

ПРИСТРІЙ ПЕРВИННОГО ОБРОБЛЕННЯ РАДІОСИГНАЛІВ

У роботі представлено метод дискретизації радіосигналів, згідно якого процес дискретизації виконується з урахуванням особливостей спектра амплітудно-імпульсно-модульованого сигналу. При цьому мінімальна частота дискретизації радіосигналів дорівнює подвоєній ширині спектра неперервного сигналу. Розроблено структуру пристрою первинного оброблення радіосигналів, який характеризується широкою смугою робочих частот, мінімальними апаратними затратами та функціонує в реальному масштабі часу

Ключові слова: радіосигнали, первинне оброблення сигналів, частота дискретизації.

G.G. BORTNYK, A.V. KOVALENKO, A.V. TYSCHENKO

Vinnitsa National Technical University, Ukraine

DEVICE FOR PRIMARY PROCESSING OF RADIO SIGNALS

The method of sampling the radio signals, according to which the process of digitization is performed allowing for the spectral amplitude and pulse-modulated signal. The minimum sample rate is twice the width of the radio signals spectrum of continuous signal.

Due regime down-sampling radio signals can make digital processing of high frequency signals without the use of sophisticated high-speed vehicles. To restore the radio signals of a sequence of samples taken from down-sampling frequency bandpass filter can be used.

Developed engineering method of construction and structure of primary treatment device radio signals is characterized by a broad band of operating frequencies, minimal hardware cost and operates in real time.

Key words: radio signals, primary signal processing, sample rate

Вступ

Засоби первинного оброблення радіосигналів (РС) широко використовуються для розв'язання задач в найрізноманітніших галузях, а саме: керування використанням радіочастотного спектра, контроль радіобстановки та ін. На їх основі організовано технічну базу з протидії несанкційованому зчитуванню інформації, а також спеціальних досліджень побічних електромагнітних випромінювань та наведень [1].

Особливістю теперішнього періоду є також різке збільшення об'єму використання оргтехніки та електронної техніки побутового і промислового призначення, які мають побічні електромагнітні випромінювання та можуть бути каналами витоку інформації, наприклад, за рахунок мікрофонного ефекту, наявних в них ВЧ-генераторів, кореляції параметрів випромінювання моніторів та комп'ютерів з оброблюваними даними [2, 3].

Проблема підвищення ефективності засобів первинного оброблення РС полягає в тому, що в зв'язку зі збільшенням кількості міжнародних контактів та лібералізації ринку радіозасобів підвищились загрози від закордонних спецслужб, що здійснюють збір відомостей про промислові та економічні секрети українських підприємств і ведуть тотальний контроль за науковими і технічними розробками в галузі передових технологій [4].

Окрім того, необхідно відмітити ряд чинників, що пов'язані з ускладненням радіоелектронної обстановки, а саме:

- використання великої кількості радіоелектронних засобів в обмеженому просторі, що призводить до ускладнень визначення побічних джерел радіовипромінювання;
- значне збільшення швидкості передачі інформації, підвищення скритності та завадостійкості за рахунок використання надлишковості в ряді радіоелектронних засобів, до переліку яких відносяться пристрої, що використовуються у вимірвальних та інформаційних радіосистемах, широкосмугові системи з динамічною частотно-часовою структурою і т.і.;
- нерівномірний часовий розподіл роботи радіоелектронних засобів, що призводить до додаткового ускладнення радіоелектронної обстановки в моменти найбільшої інтенсивності роботи радіосистем.

Тому, особливо важливими є радіоелектронні засоби, які ефективно можуть бути використані для первинного оброблення РС з подальшим отриманням вторинної інформації про їх основні параметри.

Таким чином, розроблення методів і засобів первинного оброблення РС, що характеризуються підвищеною ефективністю є актуальною науковою задачею.

Метою роботи є підвищення ефективності пристрою первинного оброблення радіосигналів (ППОРС) за рахунок розширення смуги робочих частот досліджуваних сигналів.

Для досягнення заданої мети необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати розробку методу дискретизації радіосигналів;
- здійснити розробку інженерної методики побудови пристрою первинного оброблення РС;
- розробити структурну схему пристрою первинного оброблення РС.

Метод дискретизації радіосигналів

У сучасних ППОРС неперервні сигнали не обробляються безпосередньо, а зазнають дискретизації з метою подальшого їх перетворення у цифрову форму. Можливість передавання дискретизованих сигналів

замість неперервних у часі сигналів і неспотвореного відновлення послідовності відліків базується на використанні теореми Котельнікова-Шеннона [2].

З точки зору технічної реалізації рівномірна дискретизація з частотою f_s еквівалентна амплітудно-імпульсній модуляції (АІМ) [5]. Для складного РС (MS), що займає смугу частот $f_L \dots f_H$, спектр АІМ-сигналу має вигляд, представлений на рис. 1.

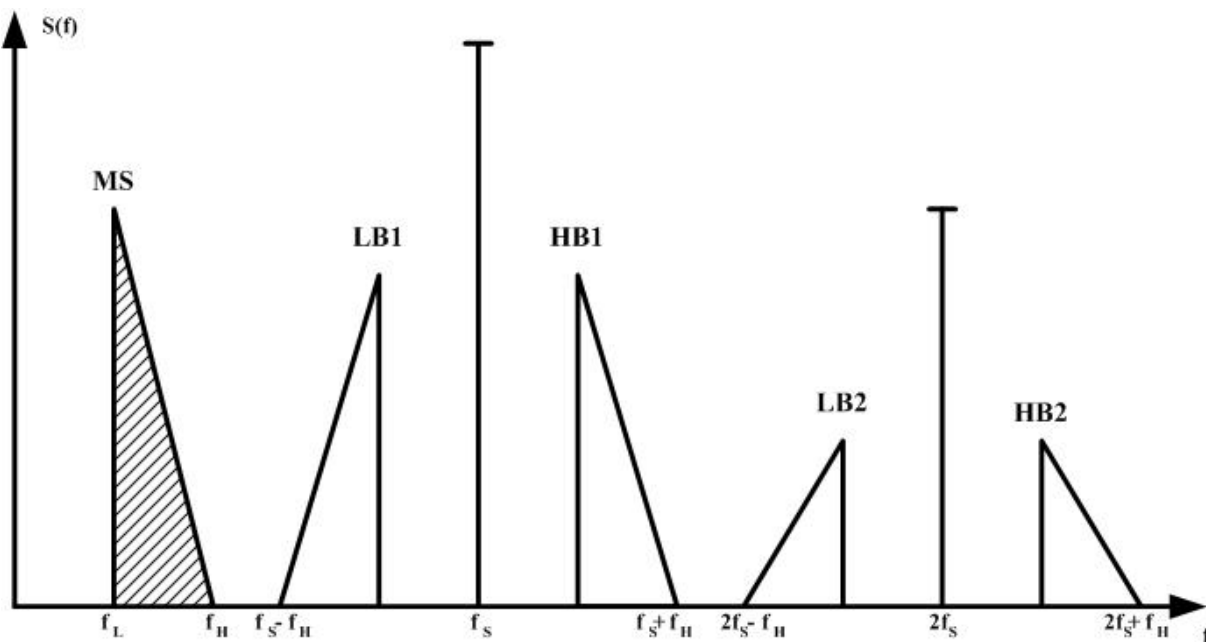


Рис.1. Спектр АІМ-сигналу

Для відновлення неперервного сигналу необхідно, як видно з рис. 1, виконати умову

$$f_H \leq f_s - f_H. \quad (1)$$

Звідси вибір частоти дискретизації здійснюється згідно

$$f_s \geq 2f_H. \quad (2)$$

Якщо нерівність (2) не виконується, то спектр першої нижньої бічної смуги LB1 і спектр неперервного сигналу MS будуть повністю або частково перекриватися. В результаті буде спостерігатись ефект накладання спектрів, який призводить до незворотних спотворень відновленого сигналу. Цих спотворень неможливо позбутись навіть при використанні ідеального фільтра нижніх частот. Для усунення цього ефекту вираз (2) приймає вигляд

$$f_s \geq (2,1 \dots 2,2)f_H. \quad (3)$$

Таким чином, вибір частоти дискретизації з урахуванням (3) підвищує тактову частоту у трактах оброблення цифрових сигналів на 5...10 %, що є цілком прийнятним [6]. При перетворенні у цифрову форму вузькосмугових РС, для яких справедливе співвідношення

$$\frac{f_H}{f_L} < 2, \quad (4)$$

спостерігається штучне завищення частоти дискретизації. Це призводить до застосування (при обробленні таких сигналів) високочастотних трактів і складних швидкодійних засобів оброблення сигналів [7]. Тому виникає проблема оптимізації частоти дискретизації залежно від частотної смуги оброблюваних РС.

Визначимо мінімальну частоту дискретизації РС, яка дозволить зменшити тактову частоту сигналів у лінійних трактах ППОРС, а також дасть можливість використовувати при цифровому обробленні сигналів елементну базу невисокої швидкодії.

Розглянемо особливості вибору мінімальної частоти дискретизації РС, спектр яких обмежено не тільки зверху, але й знизу. Нехай гармоніки частоти дискретизації дорівнюють $n \cdot f_s$, ($n = 1, 2, 3, \dots$). Для того, щоб бічні смуги АІМ-сигналу не збігались зі спектром неперервного сигналу MS, що займає смугу $f_L - f_H$, необхідно (як це видно з рис. 1) одночасно виконувати дві умови:

- нижня бічна смуга LB_n повинна розміщуватись по осі частот вище або нижче спектра неперервного сигналу MS;
- верхня бічна смуга HB_n повинна розміщуватись по осі частот вище або нижче спектра MS.

Перша вимога може представлятись у вигляді двох рівноцінних нерівностей, одна з яких повинна обов'язково виконуватись при виборі частоти дискретизації:

$$f_H \leq n \cdot f_S - f_H; \quad (5)$$

$$f_L \geq n \cdot f_S - f_L. \quad (6)$$

Другу умову теж можна представити двома аналогічними нерівностями, одна з яких обов'язково має виконуватись:

$$f_H \leq n \cdot f_S + f_L; \quad (7)$$

$$f_L \geq n \cdot f_S + f_H. \quad (8)$$

Наведені вище умови можна використати й для смуги від'ємних частот $-f_L - f_H$. Розглянемо лише додатні частоти, оскільки результати для додатних частот і від'ємних частот будуть збігатися. Нерівності (5) - (8) можна записати у вигляді

$$2f_H \leq n \cdot f_S; \quad (9)$$

$$2f_L \geq n \cdot f_S. \quad (10)$$

$$f_H - f_L \leq n \cdot f_S; \quad (11)$$

$$f_H - f_L \geq n \cdot f_S. \quad (12)$$

Нерівність (12) не може виконуватись для випадку, коли $f_L < f_H$, при будь-якому значенні n . Тому виконання нерівності (11) є обов'язковим для будь-якого значення n . Нерівність (10) не виконується для всіх значень n . Нехай n_m є максимальним значенням n , для якого (10) іще не виконується. Тоді для всіх інших значень n , починаючи з найбільшого $n = n_m + 1$, повинно виконуватись співвідношення (9). Наведенні твердження можна записати у вигляді двох нерівностей, які повинні при виборі частоти дискретизації виконуватись одночасно

$$\begin{cases} 2f_L \geq n_m \cdot f_S \\ 2f_H \leq (n_m + 1) \cdot f_S. \end{cases} \quad (13)$$

Умову (13) вибору частоти дискретизації можна записати у вигляді одного виразу

$$2 \frac{f_H}{n_m + 1} \leq f_S \leq 2 \frac{f_L}{n_m}. \quad (14)$$

Аналізуючи (14), можна стверджувати, що виконання обох умов вибору частоти дискретизації можливе лише тоді, коли ліва частина (14) менша правої або дорівнює їй. Число n_m називають порядком субдискретизації. Якщо РС має смугу $\Delta f = f_H - f_L$, то субдискретизація цього сигналу можлива, якщо

$$\frac{f_L}{\Delta f} \geq n_m. \quad (15)$$

Значення n_m можуть бути лише цілими числами. Тому можна ввести коефіцієнт $l \geq n_m$, який обмежує порядок субдискретизації. З (15) можна отримати значення l :

$$l = \text{ent} \left[\frac{f_L}{\Delta f} \right], \quad (16)$$

де $\text{ent}[x]$ – ціла частина числа x .

При знаходженні порядку субдискретизації треба враховувати, що він знаходиться в межах $n_m = [1, l]$. Мінімальну частоту дискретизації вузькосмугового сигналу можна знайти, підставивши максимальне значення з (16) у ліву частину (14):

$$f_{S \min} = 2 \frac{f_H}{l + 1}. \quad (17)$$

Аналізуючи вираз (17), неважко впевнитись, що мінімальне значення частоти дискретизації дорівнює подвоєній смузі спектра неперервного сигналу, тобто

$$f_{S \min} = 2\Delta f. \quad (18)$$

Цей вираз є справедливим тоді, коли відношення $f_L / \Delta f$ є цілим числом. Якщо $f_L / \Delta f$ – дрібне число, то $f_{S \min} > 2\Delta f$.

На основі отриманих виразів, методику знаходження частоти дискретизації РС, можна сформулювати у вигляді наступних кроків.

1. Неперервний сигнал перевіряється на вузькосмуговість згідно (4).
2. Визначається згідно (16) коефіцієнт l .

3. Обчислюються значення $2f_H / n_m + 1$ та $2f_L / n_m$ для всіх цілих значень n_m , починаючи від 0 до l включно.

4. Виконується вибір частоти дискретизації у будь-якому діапазоні. Отримана частота повинна відповідати заданому n_m у межах від $2f_H / n_m + 1$ до $2f_L / n_m$. Кількість аналізованих частотних діапазонів дорівнює $l + 1$.

Таким чином, мінімальна частота дискретизації РС дорівнює подвоєній ширині спектра неперервного сигналу.

Інженерна методика побудови пристроїв первинного оброблення радіосигналів

Схемна оптимізація побудованої структури ППОРС здійснюється за критерієм мінімального числа використаних ВІС. При побудові ППОРС слід прагнути до вибору мінімально допустимої розрядності чисел, при цьому буде меншим об'єм оперативного запам'ятовувального пристрою (ОЗП) та розрядність цифрових блоків.

Базовим функціональним вузлом блоку керування (БК) ППОРС є синтезатор тактових імпульсів. При його побудові слід використовувати формулу для розрахунку частоти дискретизації:

$$f_S = \frac{f_g}{2^{n_{df}}}, \quad (19)$$

де f_g – частота високостабільного генератора тактових імпульсів; n_{df} – кількість розрядів двійкових лічильників-подільників частоти.

Важливим етапом у процесі побудови ППОРС є забезпечення високої стабільності фази тактових імпульсів тракту аналого-цифрового перетворення (ТАЦП). Як відмічалось у [8], необхідною умовою ефективного аналого-цифрового перетворення РС є низький рівень фазових шумів тактових сигналів. Значення джитеру тактових імпульсів генератора можна визначити за допомогою виразу [9]:

$$\delta_{PN} = \frac{\Delta f}{f_{NM}^{1,5}} \cdot 10^{\frac{P(\Delta f)}{20}}, \quad (20)$$

де Δf – відхилення частоти від номінального значення; f_{NM} – максимальна частота тактових імпульсів.

Звідси потужність шумової складової тактових імпульсів з амплітудою U_S , дорівнює:

$$P_N = 20 \lg \left(2\pi \cdot f_S \cdot U_S \frac{\Delta f}{f_{NM}^{1,5}} \cdot 10^{\frac{P(\Delta f)}{20}} \right). \quad (21)$$

Обов'язковим функціональним елементом цифрової частини ППОРС є буферний ОЗП, об'єм якого визначається, виходячи з вимог до частотної роздільної здатності:

$$M_{RAM} = \frac{f_S}{\Delta f}. \quad (22)$$

Таким чином, зі збільшенням частоти дискретизації ТАЦП зростає необхідний об'єм ОЗП. З іншого боку, вибір ВІС ОЗП залежить від максимальної частоти дискретизації f_{SM} та циклу записування мікросхеми $t_{C/W}$, тобто:

$$f_{SM} < \frac{1}{t_{C/W}}. \quad (23)$$

При цьому значення $t_{C/W}$ визначає часовий баланс функціонування буферного ОЗП:

$$t_{C/W} = t_{W/A} + t_{W/CS} + t_{W/D} + t_{W/R}, \quad (24)$$

де $t_{W/A}$ – час утримання сигналу адреси; $t_{W/CS}$ – час зберігання сигналу W/R відносно сигналу CS ;

$t_{W/D}$ – час зберігання сигналу W/R відносно сигналу DI ; $t_{W/R}$ – тривалість сигналу записування.

Число ВІС ОЗП для побудови буферної пам'яті заданого об'єму, можна розрахувати, користуючись таким виразом:

$$m_{RAM} = \frac{M_{BRAM} \cdot n_{ADC}}{M_{RAM} \cdot n_{RAM}}, \quad (25)$$

де M_{BRAM} – об'єм буферного ОЗП; M_{RAM} – об'єм ВІС ОЗП; n_{RAM} – розрядність ВІС ОЗП.

На базі отриманих виразів здійснюється розрахунок та будується узагальнена структура ППОРС. Наступним етапом побудови є оптимізація пристрою для забезпечення найкращого значення критерію ефективності (мінімуму використаних ВІС). Для цього узагальнену структуру, побудовану на попередньому етапі, заповнюють блоками та функціональними вузлами. Потім складається рівняння балансу показників якості (кількості необхідних ВІС), як це було зроблено на базі виразу (25) для необхідної кількості ВІС ОЗП. Ці показники розраховуються для різних структур ППОРС.

На останньому етапі побудови шляхом перебирання варіантів структур з різними параметрами знаходиться варіант з найкращим значенням критерію ефективності.

Структура пристрою первинного оброблення РС

Структурна схема ППОРС представлена на рис. 2. У цьому пристрої реалізовано метод дискретизації вузькосмугових РС та метод підвищення роздільної здатності ТАЦП [8]. Вхідний сигнал U_{in} , що досліджується, надходить на вхід фільтра нижніх частот (ФНЧ). З виходу ФНЧ радіосигнал підводиться до буферного підсилювача (БП), а з його виходу подається у ТАЦП, де здійснюється дискретизація, квантування та перетворення РС у цифровий код.

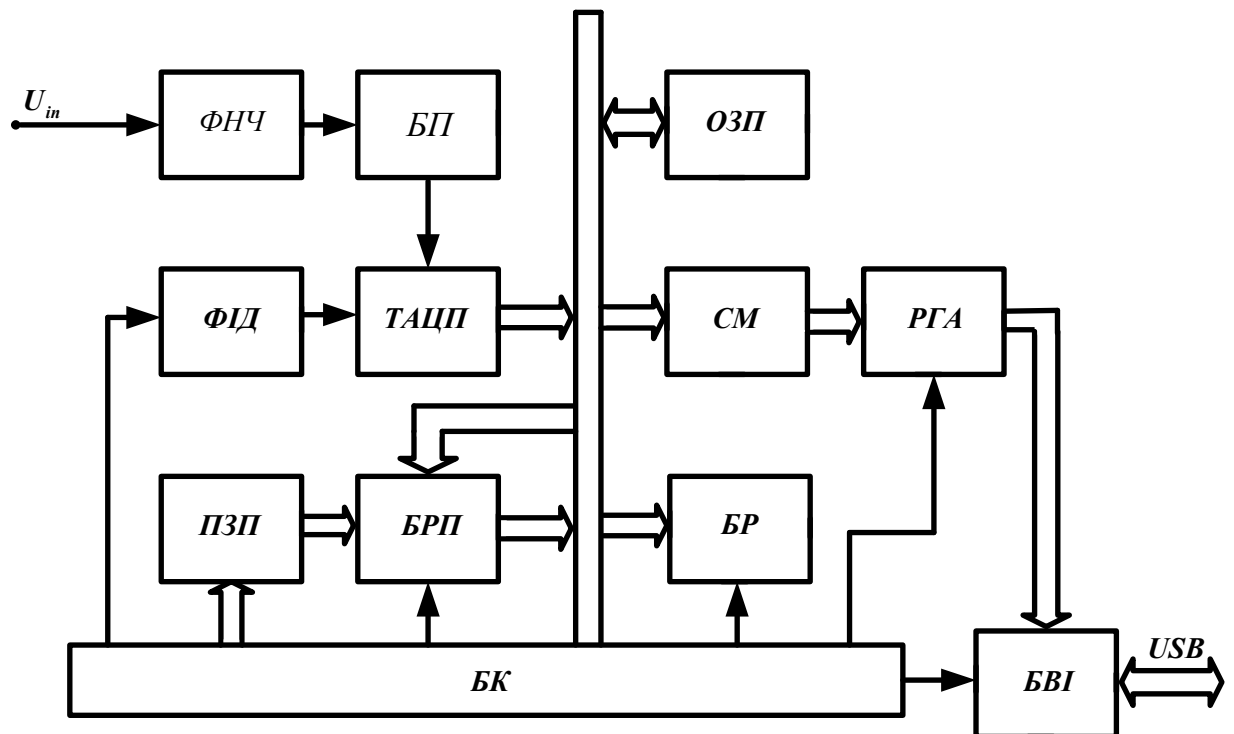


Рис. 2. Структурна схема ППОРС

Визначення спектральної густини потужності радіосигналу здійснюється у модулі цифрового оброблення, який реалізовано на базі постійного запам'ятовувального пристрою (ПЗП), суматора (СМ) та ОЗП. Результати спектрального оцінювання фіксуються у блоці відображення інформації (БВІ). Для вторинного оброблення спектрів РС з метою оцінювання їх параметрів, масиви даних, що отримані на першому рівні оброблення, передаються інтерфейсом USB у комп'ютер. Для синхронізації функціонування усіх складових пристрою та реалізації заданого алгоритму роботи слугує БК.

Висновки

Запропоновано метод дискретизації радіосигналів, згідно якого процес дискретизації виконується з урахуванням особливостей спектра АІМ-сигналу. При цьому мінімальна частота дискретизації РС дорівнює подвоєній ширині спектра неперервного сигналу.

Завдяки режиму субдискретизації РС можна здійснити цифрове оброблення ВЧ-сигналів без використання складних швидкодійних засобів. Для відновлення РС з послідовності відліків, взятих з частотою субдискретизації можна використати смуговий фільтр зі смугою пропускання $f_L \dots f_H$.

Розроблено інженерну методику побудови та структуру пристрою первинного оброблення РС, який характеризується широкою смугою робочих частот, мінімальними апаратними затратами та функціонує в реальному масштабі часу.

Література

1. Рембовский А.М. Радиомониторинг – задачи, методы, средства / А.М. Рембовский, А.В. Ашихмин, В.А. Козьмин. – М.: Телеком, 2010. – 624 с.
2. Айфичер Э. Цифровая обработка сигналов / Э. Айфичер, Б. Джервис. – М.: Вильямс, 2004. – 992 с.
3. Бортник Г.Г. Методи та засоби оцінювання параметрів абонентських ліній зв'язку / Г.Г. Бортник, В.М. Кичак, В.Ф. Яблонський. – Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2006. – 139 с.
4. Бортник Г.Г. Методи та засоби первинного цифрового оброблення радіосигналів / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, В.М. Кичак. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 168 с.
5. Бортник Г.Г. Швидкодіючий аналого-цифровий перетворювач підвищеної точності / Г.Г. Бортник // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2002. – № 5. – С. 47-50.
6. Бортник Г.Г. Метод аналого-цифрового перетворення високочастотних сигналів з додатковим шумоподібним сигналом / Г.Г. Бортник, О.В. Стальченко, К.О. Боярський // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2015. – № 1. – С. 100-105.
7. Бортник Г.Г. Аналіз ефективності аналого-цифрового перетворення сигналів у радіотехнічних комплексах / Г.Г. Бортник, М.Л. Мінов, О.В. Стальченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2011. – № 2. – С.12-15.
8. Бортник Г.Г. Метод покращення шумових властивостей тракту аналого-цифрового перетворення аналізаторів фазового дрижання / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.Г. Бортник // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2013. – № 3. – С. 77-80.
9. Бортник Г.Г. Метод оцінювання основних параметрів фазового дрижання в системах передавання даних / Г.Г. Бортник, М.В. Васильківський, О.В. Стальченко // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2010. – № 6. – С. 97-101.

References

1. Rembovskiy A.M. Radiomonitoring – zadachi, metody, sredstva / A.M. Rembovskiy, A.V. Ashihmin, V.A. Kozmin. – M.: Telekom, 2010. – 624 s.
2. Ayficher E.S. Tsifrovay obrabotka signalov / E.S. Ayficher, B.W. Jervis. – M.: Williams, 2008. – 992 s.
3. Bortnyk G.G. Metody ta zasoby otsiniuvannya parametriv abonentskykh liniy zviazku / G.G. Bortnyk, V.M. Kychak, V.F. Yablonskyi. – Vinnytsia : UNIVERSUM-Vinnytsia, 2006. – 139 s.
4. Bortnyk G.G. Metodi ta zasobi pervinnogo tsifrovogo obroblyennya radiosignaliv / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilivskiy, V.M. Kychak. – Vinnitsya: VNTU, 2016. – 168 s.
5. Bortnyk G.G. Shvydkodiiuchy analoho-tsyfrovy peretvoriuvach pidvyshchenoi tochnosti/ G.G. Bortnyk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2002. – № 5. – S. 47-50.
6. Bortnyk G.G. Metod analoho-tsyfrovoho peretvorennia vysokochastotnykh syhnaliv z dodatkovym shumopodibnym syhnalom / G.G. Bortnyk, O.V. Stalchenko, K.O. Boiarskyi // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2015. – № 1. – S. 100-105.
7. Bortnyk G.G. Analiz efektyvnosti analoho-tsyfrovoho peretvorennia syhnaliv u radiotekhnichnykh kompleksakh / G.G. Bortnyk, M.L. Minov, O.V. Stalchenko // Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia. – 2011. – № 2. – S. 12-15.
8. Bortnyk G.G. Metod pokrashchennya shumovih vlastivostey traktu analoho-tsyfrovoho peretvorennia analizatoriv fazovogo drizhannya / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilivskiy, O.G. Bortnyk // Vimiryuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tehnologichnih protsesakh. – 2013. – № 3. – S. 77-80.
9. Bortnyk G.G. Metod otsynyuvannya osnovnih parametriv fazovogo drizhannya v sistemah peredavannya danih / G.G. Bortnyk, M.V. Vasilivskiy, O.V. Stalchenko // Visnyk Vinnitskoho politekhnichnoho instytutu. – 2010. – № 6. – S. 97-101.

Рецензія/Peer review : 17.1.2017 р.

Надрукована/Printed :27.2.2017 р.

Стаття рецензована редакційною колегією