

## SIMPLE DIGITAL QAM-MODULATOR FOR HOBBY PROJECTS OR EDUCATIONAL PURPOSES

### ОПРОСТЕН ЦИФРОВ QAM-МОДУЛАТОР ПРИЛОЖИМ ЗА ЛЮБИТЕЛСКИ И ОБРАЗОВАТЕЛНИ ЦЕЛИ

**Tsveti Hranov, Kamen Valkov, Nikolay Hinov**

Power Electronics Department, Technical University Sofia, 8 St. Kl. Ohridsky Blvd., 1000  
Sofia, Bulgaria, e-mail: chranov@tu-sofia.bg

**Цвети Хранов, Камен Вълков, Николай Хинов**

Катедра „Силова Електроника“, Технически Университет София, бул. „Св. Кл.  
Охридски“ 8, София 1000, България, e-mail: chranov@tu-sofia.bg

**Keywords:** QAM-modulation, education, algorithms, numerical methods

*Abstract – The paper present the creation of a simple QAM-modulator with a low-end microcontroller which can be used for demonstrating the principles of the quadrature-amplitude modulation – it's realization and a short introduction of the advantages, disadvantages and applications. Also, it is presented an algorithm based on the numerical methods, which is well suited against the hardware capabilities of the microprocessor and it's advantages are compared against the other regularly used methods.*

*Резюме – Докладът има за цел да представи съставянето на прост QAM-модулатор с помощта на нискобюджетен микроконтролер, който може да се използва за запознаване с принципите на квадратурно-амплитудната модулация, нейното реализиране и накратко са описани нейните предимства, приложение и недостатъци. Освен това е представен и алгоритъм, базиран на числените методи, който е подходящо пригоден спрямо хардуерните възможности на микропроцесора и са обосновани неговите предимства спрямо другите стандартно използвани подходи.*

## 1. УВОД

Квадратурно-амплитудната модулация (QAM) е комбинация от амплитудна и фазова модулация, предназначена за предаване на информация. Тя намира основно приложение в цифровата телевизия и кабелните модеми. Нейното математическо описание се представя чрез смесването на два синусоидални

сигнала, с  $90^\circ$  фазова разлика и различна амплитуда, от където идва и наименованието  $Q$  – квадратурна. За предаването на цифрова информация обикновено се съставя диаграма, която илюстрира на каква амплитуда и фаза съвпада даден цифров код. Обикновено комбинациите от различни фазови разлики и амплитуди е кратна на  $4^n$  като броя им е по равно разпределен. Тази диаграма се нарича констелационна (от constellation – съзвездие), тъй като се чертае на две оси като съвкупност от точки. В някои страни модулацията на кабелната телевизия е QAM-16 и QAM-64, като се предвижда (като стандартизация) преминаването към по-сложна модулация като QAM-256.

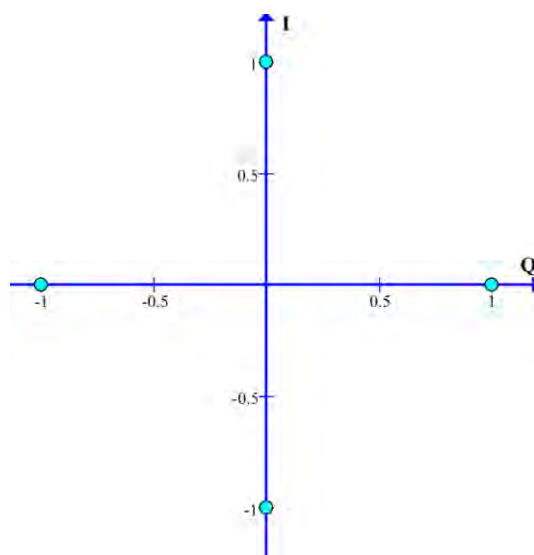
## 2. СЪСТОЯНИЕ НА ПРОБЛЕМА

Много фирми предлагат интегрирани готови решения за реализиране на такава модулация [3, 4, 5, 6] – например Direct digital synthesizer (DDS), Numerically controlled oscillator (NCO), Digitally controlled oscillator (DCO) и други. Тези интегрални схеми представляват специализирани цифрово-аналогови преобразуватели, които синтезират дискретен сигнал наподобяващ синусоида. Те съдържат в себе си памет, в която са записани дискретни стойности на синусоидална функция. С помощта на брояч тези стойности се обхождат една след друга и се предават на входа на интегрирания ЦАП. Чрез управляваща логика и регистри се настройва изходната честота и началната фаза. По този начин чрез подходящо управление на тези регистри може да се реализира квадратурна модулация. Основно тези схеми са предназначени за комуникационни устройства и техните изходни честоти достигат стойности от няколко MHz до около GHz, като освен това имат и голяма прецизност.

Освен това има и публикации, които представят сложни устройства реализирани чрез цифрови сигнални процесори [1, 7]. Те са пригодени да правят анализ на потока данни или просто да оползотворят процесорно време и да намалят броя на дискретните блокове. Акцентът на този доклад е да представи опростено устройство, което всеки любител или учащ се може да сглоби, с неголеми инвестиции, което да представи по нагледен начин основните принципи на цифровата QAM-модулация.

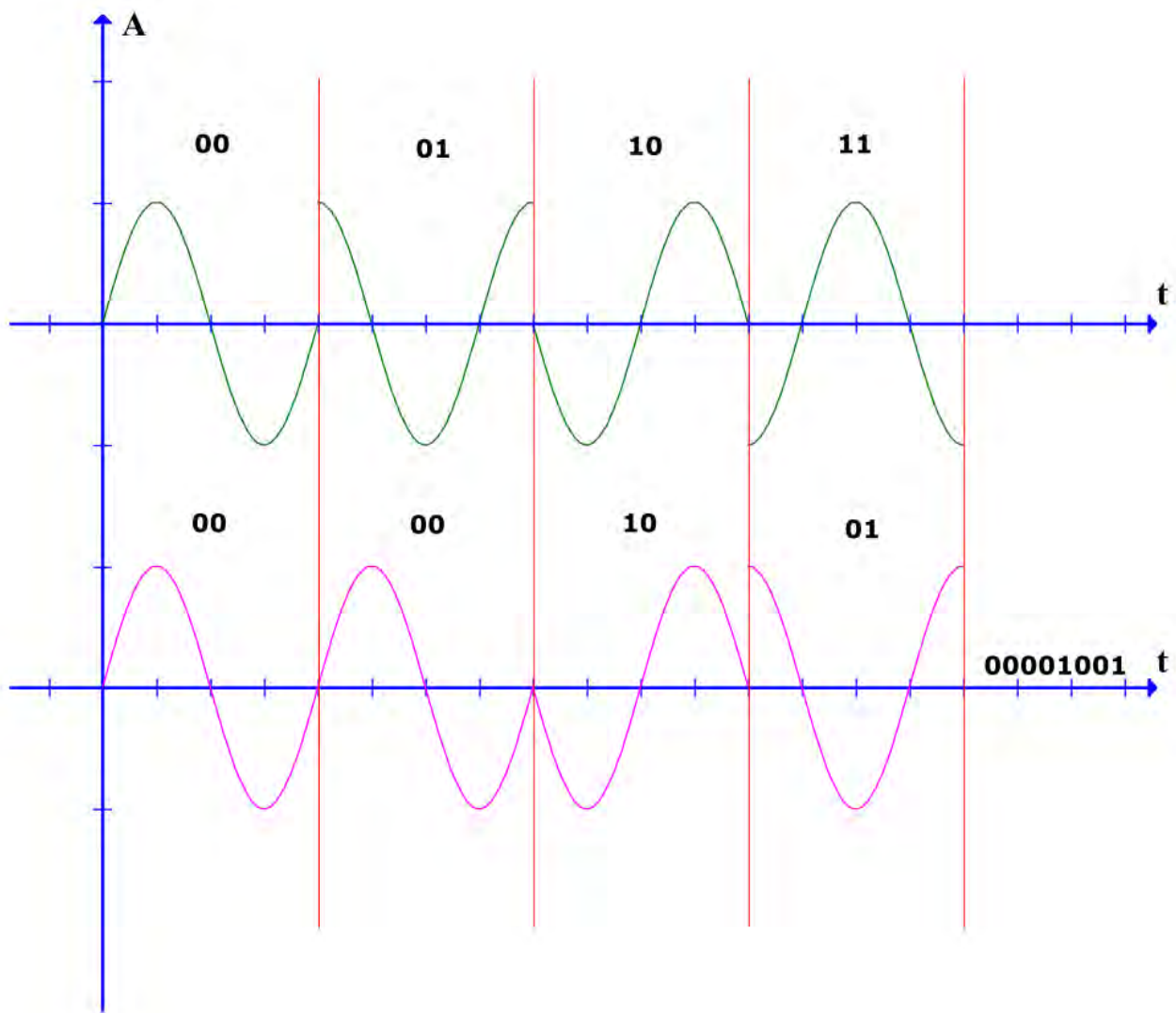
## 3. КРАТКА ТЕОРЕТИЧНА ОБОСНОВКА

За да можем да съставим модулатора, трябва да опишем принципите на квадратурната модулация. Първо е необходимо да изберем колко нива на изменение на амплитудата и фазата са ни необходими. За простота нека те да са по две – получаваме констелационна диаграма с четири точки – тя е дадена на фиг. 1. Ако приемем, че посоката на въртене на единичната окръжност е срещу часовниковата стрелка, то за кодирането на



Фиг 1: Констелационна диаграма за QAM-4

един символ избираме квадранта в който се намира и по този начин определяме началната фаза на синусоидата. След това тя се възпроизвежда в рамките на един период (т.е. обхождаме един път тригонометричната окръжност до началната му точка) и след това възпроизвеждаме синусоидата на следващия символ. На фиг. 2 е дадена примерна поредица от кодове и неговата изходна генерирана кодировка.

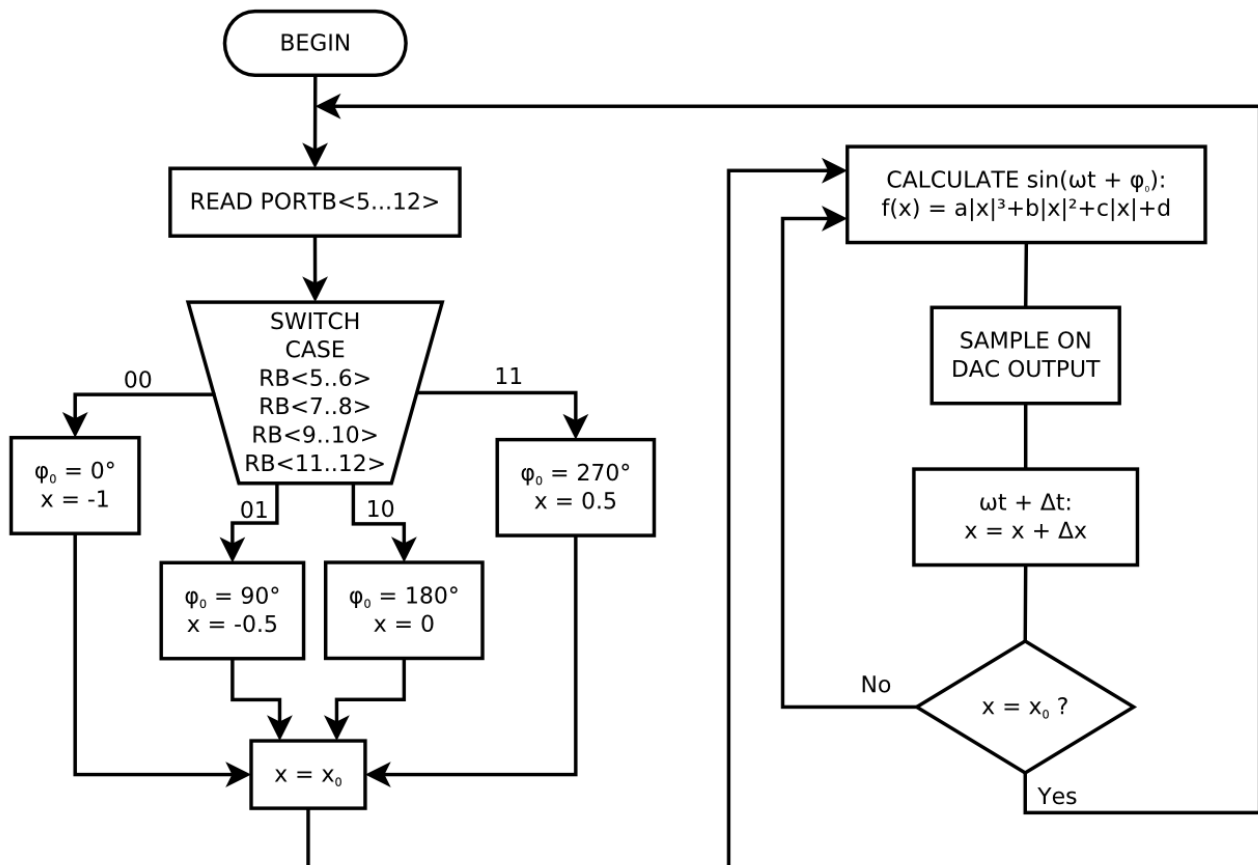


Фиг. 2 Илюстрация на кодирането в QAM = 4; горе – кодирането на символите и долу – примерна кодирана поредица

Този начин за кодиране позволява по-пълноценно използване на носещата честота в сравнение с други техники. Теоретично колкото е по-голям броят на точките в констелационната диаграма толкова повече информация може да се представи по канала. Практически обаче се увеличава шанса за възникване на грешка при предаването в следствие на шум или интерференция. Някои съвременни устройства имат възможността да анализират броя на грешките и динамично да адаптират броя на точките в диаграмата, с цел когато средата позволява данните да се предават бързо, като се направи баланс между загубата



наблюдава с осцилоскоп, като с ключетата може в реално време да се променя сигнала. Блок диаграма на цялата програма е дадена на фиг. 4.



Фиг. 4: Блок диаграма на програмата на микроконтролера

Интересна част от алгоритъма на работа е изчислението на моментните стойности на синусоидата. Вместо да се използва много разпространения метод с таблица от моментните стойности, тя се изчислява в реално време от процесора. За разлика от по-мощните процесори, които имат хардуерни блокове за изчислението на тригонометрични и други специални функции, този микроконтролер има опростена архитектура. Наличието обаче на хардуерен умножител позволява синусоидата да се изчислява с помощта на полиномна апроксимация, като изчисленията стават с помощта на представянето на числата с фиксирана запетая. За минимално време на изчисление и достатъчно голяма точност ( $R^2 = 0,99$ ) избираме полином от трета степен от вида:

$$f(x) = a|x|^3 + b|x|^2 + c|x| + d \quad (1)$$

$$x \in [-1, 1]$$

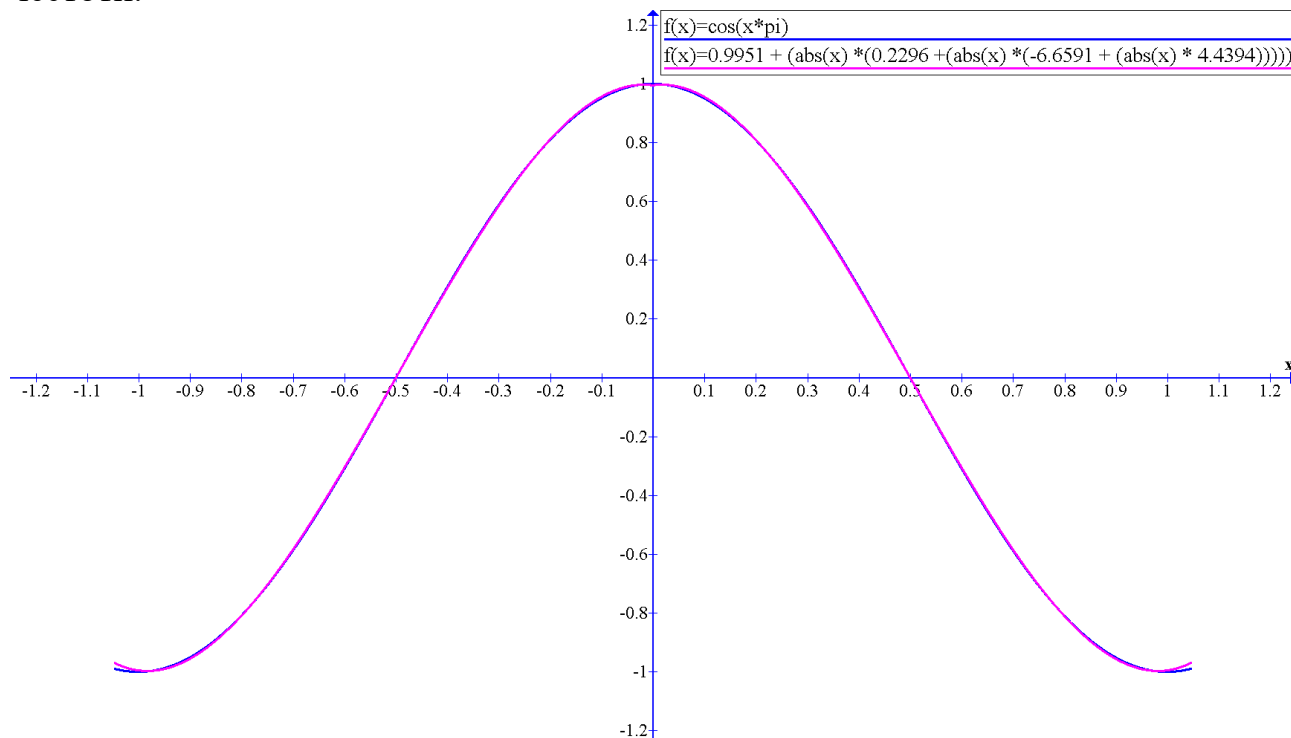
За удобство се използва функцията косинус, тъй като е симетрична около нулата. Този полином описва един полупериод на косинус. За да получим описание на функцията в рамките на един период, взимаме модул от аргумента  $x$ , чрез което функцията се получава симетрична. За да приведем функцията в интервала  $[-1, 1]$  разделяме коефициентите  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $d$  на  $\omega^n$ , където  $n$  е степента на  $x$ . Окончателните стойности на коефициентите са:

$$\begin{cases} a = 4,439 \\ b = -6,6591 \\ c = 0,2296 \\ d = 0,9951 \end{cases} \quad (2)$$

$$f(x) = a|x|^3 + b|x|^2 + c|x| + d$$

Тъй като използвания микропроцесор не поддържа смятане с плаваща запетая, се използват изчисления с фиксирана, което теоретично погледнато аритметическо-логическия блок за целочислени операции може безпроблемно да извършва. Необходимо е единствено да се съблюдава условието за нормиране, в противен случай резултата ще бъде невалиден (в следствие на грешно представяне). Съдейки по най-големия по абсолютна стойност коефициент, ще трябва единствено да се нормира по схемата  $\pm Q2^3, 2^{11}$ . Ако това е изпълнено по-нататък резултата ще е в диапазона  $[+1, -1]$  след като се умножи по  $2^3$ .

На фиг. 5 са начертани двете функции за сравнение на точността. Вижда се, че полиномната апроксимация от трета степен припокрива функцията с достатъчна точност за целите на нейното възпроизвеждане. Същевременно ниската степен на полинома позволява по-бързо изчисление на моментните стойности, което дава възможност да се синтезират синусоиди с високи честоти.

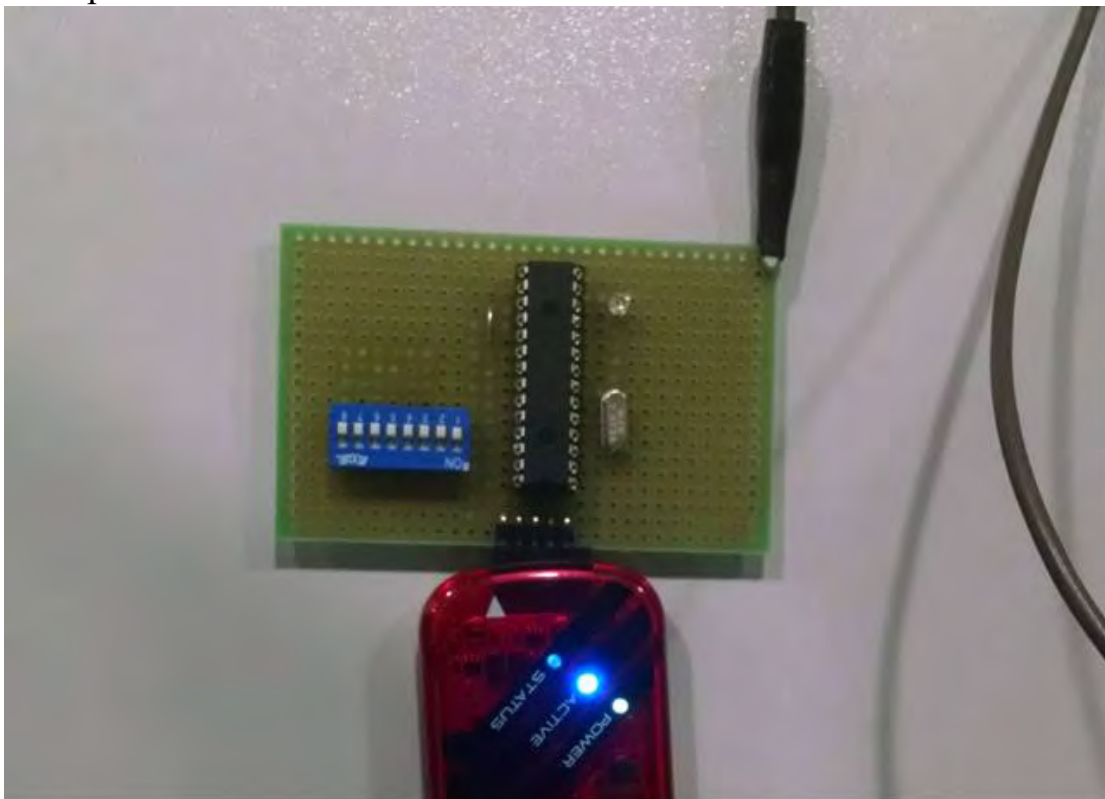


Фиг. 5: Полиномна апроксимация на функцията косинус.

## 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИ РЕЗУЛТАТИ

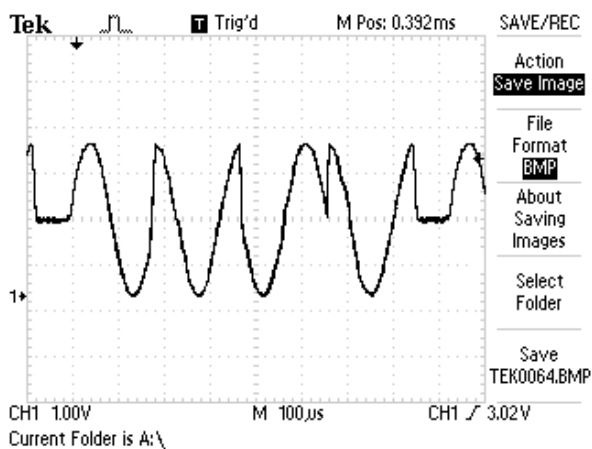
На фиг. 6 е показана хардуерната реализация на макета. Пасивните елементи са запоени чрез повърхностен монтаж, върху страната с пистите. В случая

захранването се подава от програматора, понеже цялостната консумация на макета е сравнително ниска.



Фиг. 6: Снимка на създадения макет

С помощта на цифров осцилоскоп са снети времедиаграмите на изхода на вградения цифрово-аналогов преобразувател. Условно за „нулево“ ниво е избрано половината от размаха на ЦАП-а – в случая половината от захранващото напрежение. Ако към схемата се добави един операционен усилвател, работещ като повторител с постояннотокково изместване, ще може да се реализира двуполярна синусоида. Представената на фиг.7 осцилограма показва реализацията на кодировката от фиг.2.



Фиг. 7: Осцилограма на изхода на вградения ЦАП.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализът на получените резултати, показва, че с предложения алгоритъм и схемно решение се реализира функционален макет. По този начин става възможно с достъпни средства да се синтезира искания тип модулация. Едно естествено продължение и развитие на макета е работата с увеличаване на броя на фазовите точки. Основното предимство на предложения подход, е че може успешно да се прилага в учебния процес.

## 7. REFERENCES

- [1] E. Vladkov, "A general concept and implementation of a DSP-based QAM digital modulator", *J. "Electrotechnica & Electronica E+E"*, Sofia, Bulgaria, vol. 1+2, pp. 18-25, 2015.
- [2] Altera Corporation, "Versatile Digital QAM modulator" Whitepaper Dec 2010, [http://www.altera.com/en\\_US/pdfs/literature/wp/wpstxiiqam.pdf](http://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/wp/wpstxiiqam.pdf)
- [3] <http://www.analog.com/en/products/clock-and-timing/direct-digital-synthesis.html>
- [4] <http://www.ti.com/lscds/ti/clock-and-timing/rf-plls-and-synthesizers-overview.page>
- [5] <http://www.maximintegrated.com/en/products/comms/wireless-rf.html>
- [6] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00001523A.pdf>
- [7] B.V.V. Satyanarayana, A.Pravin, S. Mohd , S. Durga, "Design of Quadrature Amplitude Modulation System for Wireless Applications", *J. "International Journal of Electronics & Communication Technology – IJECT"*, vol. 2, pp. 241-243, 2011.
- [8] Сагдиев Р.К., Базлов Е.Ф., "Цифровая модуляция", *Методические указания к лабораторным работам по дисциплине „Теория радиотехнических сигналов“*, Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет, Казан, России, 2013.
- [9] А. Б. Сергиенко., "Цифровая обработка сигналов", *Питер*, России, 2002.
- [10] National instruments Rusia, Практический курс основы передачи ВЧ сигналов <http://db.zloia.ru/lib/exe/fetch.php/labview>