

УДК 621.376.3 (045)

DOI: 10.18372/2310-5461.38.12829

О. П. Слободян

Національний авіаційний університет

<https://orcid.org/0000-0002-6202-4070>

e-mail: sapfel@ukr.net;

МАГНІТООПТИЧНИЙ СПОСІБ МНОЖЕННЯ ЧАСТОТИ СИГНАЛУ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

Вступ

Помножувачі частоти сьогодні набули широкого застосування в найрізноманітніших видах радіоелектронної апаратури. У радіотехніці та електроніці помножувачем частоти є радіоелектронний пристрій, призначений для збільшення в кілька разів N частоти періодичних електричних коливань, підведених до нього, у заданому діапазоні частот із необхідною стабільністю та якістю вихідного сигналу. Ефективним є магнітооптичний метод, що зможе вирішувати функцію перетворення спектра сигналу в широких межах, а також, множення частоти, принцип дії якого принципово відрізняється від існуючих перетворювачів частоти сигналу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основний параметр помножувача частоти — коефіцієнт множення частоти N , який визначається як відношення частоти вихідного сигналу до частоти вхідного:

$$N = \frac{f_{\text{вих}}}{f_{\text{вх}}}.$$

Характерною особливістю помножувачів частоти є постійність N при зміні частоти вхідного сигналу, а також параметрів самого помножувача (наприклад, резонансних частот коливальних контурів або резонаторів, які входять до складу помножувача частоти), тобто в помножувачі частоти відносна нестабільність частоти коливань під час множення залишається постійною. Це важлива властивість дозволяє використовувати їх для підвищення частоти стабільних коливань у різних радіопередавальних, радіолокаційних та радіонавігаційних системах, інформаційно-вимірювальних системах, приладах та інших установах. Слід відмітити, що коефіцієнт множення N може сягати 2, 3, ..., 10 і більше.

Основною конструктивною проблемою існуючих помножувачів частоти є зменшення фазової нестабільності вхідних коливань (зумовленою випадковим характером зміни їх фази), що призводить до збільшення відносної неста-

більності частоти на виході порівняно з відповідною величиною на вході.

Найбільш поширені помножувачі частоти, що застосовуються в радіотехнічних системах та пристроях, як правило, містять нелінійний елемент (наприклад, транзистор, варикап, котушки з ферритовим осередком) і одного або декількох електричних фільтрів. За рахунок нелінійного елементу, здатного змінювати форму вхідних коливань або спектр коливань, на виході помножувача частоти з'являються складові з частотами кратними вхідній частоті. Ці складні коливання поступають на вхід фільтру, який виділяє складову із заданою частотою, при цьому не пропускаючи останні. Такі пристрої застосовують для множення частоти гармонійних коливань. Недоліком способу є малий коефіцієнт перетворення і майже відсутня можливість перенастроювання частоти в широкому діапазоні через наявність фільтрів [1, с. 214].

З часом спосіб множення частоти гармонійних коливань за рахунок нелінійних елементів був удосконалений фазовою компенсацією непарних гармонік [2, с. 96], що дозволило знизити амплітуди бічних гармонік. Проте, рівень бічних гармонік на виході помножувача частоти залишається високим з декількох причин: розкид параметрів транзисторів двотактного каскаду, залежність цих параметрів від режиму роботи, температури, частоти, відмінність реальної характеристики від квадратичної параболи. Все це призводить до того, що навіть при малому коефіцієнті множення $N = 2$ відношення амплітуди першої гармоніки до амплітуди другої гармоніки становить 7 %, а значення амплітуди четвертої гармоніки відносно другої може досягати 74 % [3, с. 284]. Низькочастотність помножувачів частоти, які ґрунтуються на цьому методі, зумовлена тим, що зі зростанням частоти починають впливати паразитні параметри польового транзистора: міжелектродні ємності й індуктивності виводів, оскільки ці параметри нестабільні в часі, залежать від режиму роботи і мають істотний розкид між екземплярами. Тому, зі зростан-

ням частоти їхній вплив стає вагомим, що призводить до додаткового розкиду характеристик польового транзистора і збільшенню рівня побічних гармонік на виході пристрою.

Також знаходять широке застосування помножувачі частоти, дія яких заснована на синхронізації коливань автогенератора. У таких приладах збуджуються коливання з частотою, що стає точно рівною під дією коливань, що поступають на вхід з частотою f . До недоліків цих помножувачів частоти слід віднести порівняно вузьку смугу значень, за яких можлива синхронізація.

Необхідно відзначити, що помножувачі частоти з імпульсно-фазовою автопідстроюванням частоти (ІФАПЧ) належать до надзвичайних динамічних систем для формування дискретної безлічі частот. Вирішальну роль при цьому відіграють такі найважливіші переваги, як можливість реалізації високоякісних спектральних і прийнятних динамічних характеристик за хороших габаритних, енергетичних та інших показників.

Помножувачі частоти з ІФАПЧ не мають яких або принципових обмежень з погляду вибору частотного діапазону вихідного сигналу. Практично може використовуватися будь-яка ділянка частотної осі: від одиниць і десятків Гц до гігагерца, при цьому система автопідстроювання визначає швидкодію пристрою.

Відомий винахід [4], у якому всі перераховані недоліки можна істотно або частково знизити, ввівши в каскади негативний зворотний зв'язок. Глибокий негативний зворотний зв'язок робить характеристики транзисторів більш лінійними і зменшує розкид параметрів транзисторів, в результаті чого ідентичність плечей балансового каскаду збільшується і побічні гармоніки зменшуються на порядок. Цей спосіб дозволяє значно розширити діапазон робочих частот, що зумовлено тим, що амплітудно-частотні характеристики стають більш рівномірними. При цьому діапа-

зон девіації частоти розширюється в декілька разів, а область робочих частот зміщується у бік більш високих частот. Разом з тим, залишаються побічні гармоніки і девіація частоти обмежена з двох причин: за рахунок поступового розбалансу плечей згодом (амплітуди гармонік поступово зростають), частотний діапазон обмежений (також за рахунок розбалансу плечей). Істотним недоліком цього способу є обмеження коефіцієнта множення ($N = 2$).

Мета статті (постановка завдання)

Перспективи розвитку сучасної елементної бази радіоелектроніки відкривають нові функціональні можливості для вузлів, що здійснюють перетворення сигналів у широкому діапазоні частот. Відомі способи перетворення сигналів у радіотехнічних пристроях і системах в цілому, основані на традиційних принципах побудови вузлів, що не завжди є ефективними або мають певні обмеження щодо їх застосування, особливо в інфра- та низьких діапазонах частот. Отже, розглянутий стан проблеми щодо створення передумов для побудови нового спектрального перетворювача сигналів на основі магнітооптичного явища ефекту Фарадея, дозволить значно розширити функціональні можливості вузлів та суттєво поповнить елементну базу сучасної радіоелектроніки. Слід відзначити, що існуючими радіотехнічними способами не можна створити пристрій з ідеальною функцією множення.

Виклад основного матеріалу

Запропонований спосіб принципово відрізняється від існуючих, оскільки має іншу складну апаратну функцію перетворення вхідного сигналу [5, с. 154]. Як нелінійний елемент для множення частоти сигналу використовуємо магнітооптичний кристал — ітрії-феррит гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$), що має властивість прозорості у видимому та інфрачервоному діапазоні спектра.

Проаналізуємо запропонований спосіб множення частоти за схемою, наведеною на (рис. 1).

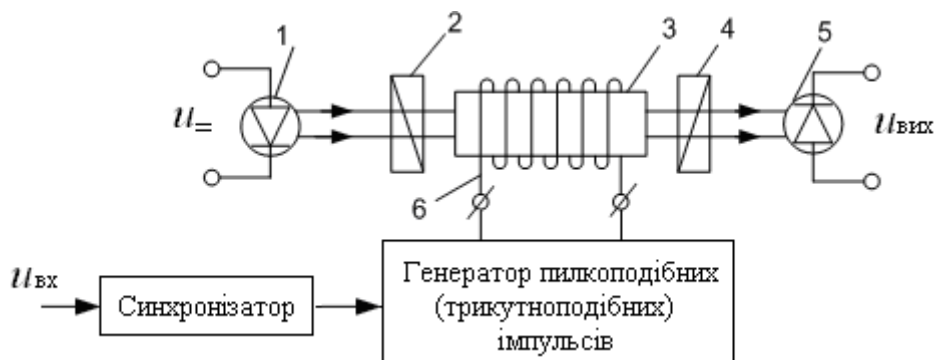


Рис. 1. Блок-схема пристрою множення частоти сигналу

Блок-схема пристрою, що реалізує спосіб множення частоти, включає синхронізатор, генератор пилкоподібних або трикутноподібних імпульсів, світлодіод 1, поляризатор 2, магнітооптичний кристал ітрій-феррит гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$) 3, аналізатор 4, фотоприймач 5 та котушку підмагнічування 6.

Світловий промінь від світлодіода 1 проходить через поляризатор 2, магнітооптичний кристал ($Y_3Fe_5O_{12}$) 3, аналізатор 4 і перетворюється фотоприймачем 5 у вихідну напругу $u_{вих}$. Вхідна напруга $u_{вх}$ подається на підмагнічуючу котушку 6, що створює магнітне поле, яке керує намагніченістю зразка, а, отже, і кутом повороту площини поляризації світла.

Інтенсивність світла I на виході фотоприймача перетворюється у вихідну напругу $u_{вих} = u_{0вих} \sin N\omega_0 t$.

Функція перетворення (апаратна функція) такого пристрою в загальному вигляді дорівнює

$$u_{вих} = u_0 \cos^2[\Theta_0 + \Theta(u_{вх})], \quad (1)$$

де $u_{вих}$ — вихідна напруга з фотоприймача; u_0 — амплітудне значення вихідної напруги; $u_{вх}$ — вхідна напруга, що подається на вхід котушки підмагнічування 6.

Реальний опір котушки підмагнічування дорівнює декілька десятків Ом (наприклад, 20 Ом). Таким чином, знаючи значення підмагнічуючого струму I можна розрахувати значення вхідної напруги $u_{вх}$. Залежність вихідної напруги від вхідної (рис. 2) визначалася за формулою (1) при нормованому значенні $u_0 = 1$ В, $\Theta_0 = 0^\circ$, і отриманому експериментальному графіку (рис. 2).

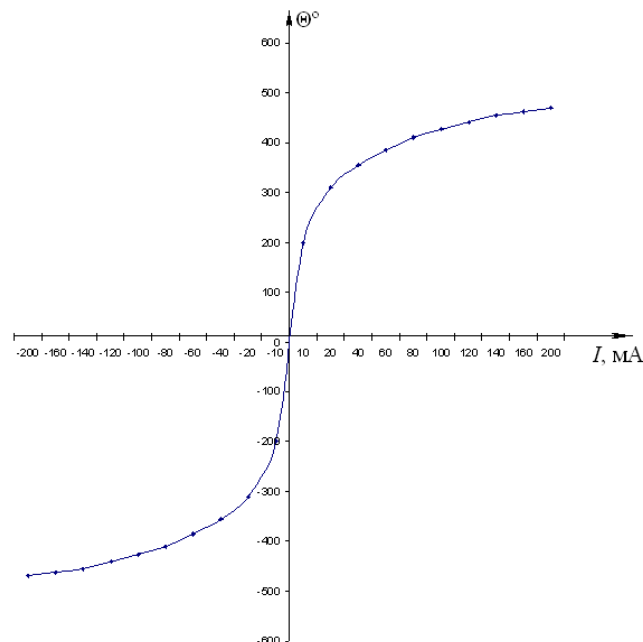


Рис. 2. Залежність кута повороту площини поляризації світла Θ від струму I у котушці підмагнічування

Слід зазначити, що залежність $\Theta(I)$ можна змінювати в широких межах, наприклад, змінюючи довжину кристалу або кількість витків у котушці підмагнічування.

Таким чином, якщо вхідний сигнал періодично залежить від часу, то можна записати

$$u_{вх}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t. \quad (2)$$

Тоді і залежність $\Theta(t)$ буде періодичною, тобто може бути розкладена в ряд Фур'є

$$\Theta(u_{вх}(t)) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t. \quad (3)$$

Вхідний сигнал $u_{вх} = u_{0вх} \sin \omega_0 t$ подається на синхронізуючий пристрій, який виробляє імпульси запуску для генератора пилкоподібних (або трикутноподібних) імпульсів. Потім пилкоподібні (трикутноподібні) сигнали подаються на котушку підмагнічування магнітооптичного перетворювача. Максимум пилкоподібного або трикутноподібного сигналу повинен співпадати з максимумом вихідного сигналу з тим, щоб вихідний сигнал був гармонійним без розривів (рис. 3).

Слід зазначити, що, якщо на магнітооптичний перетворювач подавати не пилкоподібний сигнал, а гармонійний синусоїдальний, то вихідний сигнал перетвориться в цілий спектр сигналів, аж до 60-ї гармоніки [5, с.104].

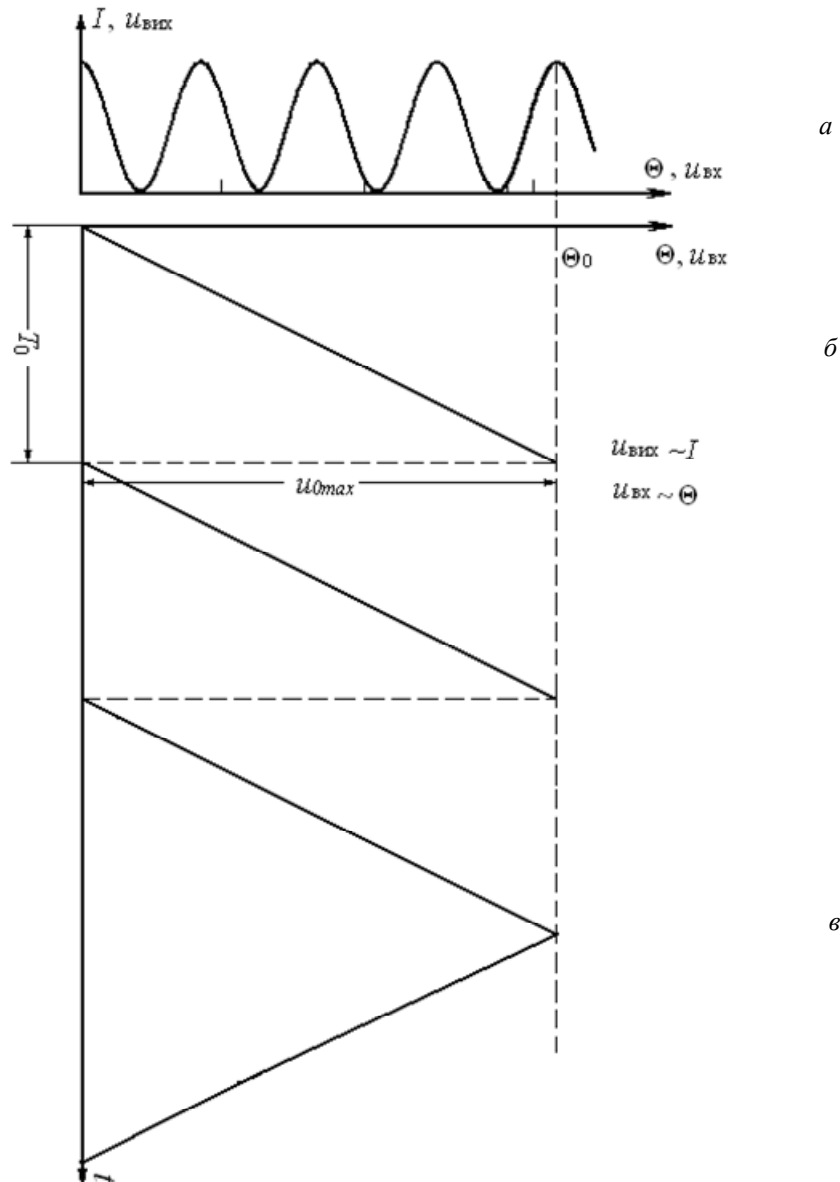


Рис. 3. Залежність вихідної напруги від вхідної магнітооптичного перетворювача спектра

При пилкоподібній (трикутноподібній) напрузі, що подається на магнітооптичний перетворювач, відношення амплітуд сусідніх гармонік до гармоніки, яка нас цікавить, наприклад шостої гармоніки, дорівнює 5 %. При цьому нелінійність пилкоподібного або трикутноподібного сигналу складатиме 3 %. Максимальна частота сигналу f визначається гістерезисом магнітооптичних зразків.

Наприклад, для ітрій-галієвих зразків вона досягає 2 МГц [6, с. 128].

Діапазон девіації частоти обмежений, у першу чергу, параметрами елементів радіотехнічної схеми і досягає $\frac{\Delta f}{f} \sim 0,5$. Немає необхідності встановлювати фільтр для виділення сигналу на частоті, яка нас цікавить, оскільки супутні гармоніки малі за амплітудою.

Кут повороту площини поляризації світла під час подачі на магнітооптичний перетворювач напруги, що змінюється за лінійним законом від часу, змінюється також за лінійним законом

$$\Theta = \Theta_{\max} \frac{t}{T}, \quad (4)$$

де T — період коливань множеного з частотою гармонійного вхідного сигналу $u_{\text{вх}} = u_{0\text{вх}} \sin \omega t$

$$\left(T = \frac{2\pi}{\omega} \right); \quad (5)$$

де Θ_{\max} — максимальне значення кута повороту площини поляризації світла.

Гармонійна напруга $u_{\text{вх}}$ через синхронізатор (за нульовим рівнем сигналу) запускає генератор пилкоподібних імпульсів напруги (струму) і подається на магнітооптичний перетворювач спектра (див. рис. 1).

Напруга на виході фотоприймача буде змінюватися за законом Малюса [7, с. 154; 8, с. 21]

$$u_{\text{вих}} = u_0 \cos^2\left(\Theta_{\text{max}} \frac{t}{T}\right) = \frac{U_0}{2} \left[1 + \cos\left(2\Theta_{\text{max}} \frac{t}{T}\right) \right] \quad (6)$$

Із виразу (6) видно, що кругова частота вихідного сигналу дорівнює

$$\omega_{\text{вих}} = \frac{2\Theta_{\text{max}}}{T} \text{ або } f_{\text{вих}} = \frac{\Theta_{\text{max}}}{\pi} f_0 \quad (7)$$

Таким чином, коефіцієнт множення за частотою для пилкоподібного сигналу:

— у радіанах

$$N = \frac{\Theta_{\text{max}}}{\pi}; \quad (8)$$

— у градусах

$$N = \frac{\Theta_{\text{max}}}{180^\circ} \quad (9)$$

або для трикутноподібного різнополярного сигналу:

— у радіанах

$$N = \frac{2\Theta_{\text{max}}}{\pi}; \quad (10)$$

— у градусах

$$N = \frac{\Theta_{\text{max}}}{90^\circ} \quad (11)$$

Якщо використовувати від'ємну частину характеристики $\Theta(I)$, зображеної на рис. 2, то для трикутноподібного за формою вхідного сигналу вирази (10 та 11) у два рази збільшаться:

— у радіанах

$$N = \frac{4\Theta_{\text{max}}}{\pi}; \quad (12)$$

— у градусах

$$N = \frac{\Theta_{\text{max}}}{45^\circ} \quad (13)$$

Якщо використовувати магнітооптичний перетворювач з характеристикою, наведеною на рис. 2, де $\Theta \sim 450^\circ$, $N = 10$. Проте, характеристики необхідно перетворити на лінійну.

Структурна схема пристрою-помножувача частоти послідовного наближення містить джерело світла 1, поляризатор 2, магнітооптичний перетворювач 3, аналізатор 4, фотоприймач 5, синхронізатор 6, генератор пилкоподібної напруги 7, який керує мікроконтролером для реалізації кратності множення частоти сигналу (рис. 4).

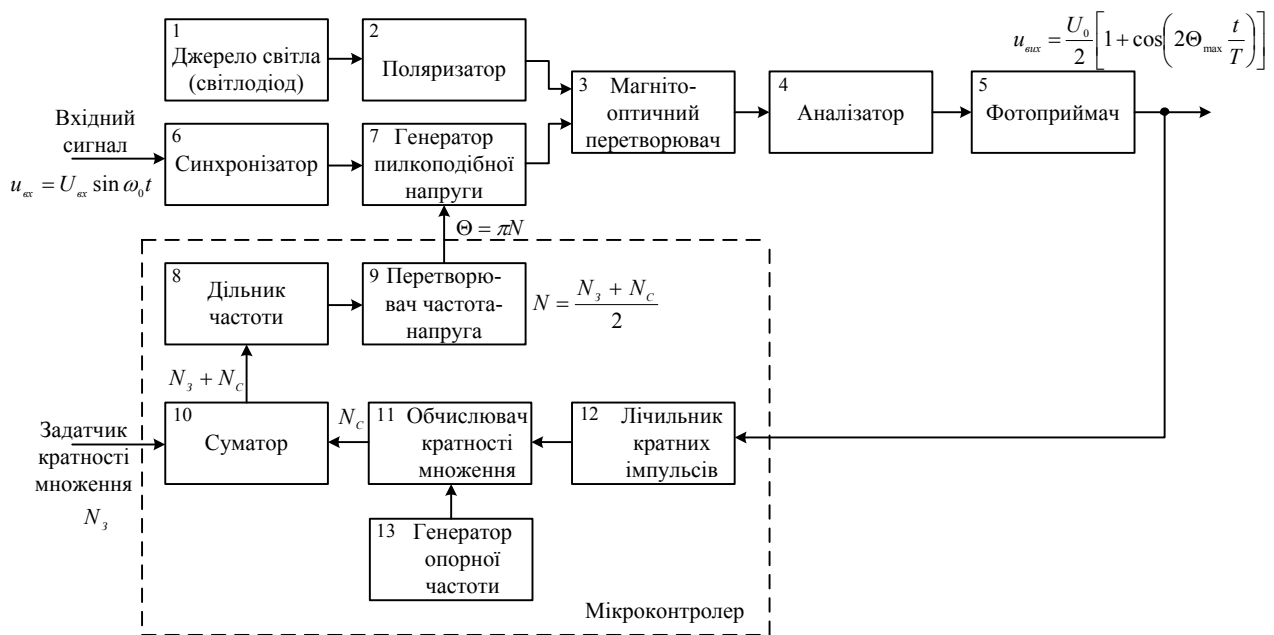


Рис. 4. Структурна схема пристрою-помножувача частоти послідовного наближення

Множення частоти f гармонійного сигналу на гармонійний сигнал з частотою Nf (N — коефіцієнт множення частоти) здійснюється за рахунок обертання площини поляризації променя світла у магнітооптичному перетворювачі 3, який надалі аналізатором 4 модулюється по інтенсивності за законом Малюса і фотоприймачем 5 перетворюється на вихідний електричний сигнал з частотою,

кратною в N раз. Слід зазначити, що для множення частоти періодичного сигналу шляхом перетворення його нелінійним елементом для створення гармонік, частота якого змінюється в часі довільно в широких межах, вхідний сигнал спочатку перетворюють в пилкоподібний (трикутноподібний) і подають на вхід магнітооптичного перетворювача, на виході якого відсутній

фільтр для виділення сигналу з частотою Nf ($N = 2, 3, 4, \dots$). На рис. 5 наведено алгоритм роботи пристрою-помножувача частоти послідовного наближення, що здатний створити новий тип характеристики перетворення вхідного спектра сигналу у вихідний спектр сигналу (множення частоти).

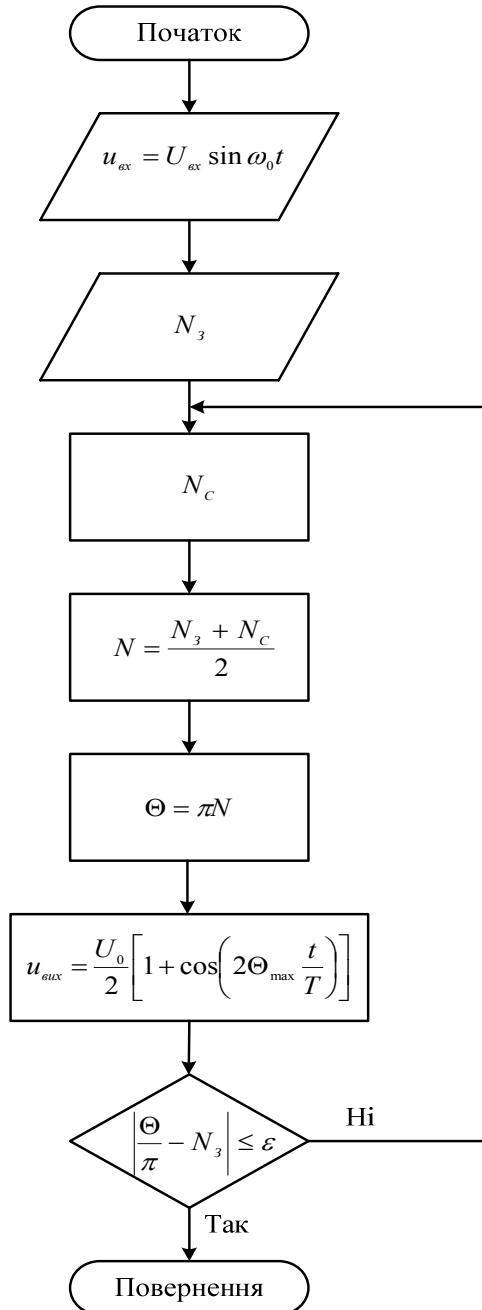


Рис. 5. Алгоритм роботи пристрою-помножувача частоти послідовного наближення

Отримані теоретичні та практичні результати перетворення спектра вхідного сигналу мають багато принципово нових властивостей, порівняно з традиційними перетворювачами, виконаними на існуючій елементній базі.

Висновки

Таким чином, сформовано загальне наукове завдання, щодо створення нових вузлів радіоелектронних пристроїв, зокрема інженерно-технічних рішень, направлених на розширення функціональних можливостей магнітооптичного перетворювача, знайде впровадження для вирішення завдань, пов'язаних з перетворенням спектра сигналів, множення частоти, зсуву фази, вимірювання різниці фаз тощо.

Перспективи подальших досліджень

У свою чергу встановлений напрям, спонукає на створення науково-прикладного напрямку дослідження: теоретичного та експериментального, оцінювання ефективності впровадження нового способу магнітооптичного перетворення сигналів у радіоелектронних пристроях і системах із визначенням потенційної точності та похибки у реальних умовах.

ЛІТЕРАТУРА

1. Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мазора, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. — К. : Вища шк., 1999. — 608 с.
2. **Махов М. Е.** Умножитель частоты на полевых транзисторах. — М. : Радиотехника, 1974. — № 9. — С. 96–97.
3. **Бруевич А. Н.** Аппроксимация нелинейных характеристик и спектры при гармоническом воздействии / А. Н. Бруевич, С. И. Евтянов. — М. : Сов. радио, 1965. — С. 284–296.
4. **Бочаров М. И.** Гармонический умножитель частоты. Описание изобретения к авторскому свидетельству RU № 2257665, Н 03 В 19/06, от 27.07.2005.
5. **Кузнецов Ю. А.** Фарадеевский умножитель частоты / Ю. А. Кузнецов, В. Д. Тронько. — М. : Приборы и техника эксперимента, № 6, 1973. — С. 104–106.
6. **Яковлев Ю. М.** Монокристаллы ферритов в радиоэлектронике / Ю. М. Яковлев, С. М. Генделев. — М. : Сов. радио, 1975. — 400 с.
7. **Тронько В. Д.** Оптоелектронний перетворювач спектра радіосигналу інфра- та низькочастотного діапазону. Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру Транспортної академії України / В. Д. Тронько, А. В. Скрипеч, О. П. Слободян. — 2006, Вип. 9. — С. 154–158.
8. **Скрипеч А. В.** Спектральное преобразование радиосигнала оптоэлектронным методом / А. В. Скрипеч, В. Д. Тронько, А. П. Слободян, С. В. Енчев // Електроніка та системи управління: зб. наук. пр. — К. : НАУ, 2005. — Вип. 4. — С. 21–29.

Слободян О. П.

МАГНІТООПТИЧНИЙ СПОСІБ МНОЖЕННЯ ЧАСТОТИ СИГНАЛУ НИЗЬКОЧАСТОТНОГО ДІАПАЗОНУ

У статті наведено новий спосіб множення частоти сигналу, який принципово відрізняється від існуючих, оскільки має іншу складну апаратну функцію перетворення вхідного сигналу, а в якості нелінійного елемента для множення частоти сигналу застосовано магнітооптичний кристал — ітрій-феррит гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$). Особливістю застосування таких помножувачів частоти дозволить їх використання, в першу чергу, для перетворення спектра сигналів в низькому діапазоні частот. Розроблено та представлено оптоелектронну схему пристрою множення частоти сигналу, наведено експериментальну нелінійну характеристику вихідного сигналу. На основі проведених досліджень та конструктивних особливостей розроблена структурна схема пристрою-помножувача частоти послідовного наближення та наведений алгоритм її роботи. Визначено основні напрямки подальшого дослідження магнітооптичного перетворювача та розширення його функціональних можливостей застосування в радіотехнічних пристроях та системах.

Ключові слова: спосіб, магнітооптичний перетворювач, сигнал, множення частоти, структурна схема, алгоритм.

Slobodyan O. P.

MAGNETO-OPTICAL METHOD OF MULTIPLYING THE FREQUENCY OF LOW FREQUENCY SIGNAL RANGE

The article presents a new way of multiplying the signal frequency, which fundamentally differs from the existing ones, since it has different complex hardware function for converting the input signal, and a magneto-optical crystal - yttrium ferrite garnet ($Y_3Fe_5O_{12}$) as a nonlinear element for multiplying the signal frequency. The application feature of such frequency multipliers will allow to use them, first of all, for signal spectrum transformation in the low frequency range. An optoelectronic scheme of the frequency multiplication device has been developed and presented, as well as an experimental nonlinear characteristic of the output signal. On the basis of the conducted researches and structural characteristics there was developed a structural scheme of the frequency multiplier of successive approximation and was given algorithm of its operation. There was also determined the basic directions for further investigation of the magneto-optical converter and expansion of its functional possibilities in radio engineering devices and systems.

Keywords: method, magneto-optical converter, signal, frequency multiplication, structural scheme, algorithm.

Слободян А. П.

МАГНИТООПТИЧЕСКИЙ СПОСОБ УМНОЖЕНИЯ ЧАСТОТЫ СИГНАЛА НИЗКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

В статье приведен новый способ умножения частоты сигнала, принципиально отличается от существующих, поскольку имеет другую сложную аппаратную функцию преобразования входного сигнала, а в качестве нелинейного элемента для умножения частоты сигнала применен магнітооптический кристалл — иттрий-феррит гранат ($Y_3Fe_5O_{12}$). Особенностью применения таких умножителей частоты позволит их использования, в первую очередь, для преобразования спектра сигналов в низком диапазоне частот. Разработано и представлено оптоэлектронную схему устройства умножения частоты сигнала, приведена экспериментальная нелинейная характеристика выходного сигнала. На основе проведенных исследований и конструктивных особенностей разработана структурная схема устройства-умножителя частоты последовательного приближения и приведен алгоритм ее работы. Определены основные направления дальнейшего исследования магнітооптического преобразователя и расширение его функциональных возможностей применения в радиотехнических устройствах и системах.

Ключевые слова: способ, магнітооптический преобразователь, сигнал, умножения частоты, структурная схема, алгоритм.

Стаття надійшла до редакції 21.05.2018 р.

Прийнято до друку 04.06.2018 р.

Рецензент — д-р техн. наук, проф. Коначович Г. Ф.