інфраструктури. Зб. науков. праць, вип. 11, Київ, 2005. с. 244-245.

9. *Бетелин В.Б., Галатенко В.А., Кобзарь М.Т. и др.* Профили защиты на основе «общих критериев». Аналитический обзор, Jet Info №3(118)/2003.

10. *Галатенко В.А.* Оценка безопасности автоматизированных систем. JetInfo, N 7, 2005, http://www.jetinfo.ru/2005/7/2005.7.pdf.

Надійшла 23.04.2007 р.

УДК 621.375

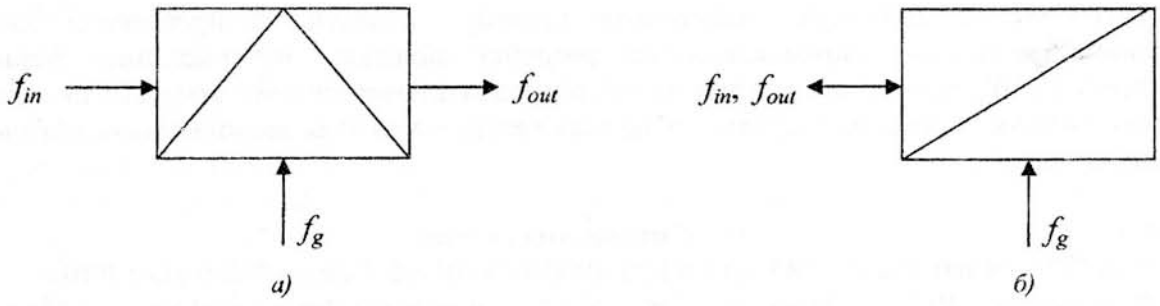
Форощук І.В.

СТРУКТУРНІ СХЕМИ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ЧАСТОТИ З ПОЄДНАНИМИ ВХОДОМ І ВИХОДОМ

Вступ

Висока інтенсивність впровадження інформаційно-телекомунікаційних систем (ІТС) у різноманітні галузі людської діяльності зумовлює зростання актуальності та складності задач розробки, практичної реалізації або модифікації відповідного електронного устаткування.

Так, наприклад, стрімкий розвиток засобів радіозв'язку зумовлює значні зміни діапазонів виділених частот, що призводить до необхідності розробки нових радіоприймачів, які входять до складу комплексних систем захисту інформації, або розширення діапазону робочих частот існуючих застосуванням відповідних конверторів. Для реалізації конверторів застосовують різноманітні схеми перетворювачів частоти. На рис. 1, *а* наведений класичний перетворювач з окремими входом і виходом, де f_{in} – частота сигналу на вході перетворювача, f_g – частота сигналу гетеродину (опорного генератора), f_{out} – частота виділеного сигналу, утвореного внаслідок частотного перетворення.



а) *б)*

Рис. 1. Перетворювачі частоти:
а – з окремими входом і виходом; *б* – з поєднаними входом і виходом

Частотні конвертори знайшли широкого вжитку у сучасній схемотехніці, але складність дообладнання радіоприймача зазначеним перетворювачем частоти полягає в необхідності безпосереднього втручання у вхідний високочастотний тракт.

Альтернативою перетворювачу частоти з окремими входом і виходом є перетворювач частоти з поєднаними входом і виходом (далі – однобічний перетворювач частоти) (рис. 1, *б*). Його застосування полягає в простому паралельному приєднанні до входу радіоприймача. Подальший матеріал присвячений розробці структурної схеми однобічного перетворювача частоти (ОПЧ) та оцінці ефективності ОПЧ за обраними показниками.

Стислі відомості щодо математичної моделі однобічного перетворювача частоти, виконаного на основі нелінійного елементу

Модульоване (або немодульоване) коливання можливо перетворити в коливання іншої частоти переносом його спектру таким чином, що амплітудні та фазові співвідношення між складовими спектру збережуться [1, с. 412].

Операція переносу спектру реалізується перемножуванням коливання, що необхідно перетворити, з деяким опорним (гетеродинним) коливанням. У випадках застосування нелінійного елементу перетворення частоти здійснюють наступними способами:

- створюють биття двох напруг та подають їх на нелінійний елемент – діод, тріод або будь-який інший пристрій з нелінійною характеристикою та виділяють з вихідної напруги складові сумарної або різницевої частоти;
- подають коливання, що необхідно перетворити, на елемент, коефіцієнт передачі якого змінюється відповідно до деякого опорного (гетеродинного) коливання та виділяють з вихідної напруги складові сумарної або різницевої частоти.

На рис. 2 наведено модель ОПЧ, виконаного на деякому нелінійному елементі. Електромагнітні високочастотні коливання згідно закону електромагнітної індукції [2] утворюють в антені радіоприймача з провідністю *Ya* високочастотну змінну електрорушійну силу (ЕРС) *Uin*(*t*). Відповідно до [3, с. 41] ЕРС призводить до протікання високочастотного струму через нелінійний елемент (НЕ) ОПЧ, приєднаного паралельно входу радіоприймача.

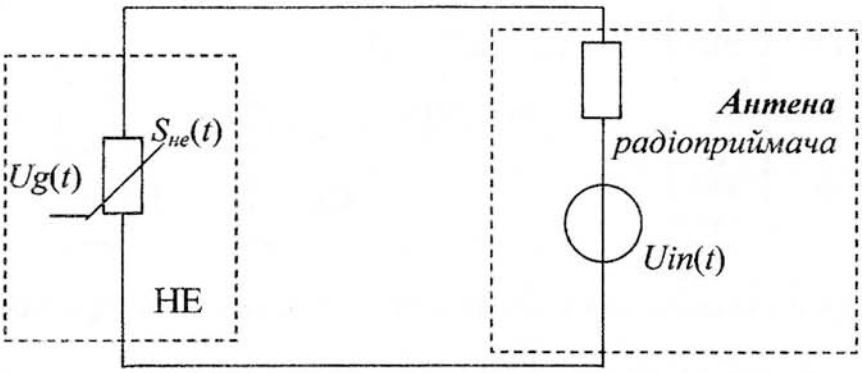


Рис. 2. Модель однобічного перетворювача частоти на нелінійному елементі

У класичному випадку ЕРС змінюється за гармонійним законом , тобто

$$Uin(t) = Uinm\cos(\omega_{in}t + \varphi_{in0}), \tag{1}$$

де ω_{in} – циклічна частота;
$Uinm$ – амплітуда;
φ_{in0} – початкова фаза.

Нехай початкова фаза $\varphi_{in0} = 0$, тоді $Uin(t) = Uinm\cos\omega_{in}t$.

Внаслідок простоти реалізації гетеродину на основі інтегральних або гібридних TTL (CMOS) генераторах розглянемо випадок для сигналу гетеродину $Ug(t)$ типу "меандр" з частотою f_g. Відповідна функція зміни провідності нелінійного елементу $S_{не}(t)$ буде мати наступний вигляд

$$S_{не}(t) = \begin{cases} S_{не1}, & (0+nT) < t < (T/2+nT) \\ S_{не0}, & (T/2+nT) < t < (T+nT) \end{cases} \tag{2}$$

де $S_{не1}$ і $S_{не0}$ – значення провідності нелінійного елементу, які відповідають значенням напруги логічних "1" та "0" відповідно;
$T = 1/f_g$;
n – будь-яке ціле число.

Нескладними математичними перетвореннями отриманий наступний вираз для визначення стуму в колі на рис. 2

$$i(t) = \frac{(S_{m1} + S_{m0}) \cdot Uinm \cdot \cos(\omega_{in} \cdot t)}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(S_{m1} - S_{m0}) \cdot Uinm}{(2 \cdot k - 1) \cdot \pi} \times$$

$$\times \left(\cos((2 \cdot \pi \cdot f_{in} + (2k-1)2 \cdot \pi \cdot f_g) \cdot t) + \cos((2 \cdot \pi \cdot f_{in} - (2k-1)2 \cdot \pi \cdot f_g) \cdot t)\right), \quad (3)$$

де $S_{m1} = (S_{не1}Ya)/(S_{не1}+Ya)$; *а* $S_{m0} = (S_{не0}Ya)/(S_{не0}+Ya)$.

Аналітичні дослідження існуючих та розробка нових структурних схем однобічних перетворювачів частоти, виконаних на нелінійних елементах

Цілий ряд перетворювачів частоти розроблений та досліджений Поляковим В.Т. Розглянемо структурну схему перетворювача частоти, виконану на зустрічно-паралельних діодах (рис. 3) [4, с. 119].

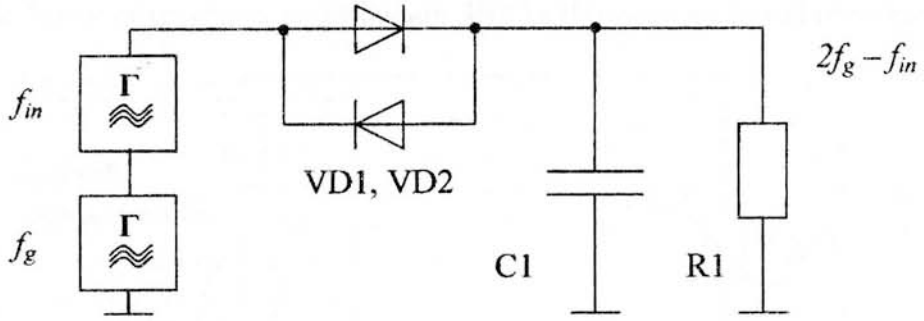


Рис. 3. Структурна схема перетворювача частоти на зустрічно-паралельних діодах

До зустрічно-паралельних діодів одночасно підводять напругу сигналу і напругу опорного генератора (гетеродину) з частотами f_{in} та f_g відповідно. Амплітуда напруги гетеродинного коливання повинна значно перевищувати амплітуду напруги вхідного сигналу та для нормальної роботи перетворювача на германієвих діодах становити 0,15...0,2 В, а на кремнієвих – 0,6...0,7 В (тобто декілька перевищувати напругу відпирання діодів).

Значення f_g обирають вдвічі меншим за необхідне. В таких умовах однин з діодів відкривається на піках позитивних півхвиль гетеродинної напруги, а інший – на піках негативних. В результаті опір зустрічно-паралельно включених діодів зменшується двічі за один період гетеродинної напруги. Виникає перетворення частоти, тобто в колі перетворювача утворюються сигнали комбінаційних частот, наприклад $2f_g - f_{in}$. Детально принцип роботи та математична модель зазначеного перетворювача (рис. 3) наведені в [4].

На основі моделі наведеної на рис. 2 та структурної схеми перетворювача частоти на зустрічно-паралельних діодах розробимо структурну схему перетворювача частоти з поєднаними входом і виходом. Для цього приймаємо, що опір навантаження R1 = 0 (рис. 3) (відповідно застосування конденсатора C1 втрачає сенс). У якості нелінійного приймаємо довільний елемент, опір (провідність) якого змінюється у відповідності до значення гетеродинної напруги однин раз за її період. Результуюча структурна схема наведена на рис. 4. Проведемо її експериментальне дослідження з використанням програмного продукту PSpice V.9.2, що належить до сімейства Orcad Family Release 9.2 виробництва Cadence Design Systems, Inc.

Програмне забезпечення PSpice V.9.2 дозволяє провести моделювання поведінки наведеної на рис. 4 структурної схеми із заданими заздалегідь параметрами та дослідити необхідні електричні сигнали.

Обрані наступні параметри моделювання:

1) Ug(t) – сигнал гетеродину типу "меандр", тривалості фронту та спаду імпульсу по 5 нс, періодичність слідування 1 мкс, мінімальне значення напруги імпульсу – 0 В, максимальне – 5 В;

2) C1 – 10 пФ, R1 – 50 Ом;

3) Uin(t) – високочастотний сигнал, що надходить на нелінійний елемент НЕ, частота – 800 МГц, амплітуда – 10 мВ;

4) $S_{не}(t)$ – функція зміни провідності нелінійного елементу НЕ, $S_{не1} = 0{,}05$ См, $S_{не0} \rightarrow 0$ См;

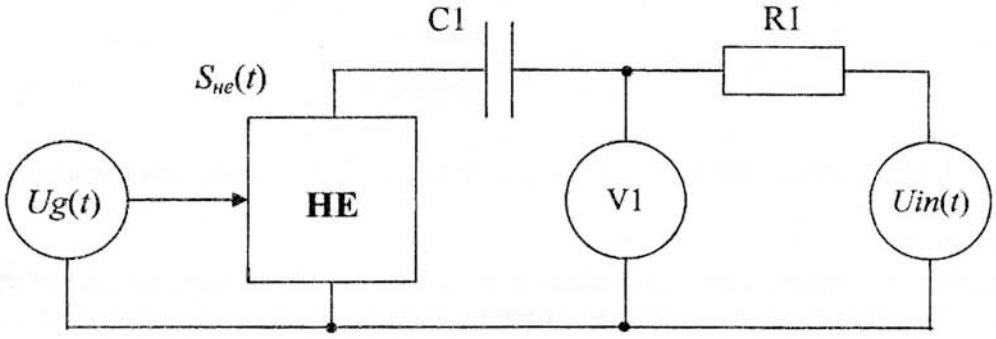


Рис. 4. Структурна схема однобічного перетворювача частоти на основі нелінійного елементу, провідність якого змінюється відповідно до сигналу гетеродину

В результаті моделювання отримано спектрограму (рис. 5) сигналу на вході вольтметра V1 (рис. 4), яка експериментально підтверджує утворення процесу перетворення частоти.

Оцінка ефективності однобічного перетворювача частоти, виконаного на основі нелінійного елементу

Визначимо характеристику втрат на частотне перетворення високочастотного сигналу η за наступним виразом

$$\eta = 10\log\left(\frac{P_0}{P_1}\right), \qquad (4)$$

де P_0 – потужність прийнятого антеною радіоприймача високочастотного сигналу від радіопередавача;

P_1 – потужність частотно сигналу виділеної бокової смуги (перша гармоніка).

Відповідно до отриманої спектрограми (рис. 5) розрахуємо втрати на частотне перетворення високочастотного сигналу за виразом (5) для розробленої структурної схеми моделі протікання високочастотних струмів через нелінійний елемент, провідність якого змінюється відповідно до сигналу гетеродину (рис. 3):

$$\eta = \frac{1}{2}\cdot 20\log\left(\frac{U_m}{U_1}\right) = \frac{1}{2}\cdot 20\log\left(\frac{10\ mV}{2{,}75\ mV}\right) \approx 5{,}6\ dB,$$

де U_m – амплітуда напруги прийнятого антеною радіоприймача високочастотного сигналу від радіопередавача;

U_1 – амплітуда напруги першої гармоніки утвореного при частотному перетворенні сигналу (801 МГц).

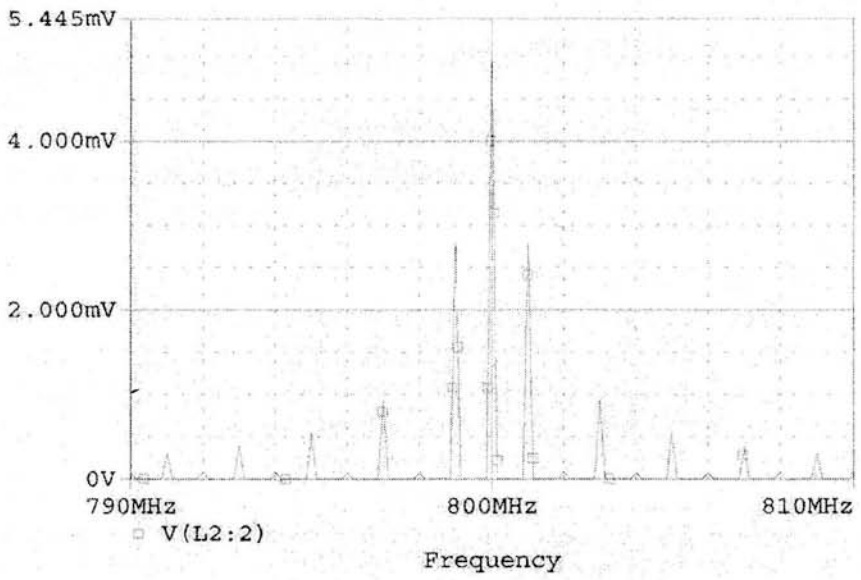


Рис. 5. Спектрограма сигналу на вході вольтметру V1 структурної схеми (рис. 4)

Висновки

В результаті проведених досліджень розроблена структурна схема перетворювача частоти з поєднаними входом і виходом, створеного на основі нелінійного елементу.

Отриманий результат щодо втрат на частотне перетворення високочастотного сигналу η не перевищує середнє для даного класу перетворювачів частоти значення – 6-8 дБ.

Переваги ОПЧ полягають у простоті їх виконання та легкості модернізації радіоприймача, яка полягає в простому паралельному підключенні до відповідного антенного входу. Основним недоліком ОПЧ є відсутність частотної селекції до та після перетворення частоти.

Список літератури

1. *Манаев Е.И.* Основы радиоэлектроники: Учебное пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1985. – 488 с.

2. *Сазонов Д.М.* Антенны и устройства СВЧ: учебник для вузов. – М.: Наука, 1988. – 432 с.

3. *Белецкий А.Ф.* Теория линейных электрических цепей: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1986. – 544 с.

4. *Поляков. В.Т.* Радиолюбителям о технике прямого преобразования. – М.: Патриот, 1990. – 264 с.

Надійшла 30.04.2007 р.