

УДК 621.317

В.П. Квасніков, д.т.н.,
Д.П. Орнатський, к.т.н.,
О.І. Осмолівський, к.т.н.

ЧАСТОТНИЙ ДЕМОДУЛЯТОР З ПОКРАЩЕНИМИ ДИНАМІЧНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ ТА ЗАВАДОЗАХИЩЕНІСТЮ НА ОСНОВІ ШИРОКОСМУГОВОЇ ФАПЧ

В статті запропоновано структуру частотного демодулятора на базі широкосмугової ФАПЧ та проведено її порівняльний аналіз з класичним широкосмуговим частотним демодулятором на основі компаратора та зворотнім перетворюванням періоду в напругу. Одержано результати, які підтверджують, що запропонована система формує вихідні демодульовані сигнали при будь-яких співвідношеннях сигнал/шум на вході з меншими динамічними похибками відновлення незалежно від спектрального складу оброблюваного сигналу навіть за наявності флікер-шумів, які цілком руйнують інформацію при використанні звичайного метода частотної демодуляції.

Ключові слова: частотна модуляція, завадозахищеність, ФАПЧ, динамічні похибки, флікер-шуми.

Вступ

Сьогодні використання вузькосмугових каналів зв'язку (наприклад, телефонних ліній) не дозволяє, використовуючи найбільш поширений спосіб завадозахищеної передачі інформації, такий як кодо-імпульсна модуляція, передавати вимірювальні сигнали, спектр яких перевищує десятки долі герца, що спонукає шукати інші можливості вирішення цієї проблеми.

Метою статті є викладення запропонованого методу демодуляції частотно модульованих сигналів, який дозволяє передавати корисну інформацію, ширина спектру яких наближається до частоти несучого коливання, що дозволяє розширити спектр корисного сигналу в сотні разів при інших рівних умовах.

Аналіз існуючих досліджень і публікацій. Завдяки властивості придушувати зовнішні завади системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) сьогодні широко використовуються при передачі інформації як в аналоговій (ЧМ), так і в цифровій формі (інтернет-модеми). Ця властивість зумовлена принципом дії класичної системи ФАПЧ, яка фактично є автоматичною системою другого порядку регулювання частотою керованого генератора за середнім значенням вихідної напруги вхідного фазового детектора (за наявності фільтра першого порядку на виході фазового детектора) [1-5].

Зазвичай в якості фазового детектора в таких випадках використовується синхронний детектор гармонійного або ключового типу. Першому притаманна висока завадозахищеність, вибірковість, добротність у випадку, якщо вихідний сигнал керованого генератора є гармонійним, а фільтр нижніх частот має значну постійну часу. Це можна з'ясувати з таких співвідношень для діапазонів слідкування $\Delta\omega_c$ та захоплення $\Delta\omega_3$ системи ФАПЧ [3]:

$$\Delta\omega_3 \approx K_r K_d |F(j\Delta\omega_3)|, \quad (1)$$

де K_r – коефіцієнт передачі керованого генератора; K_d – коефіцієнт передачі синхронного детектора; $|F(j\Delta\omega_3)|$ – передатна функція фільтра нижніх частот на частоті ω , яка дорівнює діапазону захоплення $\Delta\omega_3$. Для простого пасивного фільтра першого порядку з постійною часу τ зв'язок $\Delta\omega_3$ з діапазоном слідкування $\Delta\omega_c$ описується приблизним рівнянням:

$$\Delta\omega_3 \approx \pm \sqrt{\Delta\omega_c / \tau}, \quad (2)$$

тобто чим більша постійна часу τ , тим вужчий діапазон захоплення ФАПЧ.

Таким чином, в класичних системах ФАПЧ достатньо потужна фільтрація продуктів фазового детектування на вході керованого генератора спонукає використовувати високочастотні генератори, які керуються миттєвими значеннями вхідної напруги $f = U_{ex} / (R_0 I_0 \Delta t_0)$, що і визначає їх первинне використання в радіочастотному діапазоні.

При цьому відношення частотної смуги каналу до смуги корисного сигналу сягає кількох тисяч і більше. Це означає, що у випадку, коли частотна смуга ліній зв'язку, в якості яких сьогодні використовуються переважно дротові (телефонні) лінії, смуга частот корисного

сигналу при використанні класичних систем ФАПЧ буде меншою навіть за 1 Гц при значних динамічних похибках (в декілька відсотків), що в більшості випадків не задовольняє вимоги сучасних АСУТП [3]. Це робить актуальною проблему частотної демодуляції сигналів за наявності значних зовнішніх завад в низькочастотній частині спектру, в якому класичні методи боротьби з шумом втрачають свою ефективність через домінуючий вплив фліккер-шумів.

Відомим рішенням проблеми можна назвати систему ФАПЧ (аналогову з керованим генератором типу функціонального генератора з переключенням напрямку інтегрування вхідного сигналу), в якій розширення смуги захоплення досягається ціною виникнення пульсацій на вході керованого генератора виключенням фільтра нижніх частот, однак в цьому випадку через наявність від'ємного зворотного зв'язку пульсації на виході синхронного детектора модулюються по частоті керованим генератором з подвійною частотою сигналу, що призводить до спотворення форми синусоїди. Для прямокутних імпульсів спотворюється їх скважність. Це спонукає зменшувати чутливість лінійної ланки, що суттєво звужує діапазон захоплення (див. формулу 2). Тому такий підхід знаходить обмежене використання в системах підтримання частоти керованого генератора на певному рівні.

Одним з можливих методів вирішення цієї проблеми є використання в якості частотного демодулятора широкосмугової швидкодіючої системи ФАПЧ (рис. 1), яка буде відрізнятися тим, що функції фільтра нижніх частот і керованого генератора поєднуються в перетворювачі напруга-частота з імпульсним зворотнім зв'язком, тобто з негативним зворотнім зв'язком по інформативному параметру. Фільтруючі властивості такого перетворювача можуть бути представлені залежністю коефіцієнта пригнічення завади нормального вигляду від частоти, властивого АЦП інтегруючого типу (який зазвичай будується на базі таких перетворювачів), тобто в стані захоплення завади на виході синхронного детектора стають синхронними по відношенню до вхідного сигналу і пригнічуються в десятки тисяч разів. Враховуючи високу лінійність перетворювача стан захоплення настає на протязі 1-2 періодів вхідного сигналу після стрибкоподібної зміни частоти вхідного сигналу, що забезпечує високі динамічні властивості системи, а також зменшує відношення смуги каналу до смуги корисного сигналу до кількох одиниць, що має беззаперечну практичну цінність.

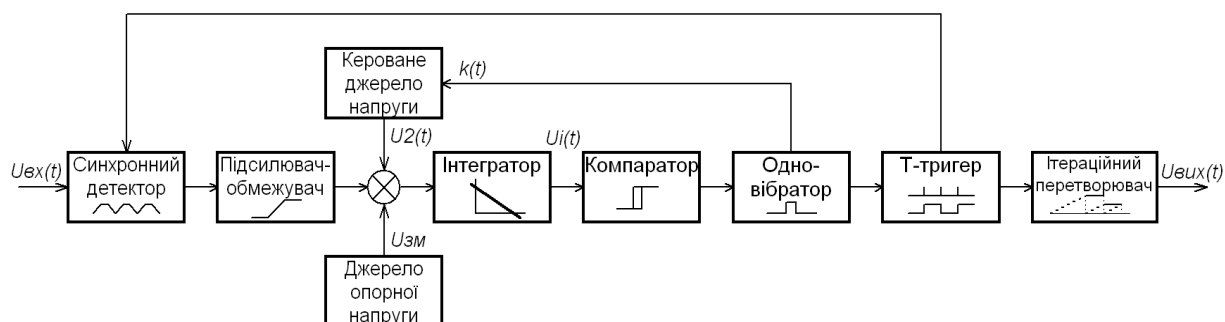


Рис. 1. Структурна схема частотного демодулятора з широкосмуговою ФАПЧ.

Для кількісного аналізу параметрів запропонованої системи, представленої на рис. 1, скористуємося моделлю, представленою рівнянням:

$$\tau_I \frac{dU_I(t)}{dt} = (-1)^n U_{вх}(t) + U_2(t) + e_{ш}(t) - U_{зм}, \quad (3)$$

де τ_I – постійна часу інтегратора; $U_I(t)$ – вихідна напруга інтегратора; $U_{вх}(t) = U_m \sin(\omega t)$ – несуча складова вхідного сигналу демодулятора амплітудою U_m і частотою ω ;

$$U_2(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } U_I < U_0, \\ kU_0, & \text{при } U_I \geq U_0 \text{ на протязі фіксованого інтервалу часу } \Delta t_0; \end{cases}$$

$e_{ш}(t)$ – випадкова складова вхідного сигналу; $U_{зм}$ – напруга початкового зміщення інтегратора; n – номер досліджуваного періоду вихідної напруги інтегратора.

Рівняння (3), таким чином, являє собою диференціальне рівняння зі змінними параметрами, яке, як відомо, вирішується тільки чисельними методами. Тому розглянемо вирішення цього рівняння і дослідження різних систем демодуляторів в середовищі Matlab.

На діаграмах рис. 2-5 представлено результати порівняльного моделювання роботи звичайної системи частотної демодуляції (перший варіант – *а*) та запропонованої системи на основі широкосмугової ФАПЧ (другий варіант – *б*). Діаграми ілюструють реакцію кожної із систем на одні і ті ж вхідні сигнали, в набір яких входять комбінації модульованих сигналів і шумів з різним спектральним складом.

Позначення сигналів на діаграмах *а* (для звичайного демодулятора): 1 – вихідний сигнал, пропорційний поточній частоті (результат демодуляції), 2 – вхідний сигнал (суміш частотно-модульованого сигналу і шумів), 3 – сигнал компаратора; на діаграмах *б* (для запропонованого варіанта): 1 – вихідний сигнал демодулятора, 2 – сигнал на виході синхронного детектора, 3 – сигнал керування синхронним детектором, 4 – вихідний сигнал інтегратора.

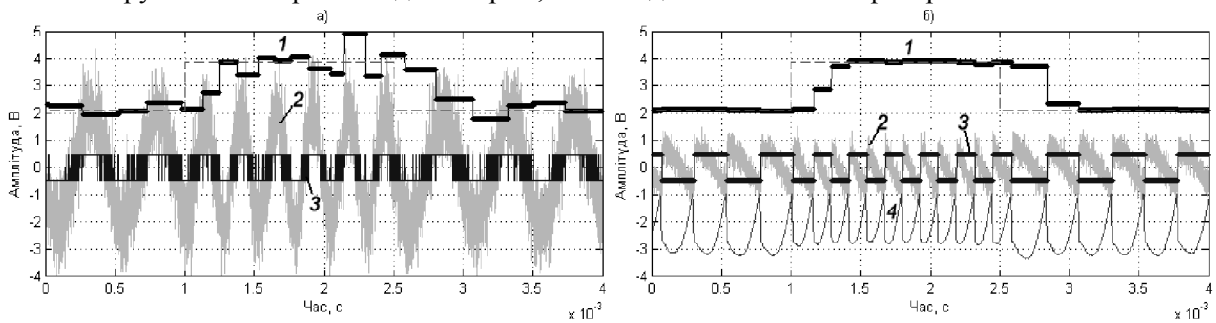


Рис. 2. Порівняння роботи звичайного (*а*) і запропонованого (*б*) демодуляторів в умовах дії значних широкосмугових шумів і стрибкоподібній зміні частоти несучої (2-4 кГц)

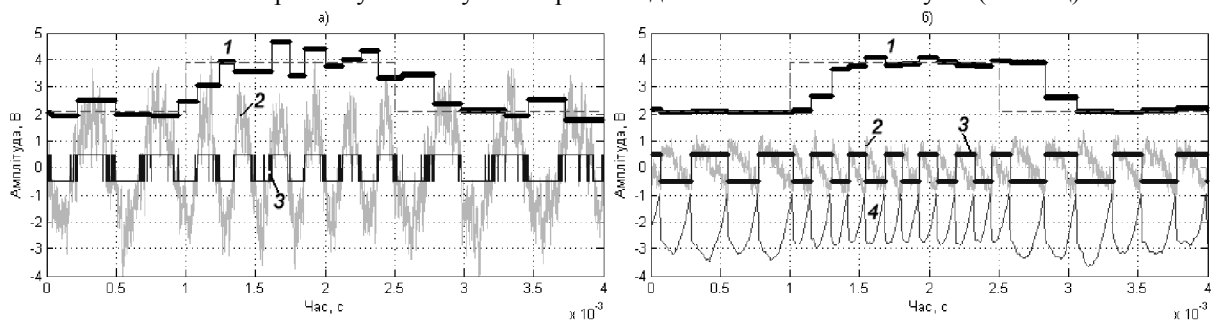


Рис. 3. Порівняння роботи звичайного (*а*) і запропонованого (*б*) демодуляторів в умовах дії фліккер-шумів і стрибкоподібній зміні частоти несучої (2-4 кГц)

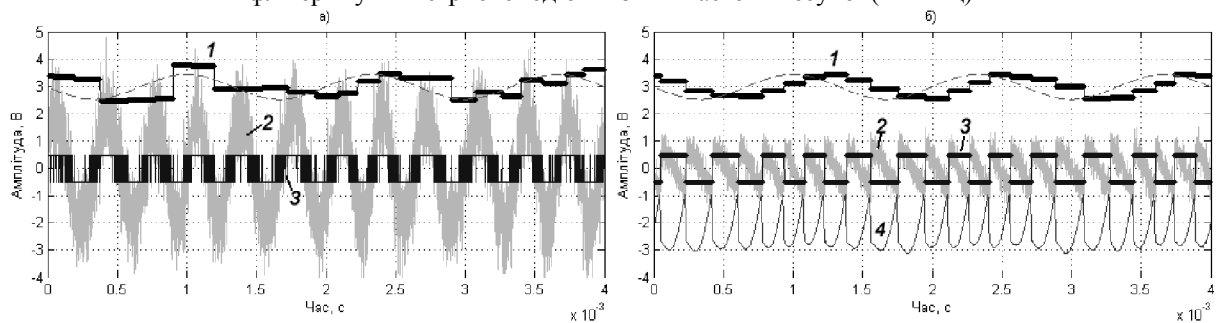


Рис.4. Робота звичайного (*а*) і запропонованого (*б*) демодуляторів в умовах дії широкосмугових шумів і гармонійній модуляції несучої вчетверо меншою частотою (0,75 кГц).

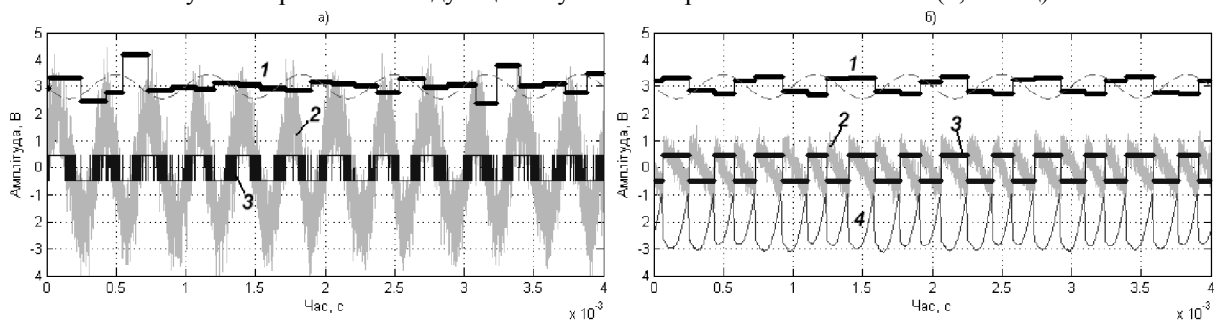


Рис. 5. Робота звичайного (*а*) і запропонованого (*б*) демодуляторів в умовах дії широкосмугових шумів і гармонійній модуляції несучої вдвічі меншою частотою (1,5 кГц).

В таблиці 1 представлено усереднені дані, що в числовій формі ілюструють показники якості роботи двох розглянутих варіантів частотних демодуляторів в порівнянні.

Таблиця 1

Порівняльні дані роботи звичайного і запропонованого частотних демодуляторів

№	Складові вхідного сигналу	Співвідношення ефективних значень сигнал/шум на вході, dB	Вихідне співвідношення сигнал/шум за 1-м варіантом, dB	Вихідне співвідношення сигнал/шум за 2-м варіантом, dB	Коефіцієнт шуму за 1-м варіантом, dB	Коефіцієнт шуму за 2-м варіантом, dB	Порівняння СКЗ вихідних шумів (похибок) за 1-м і 2-м варіантами
<i>Немодульовані сигнали з завадами</i>							
1	Білий шум і стала несуча 3 кГц	8,0	19,2	39,4	-11,2	-31,5	10,40
2	Білий шум і стала несуча 3 кГц	34,0	45,0	57,2	-11,0	-23,2	4,00
3	Рожевий шум і стала несуча 3 кГц	6,9	16,8	25,0	-9,9	-18,1	2,58
4	Шум відсутній, тільки несуча 3 кГц	–	57,7	61,9	–	–	1,67
<i>Модульовані сигнали з завадами (білий шум)</i>							
5	Гармонійний модулюючий сигнал 0,33 кГц	8,1	18,0	24,2	-9,9	-16,2	2,05
6	Гармонійний модулюючий сигнал 0,75 кГц	7,9	16,5	18,2	-8,6	-10,3	1,21
7	Гармонійний модулюючий сигнал 1,5 кГц	8,1	13,4	15,0	-5,3	-7,0	1,21
<i>Перехідні модульовані сигнали без завад</i>							
8	Стрибок несучої частоти 2,5-3,5 кГц без шуму	–	21,0	19,6	–	–	0,86
9	Стрибок несучої частоти 2,0-4,0 кГц без шуму	–	9,1	8,6	–	–	0,94

З результатів досліджень, які представлені вище, можна зробити висновки, що запропонована система формує вихідні частотно-демодульовані сигнали при будь-яких співвідношеннях сигнал/шум на вході з меншими динамічними похибками відновлення незалежно від спектрального складу оброблюваного сигналу, тобто навіть за наявності флікер-шумів, які повністю руйнують інформацію при використанні звичайного частотного демодулятора.

Висновки. Наведена в даній статті система дозволяє відновлювати частотно-модульовані сигнали в низькочастотній смузі в умовах дії значних шумів (відношення сигнал/шум до 8 дБ) при смузі корисного сигналу до 500 Гц і смузі каналу зв'язку 3000 Гц \pm 1000 Гц, що практично в 1000 разів перевищує можливості відомих систем при однакових похибках. Діапазон захоплення запропонованої системи дорівнює діапазону регулювання застосованого в її структурі перетворювача напруга-частота, який досягає 60 дБ, що дозволяє створювати високоефективні системи передачі даних в низькочастотних каналах зв'язку.

Список літературних джерел

1. Применение интегральных схем: Практическое руководство. В 2-х кн. Кн. 1. / Под ред. А. Уильямса. Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 432 с.
2. Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: Справочное руководство. Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 512 с.
3. Аналоговые интегральные схемы. Элементы, схемы, системы и применения. / Под ред. Дж. Коннели. Пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 438 с.
4. Проектирование и применение операционных усилителей. / Под ред. Дж. Грэма, Дж. Тоби, Л. Хьюлсмана. Пер. с англ. – М.: Мир, 1974. – 510 с.
5. Алексенко А.Г., Коломбет Е.А., Стародуб Г.И. Применение прецизионных аналоговых ИС. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.