

ВИСОКОТОЧНІ АНАЛОГОВІ ПЕРЕМНОЖУВАЧІ З ПРОМІЖНИМ ПЕРЕТВОРЕННЯМ НАПРУГА-ЧАСТОТА

Запропоновано та описано схемну реалізацію аналогового помножувача на ефекті оберненої функції та аналогового помножувача з частотною модуляцією, досліджено їх роботу та оцінено точність.

This article proposes and describes the circuit implementation of analog multiplier effect on the inverse function of the analog multiplier and frequency modulation, studied their work and evaluated the accuracy

1. ФОРМУЛЮВАННЯ ПРОБЛЕМИ

Аналогові перемножувачі (АП) є найбільш поширеними після операційних підсилювачів аналоговими функціональними вузлами виміральної та обчислювальної техніки; з їх допомогою виконують модуляцію, демодуляцію, управління параметрами різних схем, обчислення й інше. Тому особливого значення набуває підвищення точності аналогових перемножувачів.

В останні десятиліття бурхливо розвивалися перетворювачі різних фізичних величин у частоту (ПНЧ), зокрема появились ПНЧ з дуже високими метрологічними характеристиками, а саме інтегруючі ПНЧ із стабілізацією ампер-секундної площі імпульса від'ємного зворотного зв'язку, які мають на даний час найвищу точність - їх основна похибка зменшена до 0,002% [1]. Використовуючи високі метрологічні характеристики згаданих ПНЧ, можна побудувати на їх основі аналогові перемножувачі підвищеної точності.

Дана стаття присвячена розробці високоточних аналогових перемножувачів з проміжним перетворенням напруга-частота.

2. АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕМНОЖУВАЧ НА ЕФЕКТІ ОБЕРНЕНОЇ ФУНКЦІЇ

Принцип дії розробленого нами АП полягає в тому, що результуюча передавальна функція замкнутої системи, охопленої від'ємним зворотним зв'язком, є оберненою до передавальної функції ланки від'ємного зворотного зв'язку, якщо передавальна функція розімкненого тракту прямує до нескінченості.

¹ Національний університет «Львівська політехніка»

² Політехніка Свентокшицька (м. Кельци, Польща)

У нашому випадку в колі від'ємного зворотного зв'язку АП використовуємо ПНЧ із стабілізацією ампер-секундної площі імпульса від'ємного зворотного зв'язку [1]. Вихідна частота такого ПНЧ

$$f = \frac{R_c \cdot f_{кг}}{R_i \cdot U_0 \cdot V} \cdot U_{вх}, \quad (1)$$

де $U_{вх}$ – вхідна напруга; V – коефіцієнт ділення дільника частоти у формуванні часу розряду; $f_{кг}$ – частота повторення імпульсів кварцового генератора, що тактує формувач часу розряду; R_c – значення опору струмозадаючого резистора джерела струму розряду; U_0 – опорна напруга джерела струму розряду; R_i – значення опору інтегратора.

Як видно з виразу (1), у передавальній функції ПНЧ, який входить у ланку від'ємного зворотного зв'язку, виконується операція ділення. Тому результуюча характеристика цілої системи, тобто АП, є операцією множення.

Структурна схема розробленого аналогового перемножувача на ефекті оберненої функції приведена на рис.1, де позначено: П1 - ІЗ - інтегратори; ДС – джерело струму розряду; Кл – ключ; К - компаратор; Ф – формувач часу розряду; КГ – кварцовий генератор високої частоти; ДЧ – дільник частоти; Т – D-тригер; ФРК – фазорозщеплюючий каскад; СН – стабілізатор напруги; С – суматор; П – підсилювач.

Розроблений АП [2] містить підсилювач-суматор на С і ІЗ, прецизійний перетворювач напруга-частота ПНЧ, перетворювач частота-напруга на СН і І2; ФРК і ДС утворюють перетворювач напруга-струм (ПНС).

Підсилювач-суматор є інтегруючого типу і виконаний на два входи, на один з яких подається перший вхідний сигнал (напруга), а на другий - сигнал від'ємного зворотного зв'язку з виходу перетворювача частота-напруга.

Прецизійний перетворювач напруга-частота належить до інтегруючого типу, із стабілізацією ампер-секундної площі імпульсу від'ємного зворотного зв'язку. Він містить інтегратор П1, компаратор К, генератор струму розряду ДС, формувач часу розряду Ф, діодно-транзисторний ключ Кл.

Фазорозщеплюючий каскад (ФРК) забезпечує перетворення вхідного сигналу у сигнал керування струмом ДС; сигнал керування підводиться до входу опорної напруги ДС.

Перетворювач частота-напруга виконаний у вигляді пасивного інтегратора І2 на резисторі та конденсаторі.

Для підвищення точності на вході перетворювача частота-напруга включено стабілізатор напруги СН, на прецизійному стабілітроні.

Розглядаючи аналоговий перемножувач як замкнуту систему автоматичного регулювання з від'ємним зворотним зв'язком, можна записати

$$U_b = U_3, \quad (2)$$

де U_b - напруга на першому вході підсилювача-суматора; U_3 - напруга на виході ланки зворотного зв'язку (перетворювача частота-напруга).

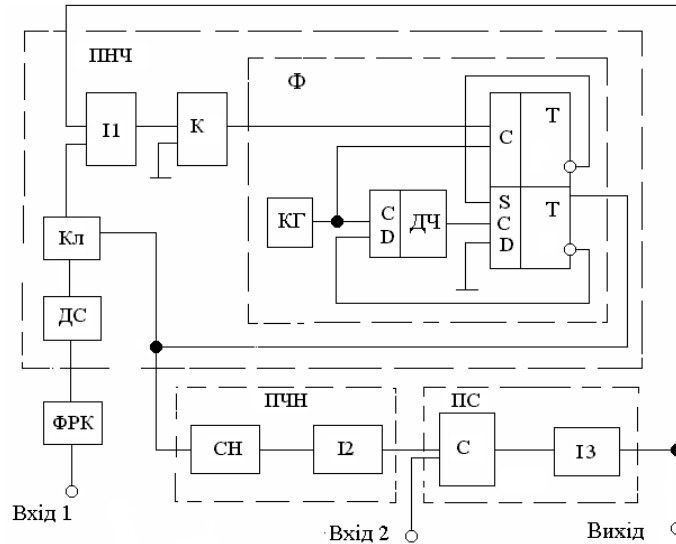


Рис. 1. Структурна схема аналогового перемножувача на ефекті оберненої функції

Напруга на виході ланки зворотного зв'язку матиме вигляд

$$U_3 = K_u \cdot f = K_u \frac{f_{кг} \cdot R_c}{\nu \cdot R_i} \cdot \frac{U_{an}}{U_a} = K_3 \cdot \frac{U_{an}}{U_a}, \quad (3)$$

де K_u - коефіцієнт перетворення перетворювача частота-напруга, U_a - другий вхідний сигнал; U_{an} - вихідна напруга аналогового перемножувача.

Коефіцієнт перетворення перетворювача частота-напруга

$$K_u = \frac{U_{пчн}}{f}, \quad (4)$$

де $U_{пчн}$ - вихідна напруга перетворювача частота-напруга.

Коефіцієнт перетворення ланки зворотного зв'язку

$$K_3 = K_u \cdot \frac{f_{кз} \cdot R_c}{\nu \cdot R_i} . \quad (5)$$

Таким чином, з формул (2) і (3) можемо записати

$$U_b = \frac{K_3 \cdot U_{an}}{U_a} . \quad (6)$$

Звідки знаходимо, що вихідна напруга розробленого аналогового перемножувача пропорційна добутку двох вхідних напруг U_a і U_b :

$$U_{an} = K_{an} U_a U_b , \quad (7)$$

де $K_{an} = \frac{1}{K_3}$.

Аналіз характеристик повної принципової схеми аналогового перемножувача і його окремих вузлів показав, що використовувати фазорозщеплюючий каскад на біполярному транзисторі недоцільно через різницю між значеннями струмів емітера та колектора. Використати як фазорозщеплюючий каскад польовий транзистор не достатньо через температурну залежність коефіцієнтів передачі напруги. Оптимальними будуть характеристики фазорозщеплюючого каскаду, виконаного на польовому транзисторі й операційному підсилювачі, причому цей каскад треба охопити від'ємним зворотним зв'язком з витоку польового транзистора на інвертуючий вхід операційного підсилювача, неінвертуючий вхід якого є другим входом аналогового перемножувача.

Оцінимо основну похибку АП, розглядаючи його як замкнену систему автоматичного управління з від'ємним зворотним зв'язком. Врахуємо, що прямий тракт має дуже великий коефіцієнт передачі, прямуючий практично до нескінченності. Отже, в такому випадку передавальна функція замкнутої системи

$$W_{3c} = \frac{W_{nm}}{(1 + W_{nm} \cdot W_{33})} \quad (8)$$

набуває вигляду

$$W_{3c} = \frac{1}{W_{33}} , \quad (9)$$

де W_{nm} - передавальна функція прямого тракту; W_{33} - передавальна функція ланки зворотного зв'язку.

Як впливає з останнього виразу, похибка перемножувача (δ_{an}) дорівнює похибці $W_{3\bar{n}}$, яка своєю чергою, дорівнює похибці W_{33} .

Оскільки в колі від'ємного зворотного зв'язку включено послідовно перетворювач напруга-частота та перетворювач частота-напруга, то сума їх відносних похибок визначатиме похибку аналогового перемножувача:

$$\delta_{an} = \delta_{пнч} + \delta_{пчн}. \quad (10)$$

Виконавши ПЧН у вигляді пасивного інтегратора на прецизійних резисторі та конденсаторі, одержимо похибку передаточної функції ПЧН

$$W_{пчн} = \frac{1}{1 + pRC}$$

як суму відносних похибок опору δ_R і конденсатора δ_C

$$\Delta_{пчн} = \delta_R + \delta_C. \quad (11)$$

Для прецизійних резистора R і конденсатора C відносні похибки не перевищують відповідно 0,001%/оС і 0,003%/оС. Тому основна похибка ПЧН не перевищуватиме 0,01%.

Похибка нелінійності пасивного інтегратора згідно з [3]

$$\delta_i = \frac{T}{2RC} \quad (12)$$

і при $RC \geq 500T$ не перевищує 0,1%. Тут T - період повторення вихідних імпульсів ПНЧ;

$$T = \frac{1}{f}.$$

Отже, розроблений аналоговий перемножувач на ефекті оберненої функції забезпечує основну похибку (з врахуванням похибки нелінійності) не більшу 0,1%.

3. АНАЛОГОВИЙ ПЕРЕМНОЖУВАЧ З ПОДВІЙНОЮ ЧАСТОТНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ.

З метою подальшого підвищення точності АП нами був запропонований [4] новий принцип побудови аналогових перемножувачів, а саме, на основі подвійної частотної модуляції.

Сутність такого перемноження зводиться до того, що один аналоговий вхідний сигнал модулює частоту першого ПНЧ, а другий – другого ПНЧ, для якого вихідна частота першого ПНЧ є тактовою.

На рис. 2 наведена структурна схема запропонованого аналогового перемножувача.

Запропонований аналоговий перемножувач містить перший перетворювач 1 напруга-частота з імпульсним зворотним зв'язком, виконаний на інтеграторі 2, компараторі 3, генераторі 4 струму, ключі 5, формувачі 6 часового інтервалу на генераторі 7 імпульсів, лічильнику 8 імпульсів і двох D-тригерах 9 і 10, першу вхідну шину 11 і другий перетворювач 12 напруга-частота з імпульсним зворотним зв'язком, виконаний на інтеграторі 13, компараторі 14, генераторі 15 струму, ключі 16, формувачі 17 часового інтервалу на лічильнику 18, двох D-тригерах 19 і 20, двох RS-тригерах 21 і 22, двох елементах "І" 23 і 24, другу вхідну шину 25, формувач коротких імпульсів 26, вихідну шину 27 і шину живлення 28.

Запропонований аналоговий перемножувач працює наступним чином.

Під дією сигналу на першій вхідній шині 11 на виході формувача коротких імпульсів 26 появляються імпульси, частота (F_a) яких рівна частоті повторення імпульсів на виході першого перетворювача 1 напруга-частота

$$F_a = \frac{I_a}{I_c V T_m}, \quad (13)$$

де I_a - вхідний струм інтегратора 2, що викликається сигналом на першій вхідній шині 11; I_c - струм генератора 4 струму; V - коефіцієнт переліку лічильника 8 імпульсів; T_m - період повторення тактових імпульсів на виході генератора 7.

Сигнал на другій вхідній шині 25 перетворюється другим перетворювачем 12 напруга-частота в частоту (F) повторення імпульсів

$$F = \frac{I}{I_p T_p}, \quad (14)$$

де I - вхідний струм інтегратора 13, що викликається сигналом на другій вхідній шині 25; I_p - струм генератора 15 струму; T_p - час розряду інтегратора 13, що рівний періоду повторення вихідних імпульсів першого 1 перетворювача напруга-частота, тобто

$$T_p = \frac{1}{F_a}. \quad (15)$$

Таким чином, частота повторення імпульсів на вихідній шині 27 запропонованого аналогового перемножувача прямо пропорційна добуткові сигналів на вхідних шинах 11 і 25

$$F = K I_a I, \quad (16)$$

де K - коефіцієнт пропорційності, що, виходячи із (13) – (15), рівний

$$K = \frac{1}{I_c I_p V T_m} . \quad (17)$$

Особливості роботи запропонованого аналогового перемножувала. У початковому стані тригер 20 знаходиться в стані логічного нуля на прямому виході, оскільки його D-вхід під'єднаний до спільної шини, а на його тактовий вхід весь час подаються через лічильник 18 імпульси генератора 7.

При спрацюванні компаратора 3 на виході елемента "Г" 24 появляється імпульс, що записує в лічильник 18 максимальне число та установлює тригер 22 у стан логічного нуля на прямому виході, яким дозволяє роботу лічильника 18 в режимі віднімання. Після цього кожен наступний тактовий імпульс з генератора 7 зменшує записане у лічильнику 18 число на одиницю до моменту спрацювання компаратора 14. Імпульс з виходу компаратора 14 подається на D-вхід тригера 19, а також - перекидає тригер 21 у стан логічної одиниці, якою лічильник 18 переводиться у режим зберігання. Перший же після цього моменту тактовий імпульс генератора 7 переводить тригер 19 у стан логічної одиниці, якою тригер 20 установлюється в стан логічної одиниці на прямому виході тривалість імпульсу на прямому виході тригера 20 і є часом розряду Тр інтегратора 13.

При наступному імпульсі на виході першого 1 перетворювача напруження-частота і відповідно - на виході формувача коротких імпульсів 26 на виході елемента "Г" 23 формується логічна одиниця, яка перекидає тригер 21 у стан логічного нуля, дозволяючи роботу лічильнику 18, і - тригер 22 у стан логічної одиниці, дозволяючи роботу лічильника в режимі додавання. З цього моменту число, записане у лічильнику 18, збільшується на одиницю з кожним тактовим імпульсом генератора 7. В момент переповнення лічильника 18 імпульс з його виходу перекидає тригер 20 у стан логічного нуля на прямому виході, тобто закінчується час розряду Тр інтегратора 13.

Наступний імпульс з виходу формувача коротких імпульсів 23 формує на виході елемента "Г" 24 логічну одиницю, якою записується максимальне число у лічильник 18 і перекидається тригер 22 у стан логічного нуля, дозволяючи роботу лічильника 18 в режимі віднімання.

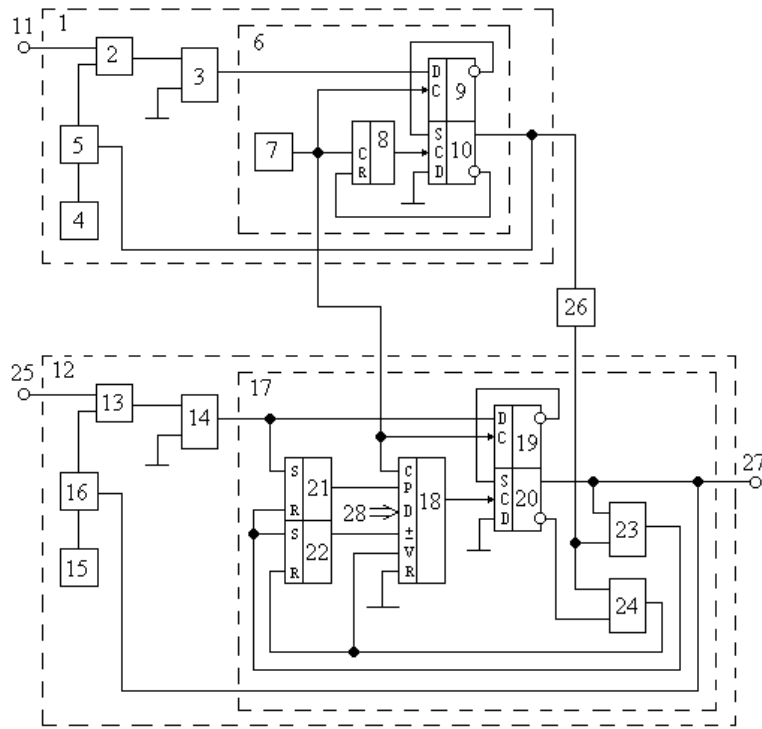


Рис. 2. Структурна схема аналогового перемножувача з подвійною частотною модуляцією

Далі процес повторюється.

Наприклад, в експериментально дослідженому макеті аналогового помножувача з подвійною частотною модуляцією за схемою рис.2 при частоті кварцового тактового генератора 10 МГц, коефіцієнтах переліку лічильників 8 і 18 відповідно 100 і 1000, вхідних сигналах на входах 11 і 25 відповідно 0 - 10 В і 0 - 10 В вихідний сигнал був у діапазоні 0 - 10 кГц з основною похибкою помноження не більшою 0,0025% (при часі виміру частоти, рівному 1 с).

Перевірка діючого макету запропонованого аналогового помножувача здійснювалася за допомогою калібратора постійної напруги типу ПЗ27 (виробництво ВО Краснодарський ЗИП, 8 декад, від 10 В до 1 мкВ, основна похибка на перших п'яти декадах у межах 2·10⁻⁴%) і цифрового частотоміра ЧЗ-34 (виробництво ВО ЛОРТА м. Львова, основна похибка не перевищує 2·10⁻⁵%).

4. ВИСНОВКИ

1. Розроблені нами аналогові перемножувачі на ефекті оберненої функції мають просту схемну реалізацію та забезпечують основну похибку (з врахуванням похибки нелінійності) не більшу 0,1% при входних сигналах 0 - 10 В.

2. Розроблені нами аналогові перемножувачі з подвійною частотною модуляцією та проведені дослідження дозволяють стверджувати, що при використанні сучасної елементної бази можна отримати похибку таких АП 0,0025% і навіть краще.

3. На даний час найвищу точність забезпечують аналогові перемножувачі з подвійною частотною модуляцією – порівняно з найточнішими АП інших класів, зокрема АП з широтно-імпульсною модуляцією, їх точність більше ніж у 10 разів вища.

1. Патент 11851 Україна. Вимірювальний перетворювач з частотним вихідним сигналом/ Мичуда З.Р., Бучма І.М., Мокренко П.В.- 1996, бюл.4.
2. Влах Г.І., Мичуда З.Р. Аналоговий перемножувач на ефекті оберненої функції// Міжнародна НТК «Контроль і управління в технічних системах». Тези доповідей.- Вінниця, 1995, ч.2. 3. Мичуда З.Р. Расчет электронных устройств автоматики и телемеханики. -Л.: ЛПИ,1983.- 88 с. 4. Мичуда З.Р., Дудикевич В.Б., Влах Г.І. Аналоговий помножувач: Патент 39126 Україна.- 2001, Бюл.№5.