Олександр Пилипович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації експериментальних досліджень Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут", заступник директора Науково-дослідного центру квантової медицини "Відгук" МОЗ України.

Наукові інтереси:

- вимірювання слабких сигналів НВЧ-діапазону;
- комутаційно-модуляційні перетворювачі;
- радіометрія;
- метрологія та метрологічне забезпечення вимірювання слабких сигналів.

Подано 17.11.2001