

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНОЇ СМУГИ ПРИ ФОРМУВАННІ ШИРОКОСМУГОВИХ СИГНАЛІВ В РОЗПОДІЛЕНИХ КОМП'ЮТЕРНИХ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

УДК 681.325

КОЗЛЕНКО Микола Іванович

к.т.н., доцент кафедри комп'ютерної
та програмної інженерії ПВНЗ «Галицька академія».

Наукові інтереси: цифрове формування та опрацювання сигналів,
спеціалізовані комп'ютерні системи, робототехніка.

e-mail: kozlenkomykola@ukr.net

ВСТУП

В сьогоденному світі важко уявити будь-яку сферу діяльності де б не знайшлося місце для застосування інформаційних технологій, яке відкриває якісно нові горизонти для прогресу. Сучасний розвиток інформаційних технологій супроводжується швидким зростанням обсягів передачі інформації і вимагає інтенсивного вдосконалення та покращення характеристик каналів зв'язку. З іншого боку, сучасні інформаційні технології використовуються при моделюванні методів реалізації комунікацій, аналізі характеристик каналів зв'язку, проектуванні каналотворюючого обладнання. Широке використання бездротових інформаційно-комунікаційних технологій при побудові розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних систем та мереж промислового призначення, які функціонують в умовах інтенсивних завад природного та техногенного походження, визначає необхідність пошуку нових рішень на методичному, структурному та алгоритмічному рівнях при створенні цифрових засобів реалізації комунікацій. Суттєвого покращення якості можна досягти застосуванням широкосмугових сигналів. Традиційно забезпечення високої достовірності обміну даними в комунікаційних каналах ґрунтується на методах формування та оброблення широкосмугових сигналів з великою базою, при цьому найширше застосування отримали засоби реалізовані на

основі формування дискретних псевдовипадкових послідовностей та кореляційного опрацювання сигналів. Проте згадані технології мають низку недоліків, які обмежують їх практичну реалізацію, пов'язану з необхідністю застосування складних апаратних та алгоритмічних методів формування псевдовипадкових послідовностей, необхідністю зберігання еталонів сигналів в пристроях оброблення, використанням складних алгоритмів кореляційного опрацювання та переважним використанням неоптимальних методів оброблення гармонійних сигналів-носіїв. При цьому, як правило, в якості маніпульованих ознак таких сигналів використовують амплітуду, частоту, фазу або комбінації цих ознак.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ В ЦІЛОМУ

Необхідність у якісному та швидкому обміні даними при реалізації інформаційних технологій на основі розподілених комп'ютерних та телекомунікаційних систем зумовлює практичне завдання по створенню простих, надійних та недорогих приймально-передавальних каналотворюючих пристроїв. Результативне вирішення цього завдання можливе за умови успішного розв'язання наукових проблем створення та розвитку нових ефективних методів передавання та приймання інформації в таких системах, зокрема, методів формування та опрацювання широкосмугових сигналів.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Традиційні методи (DSSS, FHSS) формування широкосмугових сигналів описані в роботах [1-3]. Методи формування надширокосмугових сигналів (UWB) описані в роботах [4, 5]. Використання явищ детермінованого динамічного хаосу для цілей формування та оброблення сигналів описано в працях [6, 7]. В роботах [8, 9] запропоновано новий метод формування та опрацювання широкосмугових шумоподібних сигналів з керованою ентропією де значення ентропії розподілу амплітуд сформованого випадкового сигналу ставиться у відповідність до символів вихідного інформаційного повідомлення. Це дає можливість використовувати ентропію для ідентифікації символів повідомлення і не вимагає використання складних алгоритмів генерування псевдовипадкових послідовностей для розширення спектру сигналів. Опрацювання таких широкосмугових сигналів ґрунтується на статистичному оцінюванні значень ентропії відповідних фрагментів суміші сигналу та завад (символьних інтервалів) з подальшим ухваленням рішення про дискретне значення символу повідомлення, що на відміну від кореляційних методів не потребує зберігання еталонів форми оброблюваних сигналів. Слід підкреслити, що в цьому методі використовується ентропія сигналу-носія, а не інформаційна ентропія самого повідомлення. На даний час проведено дослідження впливу завад, що діють у каналі, на такі сигнали [10]. Оцінена завадостійкість методу. Проведено порівняння часової складності реалізації методу у порівнянні з класичним кореляційним опрацюванням сигналів. Раніше не вирішеною частиною загальної проблеми, що не розглядалась раніше, є питання ефективності використання частотного ресурсу такими сигналами, саме цьому і присвячена дана робота.

Формулювання цілей даної роботи. Отже, об'єктом дослідження є ефективність використання частотного ресурсу при формуванні широкосмугових сигналів з керованою ентропією. Основною метою роботи є розроблення програмного забезпечення для оцінки рівномірності спектрального складу широкосмугових сигналів та отримання кількісних показників для сигналів з керованою ентропією і їх порівняння з класичними традиційними підходами.

ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ ДОСЛІДЖЕНЬ

При формування широкосмугових сигналів має місце суттєва нерівномірність розподілу енергії сигналу за частотами. Отже, різні способи формування широкосмугових сигналів характеризуються різною ефективністю використання частотного ресурсу. Тому існує необхідність дослідження цього параметру та створення нових методів та засобів формування широкосмугових сигналів з покращеними частотними характеристиками.

Дослідження проведено шляхом моделювання в обчислювальному експерименті за допомогою спеціально розробленого у середовищі MATLAB 6.5 [11] програмного забезпечення. MATLAB це пакет прикладних програм призначений для здійснення технічних обчислень. Має вбудовану інтерпретовану мову програмування та середовище розроблення. Працює з матричними структурами даних. Містить широкий спектр готових функцій. Має об'єктно-орієнтовані можливості і інтерфейси з програмним забезпеченням, реалізованим іншими мовами програмування. Існують версії для більшості сучасних операційних систем. Основною перевагою є оптимізована робота з матрицями.

Для імпорту досліджуваних сигналів у середовище та перетворення їх у вектори слід використати вбудований інтерфейс `import`, який дозволяє працювати з широким спектром файлів, зокрема WAV та TXT форматів.

Частотний спектральний аналіз [12] сформованих широкосмугових сигналів проведено у відповідності до перетворення Фур'є (1), шляхом розрахунку дискретного перетворення [13] за формулою (2) з подальшим розрахунком спектральної щільності енергії.

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-j2\pi ft) dt, \quad (1)$$

де $S_x(f)$ – комплексна спектральна щільність амплітуд, В/Гц

$x(t)$ – досліджуваний сигнал,

f – частота, Гц

t – час, с.

$$S_x(k \cdot F) = T_s \cdot \sum_{n=0}^{N-1} x(n \cdot T_s) \exp(-j2\pi nk/N), \quad (2)$$

де $S_x(kF)$ – дискретизована щільність амплітуд сигналу, В/Гц

$x(nT_s)$ – дискретизований досліджуваний сигнал, B

N – кількість відліків сигналу

T_s – інтервал дискретизації в часі, $T_s = 1/f_s$, с

f_s – частота дискретизації, Гц

k – частотний індекс, $k = 0, 1, \dots, N-1$,

n – часовий індекс, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

Інтервал дискретизації за частотою складає величину $F = 1/NT_s$ Гц, або $\Omega = 2\pi/NT_s$ рад/с. Спек-

тральна щільність енергії $\Psi_x(f) = |S_x(f)|^2$ визначається в дискретизованому вигляді на частотах

kF як $\Psi_x(kF) = |S_x(kF)|^2$, а значення повної енергії

$E_x = \int_{-\infty}^{+\infty} \Psi_x(f) df$ сигналу можна отримати через

дискретні значення як $E_x = \frac{1}{NT_s} \sum_{k=0}^{N-1} |S_x(kF)|^2$.

MATLAB має вбудовану функцію `fft(A)`, яка реалізує дискретне перетворення Фур'є вектора A . Результатом її роботи є спектр амплітуд, у вигляді вектора комплексних чисел. Для зміщення елемента, що відповідає нульовій частоті в центр масиву слід використати вбудовану функцію `fftshift(A)`.

Для визначення спектральної щільності енергії і повної енергії сигналу розроблено наступна процедура, організована у вигляді m -файла:

```
A=filename.data; % для WAV-файлу
Fsam=filename.fs
T=1/Fsam
N=length(A);
F=1/(N*T)
A=(abs(T*fft(A))).^2;
A(N/2+2:N)=[];
A=A.*2;
Energy=sum(A)*F
```

Візуалізація отриманих результатів здійснюється за допомогою вбудованих засобів. Для автоматичного відображення графіків спектральної щільності енергії з бажаними параметрами використовується наступна процедура:

```
B=1:1:N/2+1;
B=B-1;
B=B.*F;
```

```
plot(B,A,'k-')
grid on
```

Для кількісної оцінки ефективності використання частотної смуги автором запропоновано використати коефіцієнт $K_{\text{еф.вик}}$, який показує відношення енергії досліджуваного сигналу до можливої енергії сигналу в разі, якщо його спектральна щільність енергії рівномірна, і її рівень дорівнює максимальному значенню щільності енергії досліджуваного сигналу:

$$K_{\text{еф.вик}} = \frac{E_x}{E_{\text{max}}}, \quad (3)$$

де E_{max} – максимально можлива енергія сигналу, в разі рівномірної спектральної щільності,

E_x – енергія досліджуваного сигналу $x(t)$.

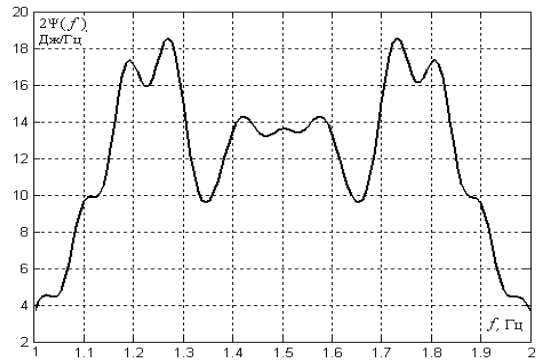
Для такого роду досліджень існує можливість генерування тестових сигналів програмним шляхом в середовищі MATLAB. Іншою альтернативою є застосування спеціалізованого програмного забезпечення, наприклад, Sonic Foundry Sound Forge. Це цифровий аудіоредактор призначений для професійної та напівпрофесійної роботи. Основними особливостями є опрацювання сигналів в реальному часі, підтримка високорозрядних форматів, вбудовані генератори «білого», «рожевого» та «коричневого» шумів, DTMF/MF сигналів, генератори простих форм, як то синусоїдна, прямокутна, трикутна і т. ін. Для аналізу реальних сигналів необхідно мати фізичний інтерфейс для масштабування, оцифровування сигналів та обміну даними з комп'ютером. Найпростішим варіантом є використання звукового адаптера, вбудованого в більшість сучасних комп'ютерів і програмних засобів запису сигналів, що інтегровані в сучасні операційні системи або спеціалізованих програмних засобів. Зокрема можливість запису сигналів з широкими можливостями корекції параметрів присутня в програмі WaveLab. Проте недоліком такого підходу є обмежена частотна смуга, як правило, величиною порядку сотень кГц і наявність тільки двох каналів. Для аналізу реальних сигналів за восьми незалежними каналами автором розроблено спеціалізоване апаратне та програмне забезпечення на базі мікроконтролера AVR типу ATmega168A-AU та інтерфейсу TTL-UART-RS-232 типу MAX232, що увімкнені за типовими схемами. В програмі здійснюється постійне перемикання входів АЦП з подальшим виведенням одержаних відліків сигналів в комунікаційний порт. Фіксація інформації зі сторони

комп'ютера можлива як за допомогою термінальної програми, наприклад, Hyper Terminal з розміщенням інформації в текстовому файлі з подальшим імпортуванням в MATLAB, так і з використанням можливостей MATLAB по роботі безпосередньо з комунікаційними портами. Ділянка програмного коду, що здійснює перемикання входів АЦП для компілятора WinAVR наведена нижче. WinAVR це компілятор з C-подібної мови для мікроконтролерів AVR, що розповсюджується як вільне програмне забезпечення [14].

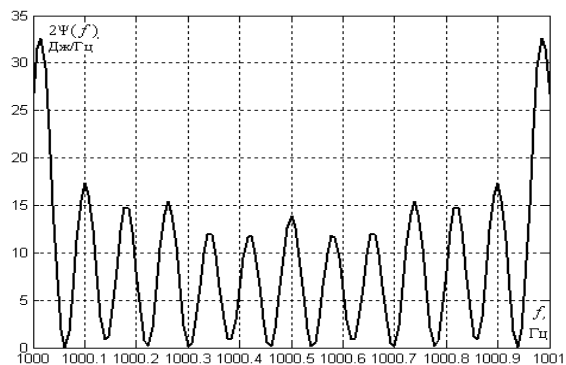
```
#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>
#include "ADC.h"
unsigned int data[8];
static unsigned char index=0;
ISR (ADC_vect)
{ data[index]=ADCW;
  if (++index > 7) index=0;
  ADMUX=0x40+index;
  _delay_loop_1(200);
  ADCSRA|=0x40; }
```

Однобічна спектральна щільність енергії змодельованого частотно модульованого за лінійним законом сигналу представлено на рисунку 1, а). Параметри сигналу наступні: тривалість 13 с, енергія 13 Дж, база 11,14 дБ, форма модульованого сигналу синусоїдна, протягом тривалості сигналу значення частоти модульованого сигналу змінюється від 1 до 2 Гц. Як можна побачити, використання частотної смуги каналу є відносно рівномірним, з наявністю локальних екстремумів, що розташовані на частотах кратних до оберненої тривалості сигналу. У даному випадку, максимальне значення щільності енергії сигналу складає 18,47 Дж/Гц, а потенційне значення енергії в смузі частот 1 Гц, відповідно 18,47 Дж, отже, значення коефіцієнту дорівнює $13 \text{ Дж} / 18,47 \text{ Дж} = 0,704$.

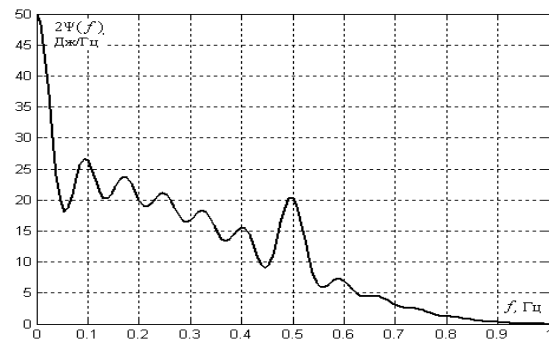
Спектральна щільність енергії змодельованого МС сигналу наведена на рисунку 1, б). Параметри сигналу повністю аналогічні розглянутому вище. Сигнал є адитивною сумішшю 13-ти синусоїдних складових з однаковою початковою фазою в смузі частот 1 Гц, з відстанню між ними 1/13 Гц. Як можна побачити, використання частотного ресурсу є суттєво нерівномірним. Значення коефіцієнту складає близько 0,4.



а)



б)



в)

Рисунок 1 – Спектральна щільність енергії широко-
смугових сигналів:

а) FM сигнал, б) МС сигнал, в) DSSS сигнал (код Баркера)

Однобічна спектральна щільність енергії одного з варіантів змодельованого DSSS сигналу, сформованого за допомогою 13-бітового коду Баркера наведена на рис. 1, в). Параметри сигналу наступні: тривалість сигналу 13 с, тривалість елементарного сигналу 1 с, енергія 13 Дж, база 11,14 дБ. Графічне представлення наведено для смуги частот від 0 до 1 Гц, що відповідає інтервалу до першого нуля спектральної щільності енергії елементарного сигналу. Як можна побачити рисунку з 1, в),

використання частотного ресурсу є нерівномірним. Значення коефіцієнту складає 0,26. Низьке значення коефіцієнту, в даному випадку, пояснюється наявністю значного рівня постійної складової, обумовленої незбалансованістю сигналу Баркера з довжиною 13.

Спектральна щільність енергії змодельованого сигналу FHSS подано на рис. 2, а). Як можна побачити, характерним є те, що енергія сигналу відносно рівномірно розподілена у частотній області, значення коефіцієнту складає 0,62, проте, слід зауважити, що спектрограма представлена рис. 2, а) розрахована протягом усієї тривалості символного інтервалу (для досліджуваного сигналу тривалість складає 16 с). Якщо ж розгляд обмежити тривалістю елементарного сигналу (для даного випадку 4 с), то можна побачити, що протягом його тривалості використовується тільки одне значення частоти, а енергія на всіх решта частотах практично відсутня, що пояснюється принципом формування таких сигналів (див. рис. 2, б)). Щільність енергії першого елементарного сигналу показана суцільною лінією, щільності решти сигналів - пунктирною. Таким чином, використання частотного ресурсу для таких сигналів слід вважати суттєво нерівномірним. Коефіцієнт використання для розглянутого сигналу складає близько 0,25.

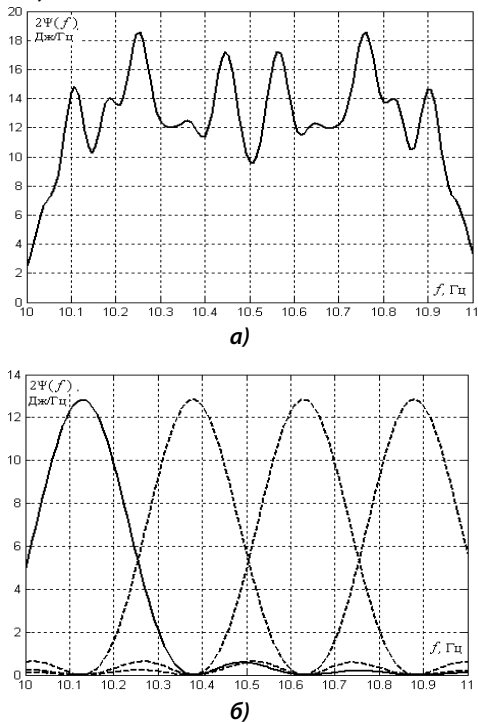


Рисунок 2 – Спектральна щільність енергії: а) FHSS сигналу, б) елементарних сигналів FHSS

Спектральна щільність енергії сигналів з керованою ентропією аналогічна до щільності випадкового сигналу з характеристиками наближеними до характеристик "білого шуму" і є рівномірною.

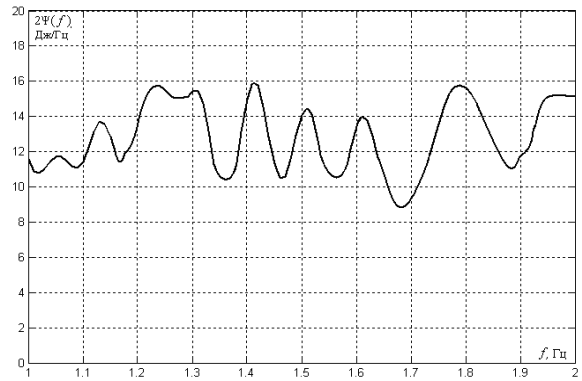


Рисунок 3 – Спектральна щільність енергії випадкового сигналу з керованою ентропією з параметрами наближеними до «білого» шуму.

Ідеалізований графік однобічної спектральної щільності для такого фільтрованого сигналу тривалістю сигналу 13 с енергія 13 Дж має вигляд прямої лінії на рівні 13 Дж/Гц в смузі від 0 до 1 Гц. У порівнянні з результатами, що представлені на рис. 1 та 2 можна зробити висновок, що у цьому випадку використання частотного ресурсу є суттєво рівномірнішим і для ідеалізованого випадку дорівнює одиниці. Проте, оцінки спектрів змодельованих сигналів показують, що спектральна щільність хоча і може бути апроксимована такою залежністю, вона містить випадкові відхилення від ідеалізованої кривої. Для змодельованого сигналу, графік щільності енергії якого, представлено на рисунку 3, значення коефіцієнту складає близько $13/16 = 0,81$.

Основні результати досліджень. Отримані коефіцієнти для різних типів сигналів подані в табл. 1.

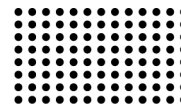
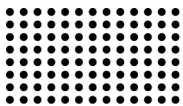
Таблиця 1 –

Коефіцієнти ефективності використання частотного ресурсу

Тип сигналу	FM	MC	FHSS	DSSS	Керована ентропія
$K_{\text{еф.вик}}$	0,704	0,4	0,62	0,26	0,81

ВИСНОВКИ

В роботі показано застосування сучасних інформаційних технологій та програмних засобів при моделюванні та аналізі каналів телекомунікаційних та



комп'ютерних систем. Отримано числові характеристики ефективності використання частотного ресурсу при формуванні широкосмугових сигналів за найбільш поширеними методами. Встановлено, що широкосмугові сигнали з керованою ентропією характеризуються більшою ефективністю та рівномірністю використання частотного ресурсу у порівнянні з традиційними широкосмуговими сигналами. Як відомо з [3], усі позитивні якості широкосмугових сигналів проявляються тим виразніше, чим рівномірніше є розподіл енергії за частотами. Отже, слід очікувати покращення характеристик обміну даними між комунікаційними засобами саме для випадку застосування випадкових широкосмугових сигналів з керованою ентропією, що приведе до зменшення похибок у

трактах обміну даними в інформаційних телекомунікаційних мережах та розподілених комп'ютерних системах загального та спеціального призначення.

ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основними перспективними напрямками подальшого дослідження є вдосконалення процедури оцінювання ентропії, з метою мінімізації ймовірності помилок та суттєвого прискорення обчислень при цифровому опрацюванні сигналів, підвищення ефективності процедури демодуляції, реалізація методів ефективної бітової синхронізації тощо.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Bernard Sklar. Digital communications: fundamentals and applications /Bernard Sklar – 2-ed. – Prentice-Hall PTR, 2001. – 1079 p.
2. John G. Proakis, Masoud Salehi. Digital Communications /John G. Proakis, Masoud Salehi. – McGraw-Hill higher education, 2008. – 1050 p.
3. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами /Варакин Л.Е. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.
4. Шахнович И. Сверхширокополосная связь. Второе рождение? /Шахнович И. //Электроника: НТБ. – 2001. – №4. – С.8-15.
5. Бунин С. Назад к Герцу? /Бунин С. //Радио. – 1990. – №7. – С.17-20.
6. Дубровский В. Анализ возможностей применения хаоса в современных системах связи [Електронний ресурс] /В. Дубровский. – Режим доступу: http://www.radioradar.net/articles/scientific_technical/haos2.html
7. Бельский Ю.Л. Передача информации с помощью детерминированного хаоса /Бельский Ю.Л., Дмитриев А.С. //Радиотехника и электроника. – 1993. – Т.38. – № 7. – С.1310-1315.
8. Пат. 81017 Україна, МПК (2006) H04B 1/69. Спосіб передавання та приймання інформації /Мельничук С.І., Козленко М.І. (Україна). – заявка № а 2005 08893; заявл. 19.09.2005; опубл. 26.11.2007, Бюл. №19.
9. Козленко М.І. Формування та обробка широкосмугових сигналів на основі випадкових процесів зі змінною ентропією розподілу імовірностей станів /Козленко М.І., Мельничук С.І. //Наукові вісті інституту менеджменту та економіки «Галицька академія». – 2006. – №1 (9). – С.28-31.
10. Мельничук С.І. Дослідження статистичних характеристик випадкових сигналів провідникових та радіоканалів обміну даними розподілених систем контролю /Мельничук С.І., Козленко М.І. //Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – №4. – Частина 1. – Том 2. – С.62-65.
11. Ануфриев И.Е. MATLAB 7 /Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 1104 с.
12. Криксунов В.Г. Спектральный анализ электрических сигналов /Криксунов В.Г. – К.: Техніка, 1971. – 196 с.
13. Гольденберг Л.М. Цифровая обработка сигналов: Справочник /Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. – М.: Радио и связь, 1985. – 312 с.
14. WinAVR [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.source-forge.net/projects/winavr.html>