УДК 534.6

Ю.Л. Денисюк, інж.
Р.О. Коломієць, доц.
Житомирський державний технологічний університет

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОДУЛЯЦІЇ–ДЕМОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ ПОБУДОВИ ПІДСИЛЮВАЧІВ З КОМПЕНСАЦІЄЮ ВЛАСНИХ ШУМІВ

(Представлено д.т.н., проф. Манойловим В.П.)

Представлено ефективний метод компенсації власних шумів підсилювача та зовнішніх паразитних наведень. Наведено структурну схему підсилювача низьких частот, який побудований з використанням принципів диференційного підсилення та модуляції–демодуляції (МДМ).

Актуальність та постановка проблеми. Сучасні електрофізіологічні дослідження в медицині потребують виявлення сигналів на фоні наведень від електрообладнання та власних шумів підсилювача. Умови виділення інформативних сигналів ускладнюються тією обставиною, що більша частина потужності цих сигналів зосереджена в діапазоні 0,1–300 Гц, тобто в межах дії, з одного боку, силової мережі 50 Гц та її гармонік та, з другого боку, флікер-шумів підсилювача, спектральна густина потужності якого обернено пропорційна смузі частот [1].

Викладення основного матеріалу. Суть методу полягає в такому (рис. 1). Сигнал, що знімається з біологічного об'єкта за допомогою модулятора МОД перетворюється в періодичну послідовність різнополярних імпульсів, скважність яких Q = 2, а амплітуда дорівнює фактичному значенню сигналу. Далі сигнал підсилюється за допомогою підсилювача високої частоти ПВЧ. При цьому шуми та паразитні наведення не приймають участь у модуляції та носять адитивний характер. Демодулятор, що працює синхронно з модулятором, не реагує на адитивні складові сигналу (вони взаємно компенсуються в парних та непарних тактах) і на виході підсилювача буде тільки підсилений сигнал. Застосування інвертора ІНВ, який інвертує фазу сигналу на 180° дозволяє виконати ДЕМ за так званою двонапівперіодною схемою, що дозволяє ефективно компенсувати шуми та дрейфи ПВЧ, а також паразитні зовнішні наведення.

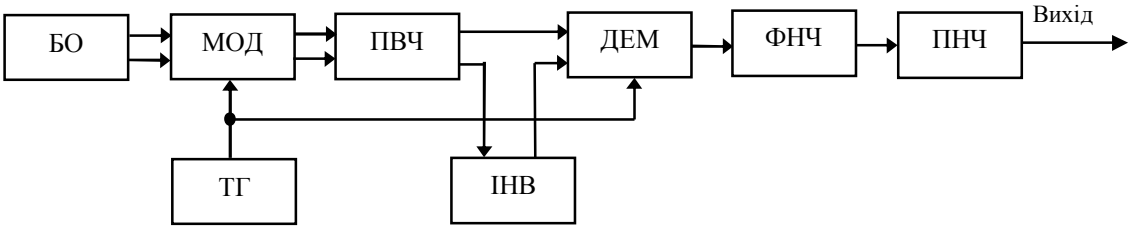

Рис. 1. Структурна схема підсилювача МДМ з компенсацією власних шумів: БО – біологічний об'єкт; МОД – модулятор; ПВЧ – підсилювач високої частоти; ТГ – тактовий генератор; ІНВ – інвертор; ДЕМ – демодулятор; ФНЧ – фільтр нижніх частот; ПНЧ – підсилювач нижніх частот

Після ДЕМ сигнал проходить через фільтр нижніх частот ФНЧ та подається на підсилювач нижніх частот ПНЧ, який забезпечує додаткове підсилення сигналу.

Сигнал на виході ПВЧ можна виразити формулою:

$$U(t)_{ÏÂ×} = U_{âõ} K_{ÏÂ×} \operatorname{sign}(\sin(\omega_0 t)), \quad (1)$$

де $U_{вх}$ – сигнал на вході модулятора; $K_{ПВЧ}$ – коефіцієнт підсилення ПВЧ; $\operatorname{sign}(\sin(\omega_0 t))$ – знак (±1), що періодично змінюється з коловою частотою тактового генератора ω_0.

Сигнал після модулятора ПВЧ представлений на часовій діаграмі (рис. 2).

Як бачимо, огинаюча на виході ПВЧ нагадує форму вхідного сигналу, але спотворену, оскільки в даному випадку ми маємо справу з так званою модуляцією із "подавленою несучою" [2]. Форма сигналу відновлюється в синхронному демодуляторі ДЕМ. З виходу ПВЧ сигнал поступає на ДЕМ, а також на інвертор ІНВ, який інвертує фазу вхідного сигналу на 180° і повторює амплітуду вхідного сигналу ($K_{ІНВ} = -1$). Застосування інвертора дозволяє виконати ДЕМ за так званою двонапівперіодною схемою, що, в свою чергу, дозволяє ефективно компенсувати власні шуми та дрейфи ПВЧ, а також паразитні зовнішні наведення.

 © Ю.Л. Денисюк, Р.О. Коломієць, 2011

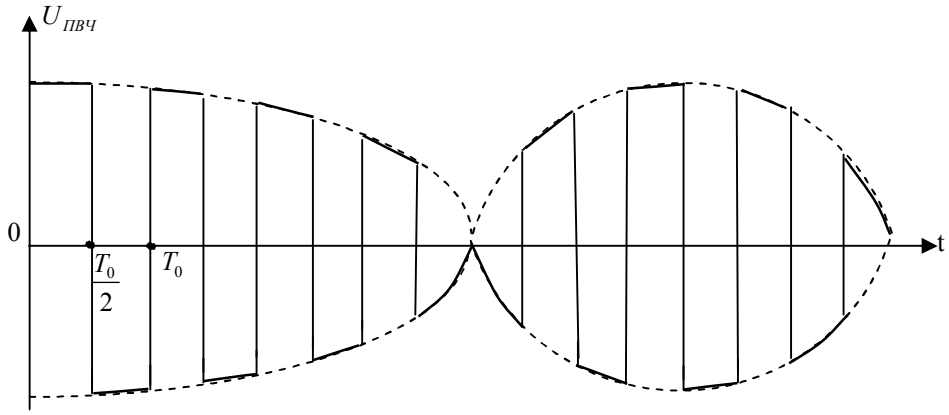

Рис. 2. Часова діаграма сигналу після модулятора ПВЧ

Розглянемо роботу ДЕМ детально. В кожний "непарний" такт роботи ДЕМ через відповідний відкритий ключ ДЕМ сигнал з виходу ПВЧ поступає на вхід ФНЧ. У кожний "парний" такт сигнал з виходу ПВЧ через інвертор ІНВ, що інвертує полярність сигналу через відповідний відкритий ключ поступає на вхід ФНЧ. Задача ФНЧ – згладити комутаційні сплески, які виникають під час перемикання ключів ДЕМ та заглушує високі частоти, що виникають при роботі синхронного демодулятора ДЕМ (рис. 3) [3].

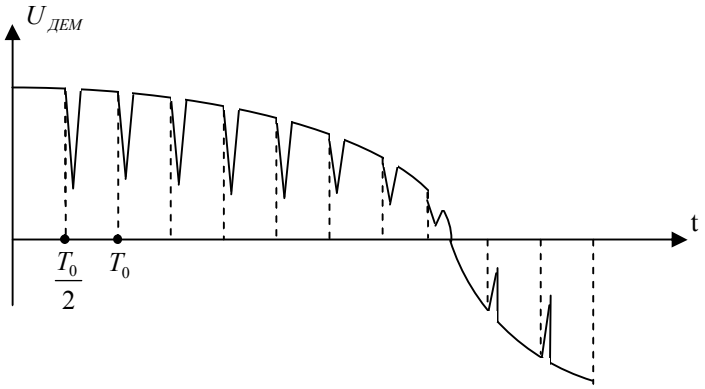

Рис. 3. Часова діаграма роботи демодулятора

Коефіцієнт передачі синхронного демодулятора ДЕМ (разом з інвертором), так само як і модулятора, дорівнює:

$$K_{ДЕМ} = \text{sign}(\sin(\omega_0 t)), \tag{2}$$

тобто, в кожному непарному такті $K_{ДЕМ} = 1$, в кожному парному такті $K_{ДЕМ} = -1$.

Тоді сигнал на виході МДМ-підсилювача має вигляд:

$$\begin{aligned} U_{âèõ} &= U_{âõ} K_{ÏÂ\times}\ K_{ÏÏÄ}\ \ K_{ÄÅÌ} = U_{âõ} K_{ÏÂ\times} \cdot \text{sign}(\sin(\omega_0 t)) \cdot \text{sign}(\sin(\omega_0 t)) = \\ &= U_{âõ} K_{ÏÂ\times} \cdot \text{sign}(\sin(\omega_0 t))^2 = U_{âõ} K_{ÏÂ\times}\ . \end{aligned} \tag{3}$$

Як бачимо, на виході МДМ-підсилювача немає комбінаційних та гармонічних продуктів (якщо зважати тільки на математичні викладки). На практиці на виході ДЕМ маємо комутаційні сплески з подвійною тактовою частотою, що виникають під час перемикання ключів демодулятора (рис. 3).

Сигнали шуму та зовнішніх наведень не приймають участі у модуляції, тому на виході ПВЧ їхня дія проявляється як відносно повільна адитивна складова до меандру, що виникає під дією сигналу [4, 5].

За такої форми шуму сигнал на виході ДЕМ виглядає як промодульований шумом меандр з тактовою коловою частотою ω_0, що легко заглушити за допомогою ФНЧ. Тобто, за умови $\omega_0 >> \omega_ш$, складові шуму в парному та непарному тактах взаємно анулюються (за допомогою ФНЧ), в той час складові сигналу взаємно додаються [2].

Коефіцієнт передачі синхронного демодулятора можливо розкласти в ряд Фур'е:

$$K_{ÄÄÌ} = \mathrm{sign}\left(\sin(\omega_0 t)\right) = \frac{4}{\pi}\left(\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{3}\sin(3\omega_0 t) + \frac{1}{5}\sin(5\omega_0 t) + \ldots\right) = \frac{4}{\pi}\sum_{n=odd}^{\infty}\frac{\sin(n\omega_0 t)}{n}, \quad (4)$$

де $n = 1,\ 3,\ 5,\ \ldots$ – непарні гармоніки.

Складові шуму з близькими до тактової частоти ω_0, перемножуючись з $K_{ДЕМ}$, утворюють на виході демодулятора комбінаційні продукти з коловими частотами $n(\omega_0 \pm \omega_ш)$ (так звані сумарні та різницеві) [3, 4]. Складові шуму з сумарними частотами надійно відсікаються за допомогою ФНЧ, а складові з різницевими частотами можливо описати формулою:

$$U_{ДЕМ-} = U_ш \sin(\omega_ш t) = \frac{4}{\pi}\sum_{n=odd}^{\infty}\frac{\sin(n\omega_ш t)}{n}, \quad (5)$$

де $U_ш$ – амплітуда квазісинусоїдних складових шуму з частотами, що близькі до $\omega_0,\ 3\omega_0,\ 5\omega_0 \ldots n\omega_0$, де n – непарне.

Після перемноження маємо:

$$U_ш K_{ДЕМ} = U_ш \cdot \frac{2}{\pi}\left(\cos(\Delta\omega_1 t) + \frac{1}{3}\cos(\Delta\omega_3 t) + \frac{1}{5}\cos(\Delta\omega_5 t) + \ldots\right) = U_ш \cdot \frac{2}{\pi}\sum_{n=odd}^{\infty}\frac{\cos(\Delta\omega_n t)}{n}, \quad (6)$$

де $\Delta\omega_1 = \omega_0 - \omega_ш$; $\Delta\omega_3 = 3(\omega_0 - \omega_ш)$; $\Delta\omega_n = n(\omega_0 - \omega_ш)$ (n – непарні).

Як відомо, коефіцієнт передачі ФНЧ дорівнює [2, 3]:

$$K_{ФНЧ} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{зр}}\right)^{2m}}}, \quad (7)$$

де ω – довільна частота сигналу на вході фільтра; $\omega_{зр}$ – частота зрізу АЧХ, тобто смуга пропускання ФНЧ; m – порядок фільтра.

У простому випадку $\omega_{зр} = \frac{1}{RC}$, де RC – стала часу елементарного інтегруючого RC-кола.

Під час роботи синхронного демодулятора виникають різницеві частоти і тому коефіцієнт передачі ФНЧ для нього виглядає так [4, 5]:

$$K_{ФНЧ} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\Delta\omega_n \cdot RC)^{2m}}}. \quad (8)$$

З урахуванням (6) в результаті отримаємо:

$$K_{ДЕМ} \cdot K_{ФНЧ} = \frac{2}{\pi\sqrt{1 + (\Delta\omega_n \cdot RC)^{2m}}} \cdot \sum_{n=odd}^{\infty}\frac{\cos(\Delta\omega_n t)}{n}. \quad (9)$$

Якщо різницеві складові шуму знаходяться в смузі пропускання ФНЧ, вони будуть накладатися на підсилювальний сигнал як низькочастотний шум. Амплітудно-частотна характеристика демодулятора в асинхронному режимі надана на рисунку 4. Як бачимо, демодулятор заглушує дрейфи та низькочастотні шуми. Але на частотах близьких до $\omega_0, 3\omega_0, 5\omega_0 \ldots$ – тобто непарних гармонік – є вікна прозорості, або піки АЧХ, що затухають з підвищенням частоти.

Ширина цих вікон залежить від смуги пропускання ФНЧ. Не слід забувати, що на виході ДЕМ присутні тільки комбінаційні (різницеві) частоти, що потрапляють у смугу пропускання ФНЧ.

Саме завдяки цим вікнам прозорості в модуляторі та демодуляторі виконується модуляція, підсилення та демодуляція сигналу в синхронному режимі. Складові сигналу, що додаються арифметично, забезпечують коефіцієнт передачі $K_{ДЕМ} = 1$ для сигналу (пунктирна крива на рисунку 4). Складові шуму додаються геометрично, тому застосування меандру як несучої при синхронній модуляції–демодуляції забезпечує виграш по відношенню сигнал/шум (порівняно з синусоїдною несучою). Моделювання роботи МДМ-підсилювача на основі мікросхеми LF355 [7] (рис. 4) проведено в середовищі MathCAD 11 [8].

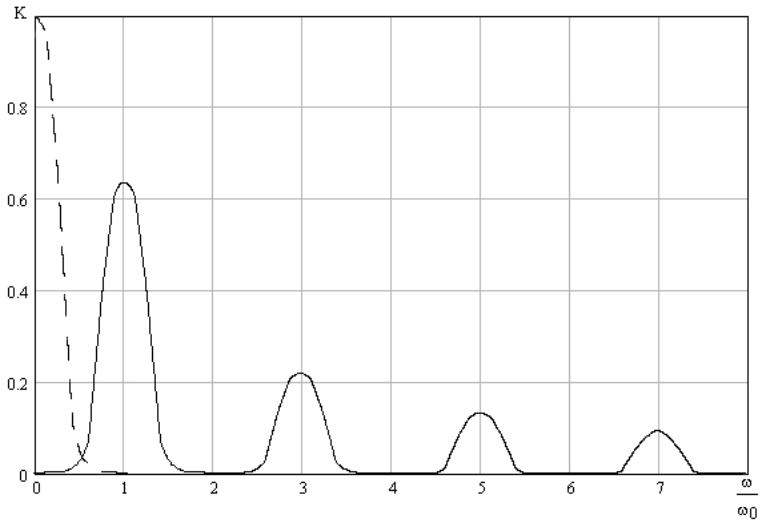

Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика демодулятора з ФНЧ

З урахуванням випадкового характеру шуму треба вважати [6], що квазісинусоїди з частотами $\Delta\omega_1, \Delta\omega_3, ..., \Delta\omega_n$ статистично не корельовані, знак арифметичної суми у виразі (9) потрібно замінити середньоквадратичною сумою:

$$K_{ДЕМ} \cdot K_{ФНЧ} = \frac{2}{\pi\sqrt{1+(\Delta\omega_n \cdot RC)^{2m}}}\sqrt{(\cos(\Delta\omega_1 t))^2 + \left(\frac{1}{3}\cos(\Delta\omega_3 t)\right)^2 + ... + \left(\frac{1}{n}\cos(\Delta\omega_n t)\right)^2}. \quad (10)$$

Після підрахунку середньоквадратичної суми виразу (9) отримаємо:

$$K_{ДЕМ} \cdot K_{ФНЧ} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{1{,}11}{\sqrt{1+(\Delta\omega_n \cdot RC)^{2m}}} = \frac{0{,}707}{\sqrt{1+(\Delta\omega_n \cdot RC)^{2m}}}. \quad (11)$$

Порівнявши $K_{ДЕМ} = 1$ для сигналу і $K_{ДЕМ} = 0{,}707$ для сумарного шуму, бачимо виграш в 1,414 рази або в 3 дБ.

Висновки. Використання описаного методу дає можливість реалізувати в повному обсязі головну перевагу диференційного підсилювача – високий ступінь ослаблення синфазного сигналу. Диференційний підсилювач, виконаний за класичною схемою [4, 7] потребує використання прецизійних резисторів, оскільки від точності співвідношення їх опорів залежить коефіцієнт ослаблення синфазного сигналу.

У випадку використання МДМ-підсилювача нерівність інвертованого та неінвертованого коефіцієнтів підсилення ПВЧ виявиться як адитивна складова на виході ПВЧ, що компенсується в синхронному демодуляторі.

Таким чином, використання методу МДМ для побудови підсилювачів НЧ дозволяє ефективно компенсувати НЧ шуми та зовнішні наведення, а ВЧ складові шуму, попадаючи на синхронний демодулятор, детектуються з ослабленням 3 дБ.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Макс Ж.* Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях / *Ж.Макс.* – М. : Мир, 1983. – Т. 2. − 244 с.
2. *Баскаков С.И.* Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов / *С.И. Баскаков.* − М. : Высшая школа, 2000. − 480 с.
3. *Зиновьев А.Л.* Введение в теорию сигналов и цепей : учеб. пособие для вузов / *А.Л. Зиновьев, Л.И. Филиппов.* − М. : Высшая школа, 1975. − 264 с.
4. *Достал И.* Операционные усилители / *И.Достал.* – М. : Мир, 1982. – 358 с.
5. *Гутников В.С.* Применение операционных усилителей в измерительной технике / *В.С. Гутников.* − М. : Энергия, 1975. − 258 с.
6. *Отт Г.* Методы подавления шумов и помех в электронных системах : пер. с англ. / *Г.Отт* ; под ред. *М.В. Гальперина*. – М. : Мир, 1979. – 317 с.
7. *Mancini R.* Op Amps for Everyone / *R.Mancini*. – Texas Instruments Inc, 2002. – 486 p.

8. *Яньков В.Ю.* Лабораторный практикум по моделированию в пакете MathCAD / *В.Ю. Яньков, Н.А. Якушина*. – М. : МГТУ, 2009. – 69 с.

ДЕНИСЮК Юрій Леонідович – інженер кафедри радіотехніки і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- радіовимірювання з використанням цифрових методів.

КОЛОМІЄЦЬ Роман Олександрович – доцент кафедри радіотехніки і телекомунікацій Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- застосування методу газорозрядної візуалізації в медицині та інших галузях;
- фізика живого.

Подано 25.11.2011