

РОЗДІЛ «РАДІОЕЛЕКТРОНІКА»

УДК 621.396.67:001.57

С'ЯНОВ О.М., д.т.н., професор
КОСУХІНА О.С., к.т.н., доцент
КОСУХІН О.В., студент

Дніпродзержинський державний технічний університет

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РУПОРНОЇ АНТЕНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Вступ. Рівень розвитку техніки антен та НВЧ-пристроїв багато в чому визначають стан телекомунікаційних систем, радіолокації, навігації, антен зв'язку, радіоуправління, телеметрії, радіоастрономії тощо. На сьогоднішній час вони є однією з областей радіотехніки, що дуже швидко розвиваються. Сучасні досягнення в техніці антен і НВЧ-пристроїв базуються на останніх розробках електроніки, напівпровідникової техніки, технічної кібернетики, когерентної радіооптики тощо. Нові характеристики радіоелектронних систем у багатьох випадках досягаються завдяки органічному злиттю антени з передавальними, приймальними пристроями і системою просторово-часової обробки сигналів. Збільшення числа одночасно працюючих радіосистем призводить до насиченості навколишнього простору радіосигналами, що викликає необхідність електромагнітної сумісності (ЕМС) цих систем. Для вирішення цього питання створюються рупорні антенні системи, що здатні адаптуватися в навколишньому оточенні. Тому актуальним питанням є дослідження числових характеристик таких антен.

Постановка задачі. У даній роботі проводиться чисельне дослідження електромагнітних характеристик рупорної антени з діелектричною лінзою та без неї методом скінченних елементів.

Результати роботи. Для розрахунку та дослідження властивостей рупорної антени застосовано метод скінченних елементів, реалізований у системі електродинамічного моделювання AnsoftHFSS.

Сутність цього методу полягає в тому, що простір, в якому поширюються електромагнітні хвилі, розбивається на найпростіші об'ємні елементи, що мають форму тетраедрів. В ході розбиття форма окремих елементів структури спотворюється. Це відноситься, в першу чергу, до скривлених поверхонь. Тому вибір розмірів тетраедрів впливає не тільки на точність визначення поля, але і точність апроксимації вихідної структури новою структурою, складеної з тетраедрів. Розмір кожного тетраедра повинен бути досить малий для того, щоб поле в його межах можна було описати простою функцією або набором функцій з невідомими коефіцієнтами. Ці коефіцієнти знаходяться з рівнянь Максвелла і граничних умов. В результаті електродинамічна задача зводиться до системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) щодо цих коефіцієнтів. Рішення СЛАР легко знаходиться чисельними методами.

Будемо вважати, що структура, яка аналізується, складається з двох металевих провідників: зовнішнього і внутрішнього (А і В). Простір між провідниками заповнений повітрям. Така структура може служити моделлю коаксіальної лінії з провідниками зі складним поперечним перерізом. Поле в поперечному перерізі коаксіальної лінії підпорядковується рівнянню Лапласа.

Задача визначення потенціалу ϕ в кожній точці простору може бути зведена до задачі мінімізації функціоналу $I(\phi)$:

$$I(\phi) = \iint_S \phi \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \right) dx dy = - \iint_S \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy, \quad (1)$$

де S – область, в якій шукається потенціал, тобто область, укладена між зовнішнім і внутрішнім провідниками.

Основним моментом методу скінченних елементів є подання невідомої функції $\phi(x, y)$ у вигляді розкладання по відомих базисних функціях з невідомими коефіцієнтами в межах кожної елементарної комірки. Цей розклад має наступний вигляд:

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^N A_i f_i(x, y), \quad (2)$$

де A_i – невідомі коефіцієнти, $f_i(x, y)$ – базисні функції. Коефіцієнти A_i шукаються з умови мінімуму функціонала (1), застосованого до кожного елементарного трикутника розбиття. Сукупність цих умов, записаних для всіх елементарних комірок, дозволяє записати шукану СЛАР відносно невідомих коефіцієнтів A_i :

$$\phi(x, y) = \sum_{i=1}^M U_i f_i(x, y), \quad (3)$$

де U_i – значення потенціалів у характерних точках, M – кількість характерних точок.

Будемо вважати, що число базисних функцій дорівнює M . Підставляючи вираз для потенціалу у вигляді суми базисних функцій у формулу (1), одержимо:

$$I_{ijk}(\phi) = - \iint_{S_{ijk}} \left[\left(\frac{\partial \bar{f}(x, y)}{\partial x} \bar{U}_{ijk} \right)^2 + \left(\frac{\partial \bar{f}(x, y)}{\partial y} \bar{U}_{ijk} \right)^2 \right] dx dy, \quad (4)$$

де індекси i, j, k показують, що даний параметр відноситься до трикутника з вершинами i, j, k . У розгорнутій формі функціонал (4) приймає наступний вигляд:

$$I_{ijk}(\phi) = - \iint_{S_{ijk}} \left[\left(\sum_{n=1}^M \frac{\partial f_n(x, y)}{\partial x} U_{ijk,n} \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^M \frac{\partial f_n(x, y)}{\partial y} U_{ijk,n} \right)^2 \right] dx dy. \quad (5)$$

СЛАР для елементарного трикутника шукається з умови мінімуму функціонала по всіх аргументах $U_{ijk,n}$, це призводить до знаходження значень потенціалу у вузлових точках:

$$\sum_{n=1}^M \iint_{S_{ijk}} \left(\frac{\partial f_n(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial f_m(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f_n(x, y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial f_m(x, y)}{\partial y} \right) dx dy \cdot U_{ijk,n} = 0. \quad (6)$$

Введемо позначення: $Z_{nm}^{ijk} = \iint_{S_{ijk}} \left(\frac{\partial f_n(x, y)}{\partial x} \cdot \frac{\partial f_m(x, y)}{\partial x} + \frac{\partial f_n(x, y)}{\partial y} \cdot \frac{\partial f_m(x, y)}{\partial y} \right) dx dy.$

Тоді СЛАР (6) запишеться в компактному вигляді:

$$Z^{ijk} \bar{U}_{ijk} = 0.$$

Аналогічні СЛАР можна записати для всіх елементів розбиття. Тоді, об'єднуючи їх в одну СЛАР, отримуємо:

$$Z\bar{U} = 0, \quad \bar{U} = \begin{bmatrix} U_1 \\ \dots \\ U_N \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де N – загальне число вершин у розбитті. Матриця Z складається з елементів матриць Z_{nk} . Будемо вважати, що перші вершини лежать на поверхні металевих провідників. Виділимо U -вектори, що відповідають вершинам, які лежать на провідниках $\bar{U} = \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_i \end{bmatrix}$, де індекс 0 відповідає вершині на поверхні провідників, а індекс i – вершині, що лежить між провідниками.

Тоді СЛАР (7) набуває такого вигляду:

$$\begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{i0} \\ Z_{0i} & Z_{ii} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_i \end{bmatrix} = 0. \quad (8)$$

При цьому, оскільки відомі значення потенціалу на провідниках, вважаємо, що вектор U_0 відомий, тобто:

$$U_{0,i} = 0, \quad 1 \leq i \leq N_1, \\ U_{0,i} = W, \quad N_1+1 \leq i \leq N_2.$$

В цьому випадку маємо:

$$\bar{U}_i = -Z_{ii}^{-1} Z_{0i} \bar{U}_0. \quad (9)$$

Щоб отримати оптимальну розрахункову клітинку, HFSS використовує ітераційний процес, в якому крок між комірками автоматично зменшується в критичних областях. Спочатку генерується рішення, засноване на грубому початковому розбитті. Потім крок між комірками робиться частішим, ґрунтуючись на відповідних критеріях похибки, і генерується нове рішення. Коли різниця між знову перерахованими S -параметрами і знайденими на попередній ітерації збігається з заданою точністю, ітераційний процес закінчується.

Зв'язок матриці S з матрицею імпедансів Z має вигляд:

$$Z = \sqrt{Z_0} (I + S) (I - S)^{-1} \sqrt{Z_0}, \quad (10)$$

де S – матриця розміром $n \cdot m$, I – одинична матриця розміром $n \cdot m$, Z_0 – діагональна матриця, що має на головній діагоналі характеристичний імпеданс (Z_0) портів.

Використання матриці Z дозволяє перейти від S параметрів, розрахованих для портів із заданими опорами, до S -матриці, але з іншими портами S_w :

$$Z_\Omega = \sqrt{Y_\Omega} (Z - Z_\Omega) (Z + Z_\Omega)^{-1} \sqrt{Z_\Omega}, \quad (11)$$

де Z – матриця імпедансів вхідної структури, Z_Ω – матриця імпедансів вихідної структури, Z_Ω і Y_Ω – діагональні матриці, що мають по діагоналі нові повні опори і повну провідність.

Для чисельного дослідження були обрані рупорні антени для діапазону 2.4 ГГц. Тривимірна діаграма спрямованості антени без діелектричного заповнювача для цього діапазону та її розрахункові параметри зображені на рис.1 та 2 відповідно. Електро-

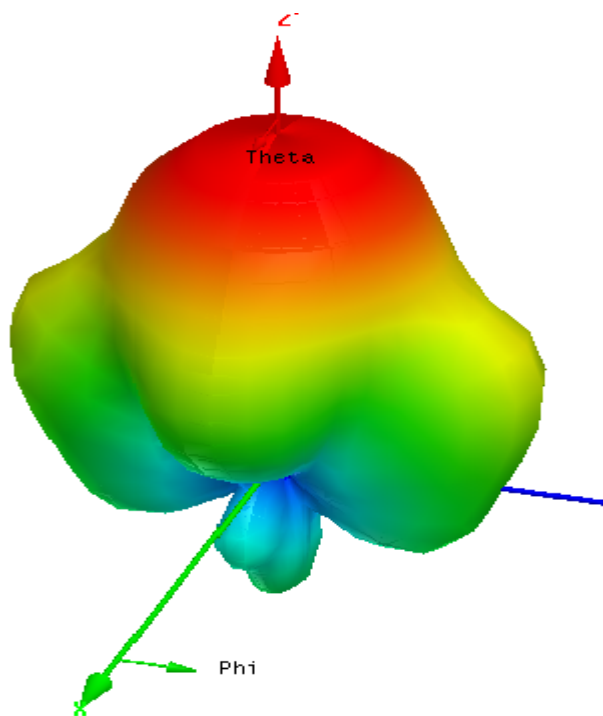


Рисунок 1 – Тривимірна діаграма спрямованості антени без заповнення діелектриком

магнітне поле, що розповсюджується по рупорній антені без діелектричного заповнювача та діаграма спрямованості рупорної антени, зображені на рис.3 та 4 відповідно. Чисельні розрахунки для рупорної антени, заповненої діелектриком, представлено на рис.5-6.

У результаті проведення досліджень у системі електродинамічного моделювання AnsoftHFSS створена рупорна антена з апертурною діелектричною лінзою.

Висновки. У даній роботі проведено чисельне моделювання та дослідження рупорної антени з діелектричною лінзою у системі електродинамічного моделювання AnsoftHFSS. Результати досліджень дали змогу визначити діаграму направленості антен різного діапазону. Аналізуючи чисельні результати,

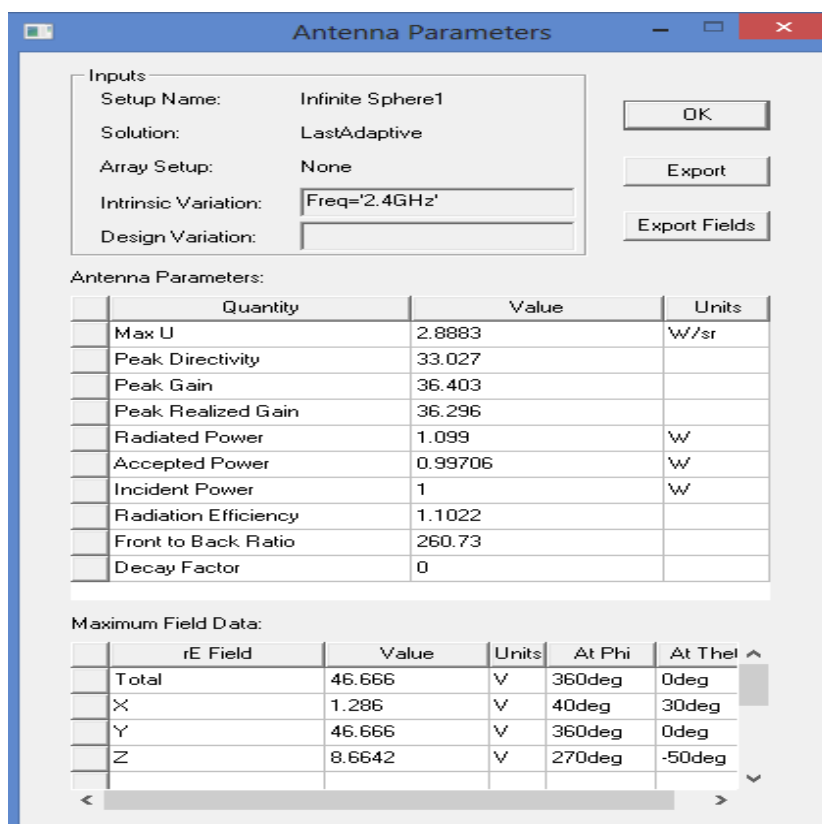


Рисунок 2 – Параметри рупорної антени без заповнення діелектриком

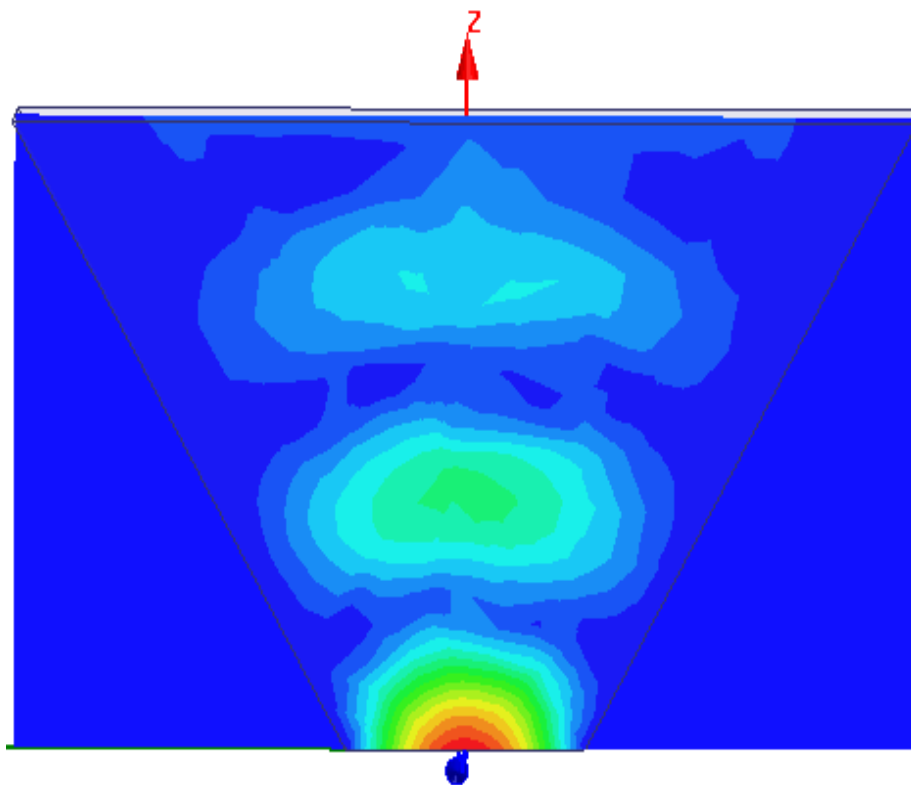


Рисунок 3 – Електромагнітне поле, що розповсюджується по рупорній антені в площині без діелектричного заповнювача

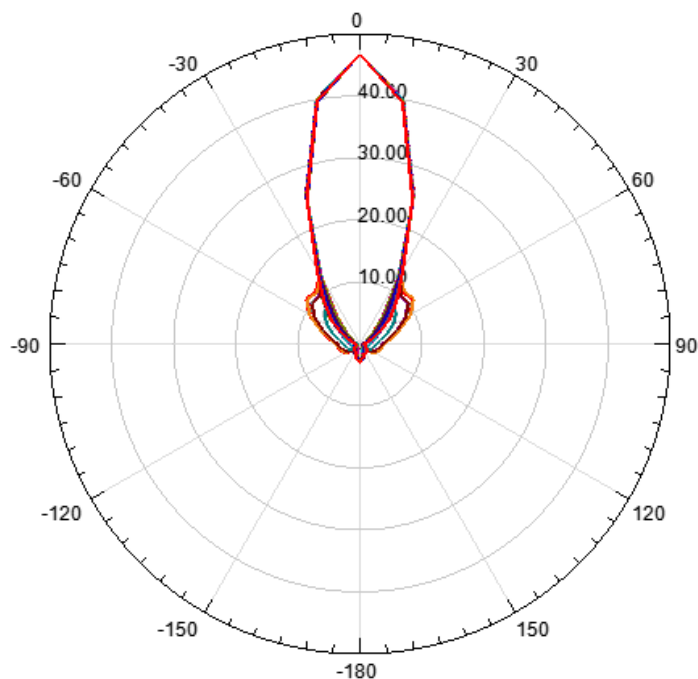


Рисунок 4 – Діаграма спрямованості рупорної антени без діелектричного заповнювача

було зроблено висновок про те, що у антени з діелектричним живленням кращі електродинамічні параметри, такі як максимальна інтенсивність поля, що випромінюється в напрямку максимального випромінювання, максимальне підсилення, випромінювана потужність, відношення випромінювання центрального пелюстка до бокових.

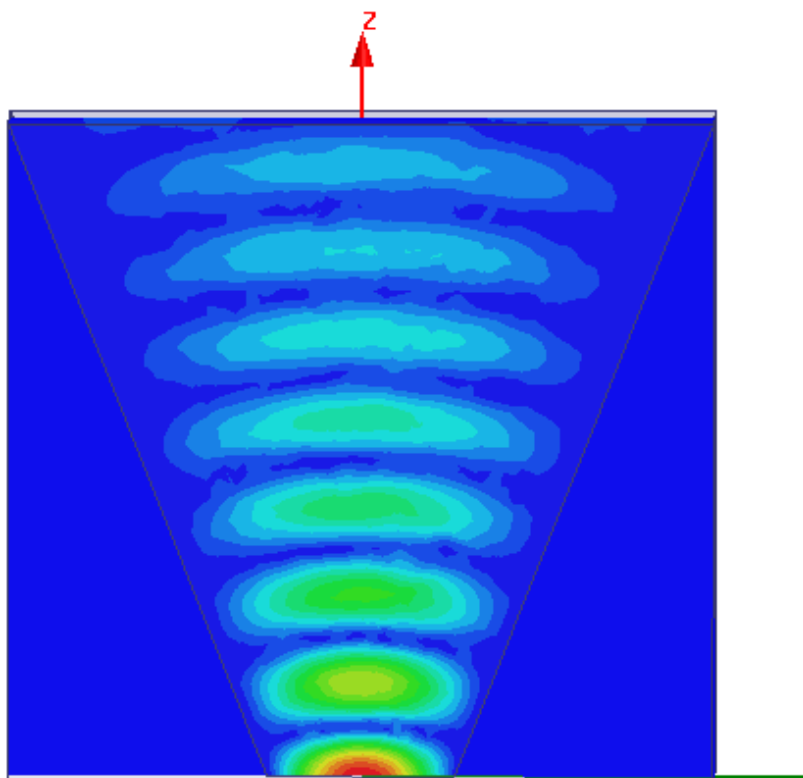


Рисунок 5 – Електромагнітне поле, що розповсюджується по рупорній антені в площині з діелектричним заповненням

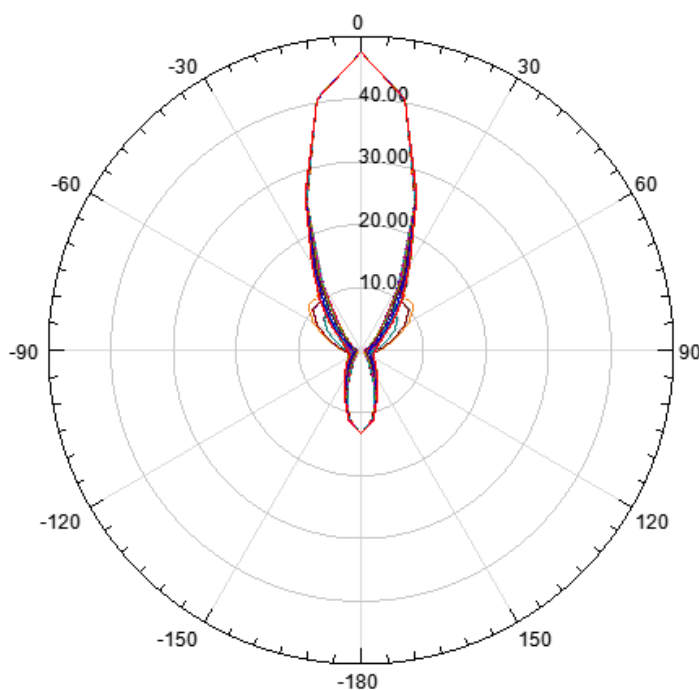


Рисунок 6 – Діаграма спрямованості рупорної антени з діелектричним заповненням

ЛІТЕРАТУРА

1. Устройства СВЧ и антенны / Воскресенский Д.И., Гостюхин В.Л., Максимов В.М., Пномарев Л.И.; под ред. Д.И.Воскресенского. – М.: Радиотехника, 2006. – 376с.

2. Хмель В.Ф. Антенны и устройства СВЧ / В.Ф.Хмель, А.Ф.Чаплин, И.И.Шумлянский. – К.: Высшая школа, 1990. – 232с.
3. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Сазонов Д.М. – М.: Высшая школа, 1988. – 427с.
4. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Галлагер Р.; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 428с.
5. Банков С.Е. Анализ и оптимизация СВЧ структур с помощью HFSS / С.Е.Банков, А.А.Курушин, В.Д.Разевиг. – М.: Солон-Пресс, 2004. – 283с.
6. Автоматизированное проектирование устройств СВЧ / под ред. В.В.Никольского. – М.: Радио и Связь, 1982. – 272с.
7. Гупта К. Машинное проектирование СВЧ структур / К.Гупта, Р.Гардж, Р.Чадха. – М.: Радио и Связь, 1987. – 432с.
8. Гвоздев В.И. Объемные интегральные схемы СВЧ / Гвоздев В.И., Нефедов Е.И. – М.: Наука, 1987. – 108с.

Надійшла до редколегії 16.03.2016.

УДК 621.373.52

ДЕРНОВИЙ В.А., студент
ГНАТЮК М.О., інженер
С'ЯНОВ О.М., д.т.н, професор

Дніпродзержинський державний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИСТРОЇВ ПРЯМОГО ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУ

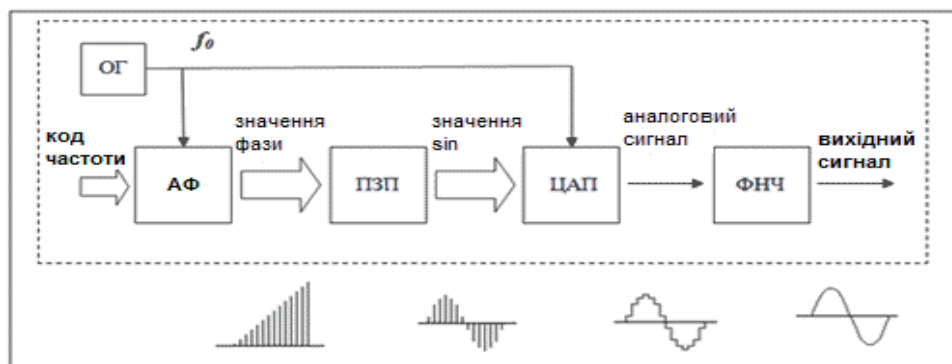
Вступ. Загальною тенденцією сучасної радіотехніки є перехід від простих до складних видів сигналів з кутовою модуляцією і змінюваними за законом заданої кодової послідовності параметрами. При цьому вимоги до точності і стабільності параметрів формованих сигналів постійно підвищуються. Традиційні аналогові методи формування складних сигналів в ряді випадків не задовольняють збільшеним вимогам, що і визначило інтерес до цифрових пристроїв формування, званих надалі цифровими синтезаторами частоти.

Їх інтенсивний розвиток пов'язано з появою процесорів для обробки складних сигналів, вдосконаленням великих інтегральних схем і запам'ятовуючих пристроїв, швидкодіючих цифро-аналогових перетворювачів. Цифрові методи формування забезпечують когерентність, високу довготривалу стабільність і повторюваність параметрів сигналів, а також добру відтворюваність характеристик при серійному виготовленні. Крім того, вони дозволяють не тільки змінювати параметри формованих сигналів (девіацію частоти і тривалість), але і вводити в сигнал необхідні передспотворення. У зв'язку з цим доцільність застосування цифрових методів формування складних сигналів в сучасних радіотехнічних системах не викликає сумнівів.

На даний час для формування гармонійних коливань широко використовуються синтезатори прямого цифрового синтезу з дискретним відліком частоти. З їх допомогою можливе формування різних складних сигналів. Однак, недостатня вивченість спотворень частотно-часової структури, що виникають при перемиканні частот з одного боку, і відсутність єдиного підходу до аналізу характеристик всього різноманіття зазначеного класу синтезаторів з іншого боку, стримує їх широке застосування.

Постановка задачі. Сучасний DDS-синтезатор містить: 1) опорний генератор; 2) дільник частоти; 3) акумулятор фази; 4) постійний запам'ятовуючий пристрій (ПЗП), що містить перекодовочну таблицю (Look Up Table); 5) цифрово-аналоговий перетворювач (ЦАП); 6) фільтр нижніх частот (ФНЧ) (anti-aliasing filter) [1].

Акумулятор фази формує адресу для ПЗП, куди записана таблиця одного періоду функції \sin ; відліки з виходу ПЗП надходять на ЦАП, який формує на виході синусоїдальний сигнал, що піддається фільтрації в ФНЧ і поступає на вихід. Для перебудови вихідної частоти використовується дільник частоти із змінним коефіцієнтом ділення, на вхід якого надходить тактовий сигнал з опорного генератора [2]. Схема такого синтезатора зображена на рис. 1.

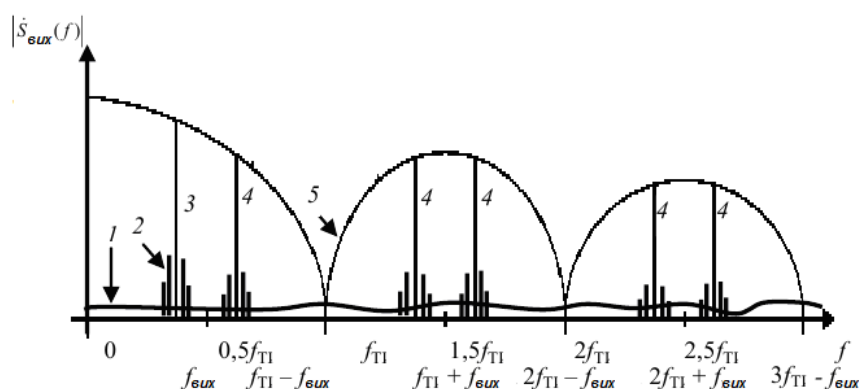


ОГ – опорний генератор, АФ – акумулятор фази, ПЗП – постійний запам’ятовуючий пристрій, ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач, ФНЧ – фільтр нижніх частот

Рисунок 1 – Структура та принцип дії DDS-синтезатора.

Основні параметри для синтезаторів DDS – це фазовий шум, тремтіння фронтів (джиттер) і SFDR (Spurious-Free Dynamic Range – динамічний діапазон, вільний від гармонік). Основним джерелом фазового шуму та джиттеру є опорний генератор; щоб мінімізувати величину цих параметрів, необхідно вибрати стабільне джерело тактових імпульсів, уникати сигналів з повільними фронтами і схем з низькою швидкістю наростання імпульсів та працювати при максимально можливій частоті тактування, щоб мати достатньо великий запас по частоті. SFDR (динамічний діапазон, вільний від гармонік) являє собою співвідношення (у децибелах) між величиною основного сигналу і величиною максимального піку в спектрі вихідного сигналу, включаючи гармоніки, інтермодуляційні складові і продукти накладення спектрів (рис.2) [3].

Для компенсації гармонік, що викликаються усіканням коду фази, в синтезаторах



- 1 – фазовий шум і шум квантування; 2 – гармоніки, викликані усіканням коду фази; 3 – основна гармоніка;
- 4 – копії основної гармоніки; 5 – обгинальна

Рисунок 2 – Додаткові побічні компоненти спектра

застосовують так звані інверсні sinc-фільтри. Високочастотні копії знаходяться за межами смуги Найквіста ($0 \dots 0,5f_{T1}$) і можуть бути придушені аналоговим фільтром нижніх частот, включеним після ЦАП.

Метою даної роботи є формування радіосигналів з використанням DDS синтезаторів. Тому задача роботи – промоделе-

лювати роботу синтезатора в середовищі NI LabView, дослідити роботу моделі, за результатами дослідження сконструювати реальну модель, дослідити її роботу та порівняти результати.

У ролі синтезуючого пристрою використовується синтезатор прямого цифрового синтезу AD9850 фірми Analog Devices, оскільки він здатний генерувати гармонічні хвилі частотою до 62,5 МГц, що задовольняє умовам задачі, і при цьому є однією з найбільш поширених недорогих мікросхем ПЦС.

Результати роботи. Відповідна до рис.1 схема синтезатора прямого цифрового синтезу в середовищі LabView зображена на рис.3 [4].

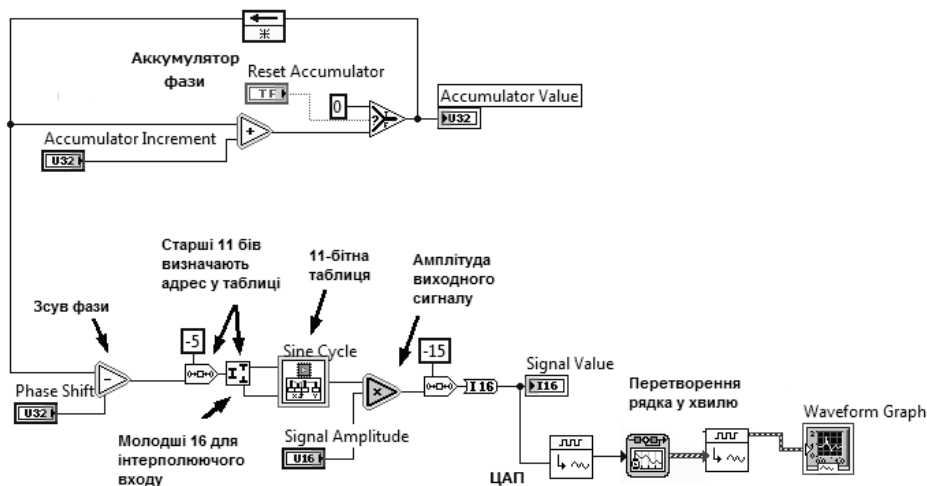
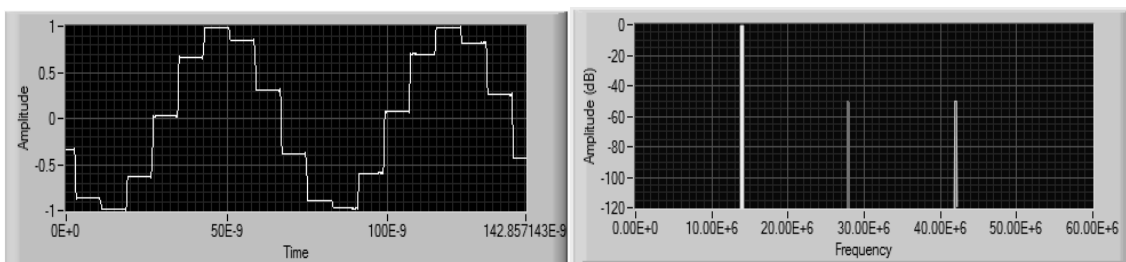
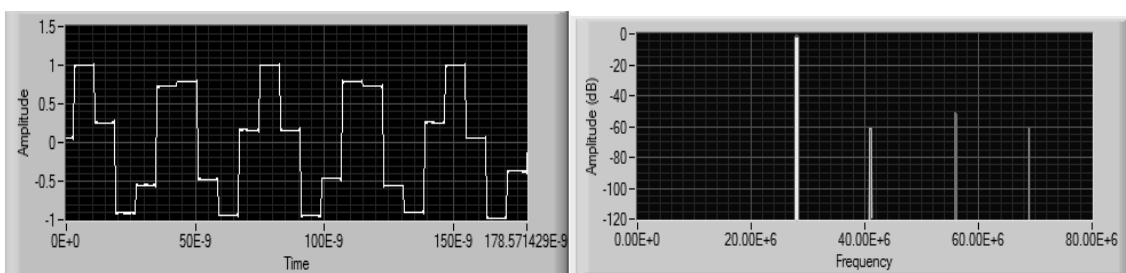


Рисунок 3 – Цифровий синтезатор в системі програм NI LabView

У результаті моделювання були отримані характеристики (форми і спектри) моделі при генеруванні хвиль з частотою 14МГц (а) і 28МГц (б) без використання вихідного фільтра нижніх частот, зображені на рис.4.



а)

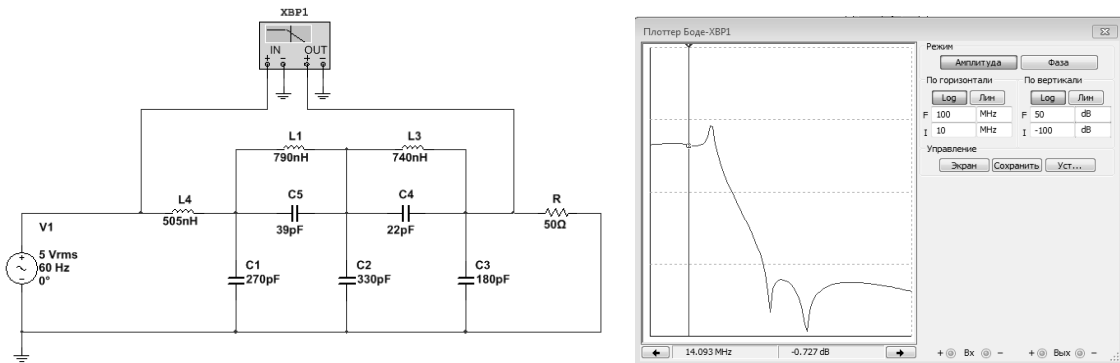


б)

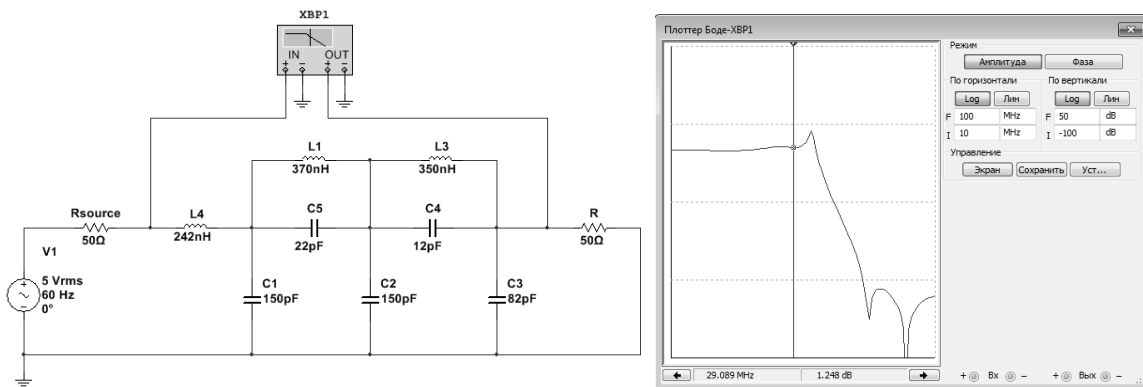
Рисунок 4 – Результат моделювання

Копії основної гармоніки виникають на частотах $f_{out} * n$, де $n = 2, 3, 4, \dots$. Виходячи з цього, характеристики АЧХ ФНЧ для кожного діапазону повинні відповідати наступним: для 14Мгц: смуга пропускання 15Мгц, придушення на частоті 28Мгц не менше 60дБ; для 28Мгц: смуга пропускання 30Мгц, придушення на частоті 60Мгц не менше 60дБ.

Згідно з розрахунками цим вимогам відповідають такі топології фільтрів: 1) фільтр Баттерворта 11 порядку, 2) фільтр Чебишева 8 порядку, 3) еліптичний фільтр (фільтр Кауера) 6 порядку. Для моделювання обрано фільтр Кауера, так як він потребує меншої кількості ланок за відсутності значних погіршень характеристик фільтра. Розраховані фільтри були промодельовані в середовищі NI Multisim, що дало змогу виміряти їх АЧХ та переконатися, що вони відповідають зазначеним вище (рис.5).



а)



б)

Рисунок 5 – Розраховані еліптичні ФНЧ 6 порядку зі смугою пропускання 19Мгц (а) та 30 Мгц (б)

Вищенаведені моделі фільтрів були відповідно перетворені для використання у середовищі LabView (рис.6).

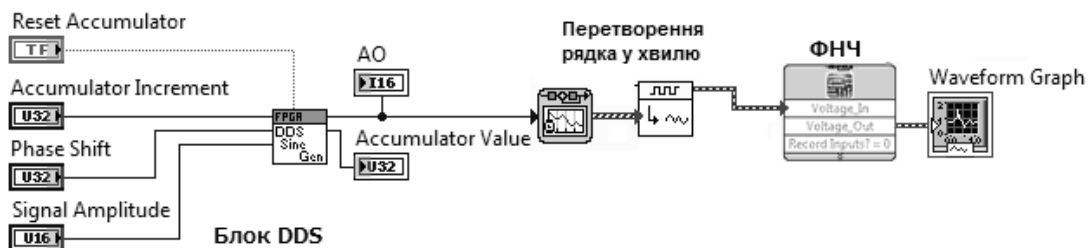
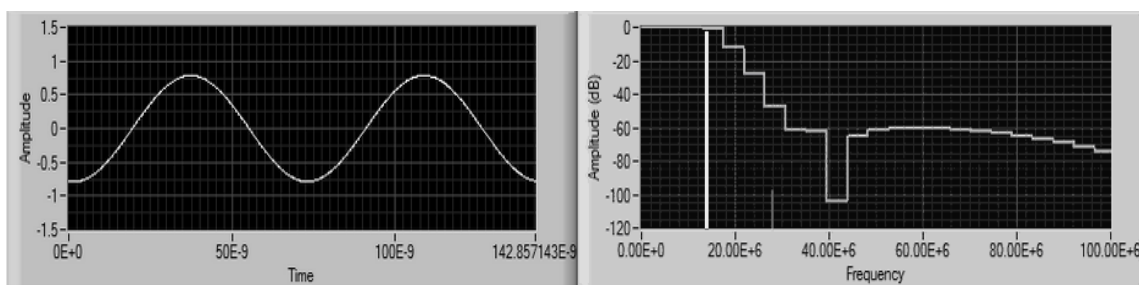
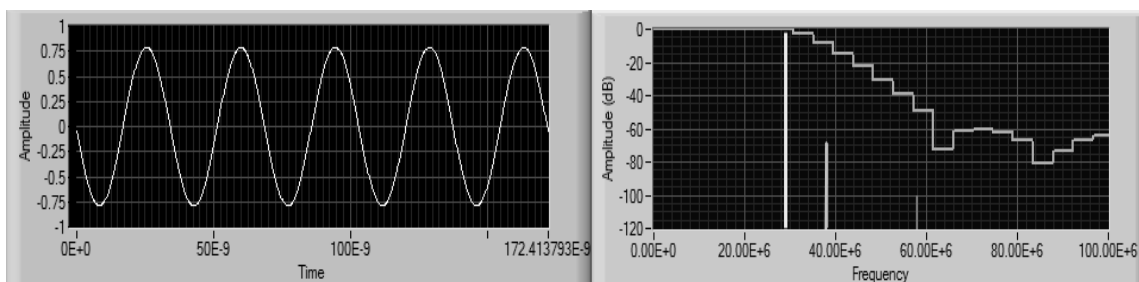


Рисунок 6 – Цифровий синтезатор з ФНЧ

Результати дослідження DDS при фільтрації вихідного сигналу фільтрами низьких частот зображені на рис.7, а) (14 МГц) і 7, б) (28 МГц).



а)



б)

Рисунок 7 – Форма (а) і спектр (б) профільтованого сигналу

Як видно з графіків, розроблені фільтри низьких частот хоча й аттенюють основний сигнал (спостерігається ослаблення в ~ 0.9 дБ для сигналу частотою 14МГц і ~ 1.93 дБ для сигналу частотою 28МГц), тим не менш достатньо ефективно фільтрують паразитні дзеркальні гармоніки, покращуючи шумові характеристики синтезатора і дозволяючи застосовувати його в пристроях, що вимагають високої стабільності частоти.

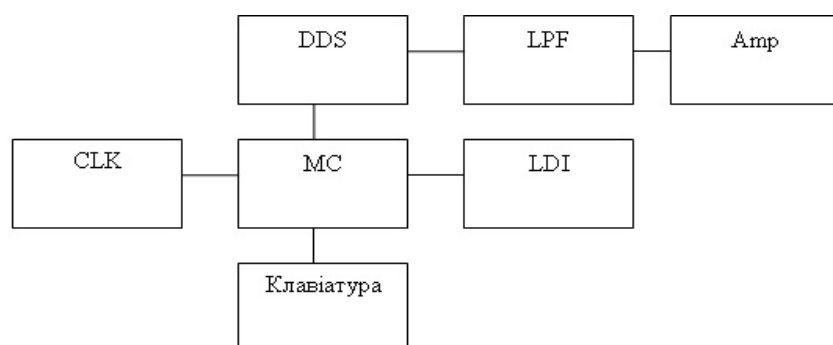
Проведене дослідження у середовищах моделювання NI LabView та NI Multisim дозволили розробити експериментальну модель цифрового синтезатора.

Синтезатор складається зі зв'язки мікроконтролера, плати цифрового синтезатора частоти і рідкокристалічного індикатора і являє собою універсальний блок для застосу-

вання в радіотехнічних конструкціях в якості класичного генератора плавного діапазону з будь-якою ПЧ [5].

Структурну схему пристрою наведено на рис.8, а повну – на рис9.

На рис.10 зображено форму сигналу синтезатора при роботі в діапазоні 14 МГц. Встановлена частота –14.2 МГц. Верхнє зображення ві-



DDS – пристрій ПЦС, LPF – ФНЧ, Amp – підсилювач,
CLK – тактовий генератор, MC – мікроконтролер,
LDI – рідкокристалічний індикатор

Рисунок 8 – Структурна схема пристрою

дображає сигнал, що виходить прямо з DDS, нижнє – сигнал, додатково оброблений розробленим ФНЧ.

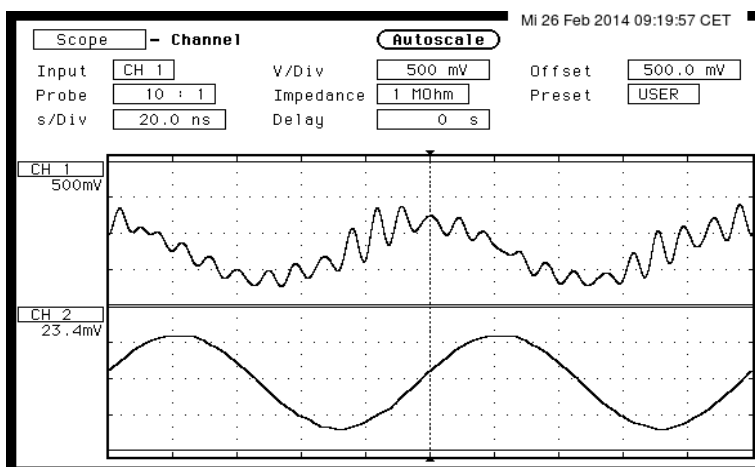


Рисунок 10 – Форма нефільтрованого і фільтрованого сигналу на частоті 14 МГц

На рис.11 зображено аналогічну форму сигналу для синтезатора 28 МГц. Встановлена частота – 28.8 МГц.

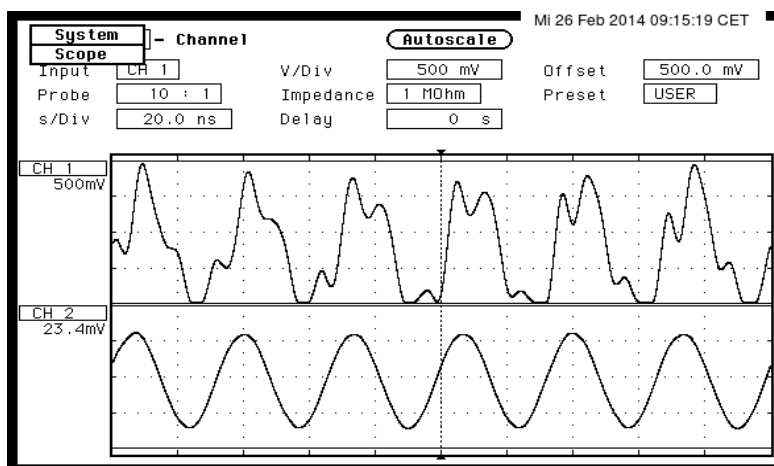


Рисунок 11 – Форма нефільтрованого і фільтрованого сигналу на частоті 28 МГц

Висновки. Розроблена віртуальна модель прямого цифрового синтезатора в середовищі NI LabView дозволила проаналізувати форму та спектр генерованого гармонійного коливання та визначити необхідні параметри фільтрів нижніх частот для його обробки; згідно з результатом моделювання розраховані та промодельовані в програмі NI Multisim відповідні еліптичні фільтри 6-го порядку, а також досліджено їх вплив на генерований сигнал за допомогою методу взаємосимуляції між NI LabView та NI Multisim. За отриманими результатами розроблено та досліджено експериментальну модель на основі сучасного пристрою прямого цифрового синтезу DDS AD9850. Її шумові характеристики склали: остаточний фазовий шум -110 dB; SFDR: -60 dB при частоті 14 MHz, -80 dB при частоті 28 MHz.

ЛІТЕРАТУРА

1. Маннаевич В.А. Синтезаторы частот (теория и проектирование) / В.А.Маннаевич; пер. с англ. под ред. А.С.Галина. – М.: Связь, 1979. – 384с.

2. Синицын В.А. Прямой цифровой синтезатор сигналов: практическое пособие. / В.А.Синицын, А.Л.Беседа, М.В.Зубков. – СПб.: Балт. гос. техн. ун-т., 2011. – 33с.
3. A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis [Электронный ресурс] / Analog Devices Inc., 1999. – Режим доступа: http://www.analog.com/media/cn/training-seminars/tutorials/450968421DDS_Tutorial_rev12-2-99.pdf
4. Магда Ю.С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков / Ю.С.Магда. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208с.
5. CMOS 125MHz Complete DDS Synthesizer AD9850. Datasheet [Электронный ресурс] / Analog Devices Inc., 2004. — Режим доступа: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD9850.pdf>

Надійшла до редколегії 21.12.2016.

УДК 539.216.2

ТАРАН В.Г., к.ф.-м., доцент
ТУРЧЕНКО Ю.О., студент

Днепродзержинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РОСТА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТИТАНАТА БАРИЯ ИЗ РАСПЛАВА С ИЗБЫТКОМ РУТИЛА

Введение. Для решения задач современной электроники, радиотехники, нелинейной оптики и управления лазерным излучением актуальной является проблема получения новых материалов с уникальными электрофизическими и оптическими свойствами, к которым относится стехиометрический титанат бария [1-3].

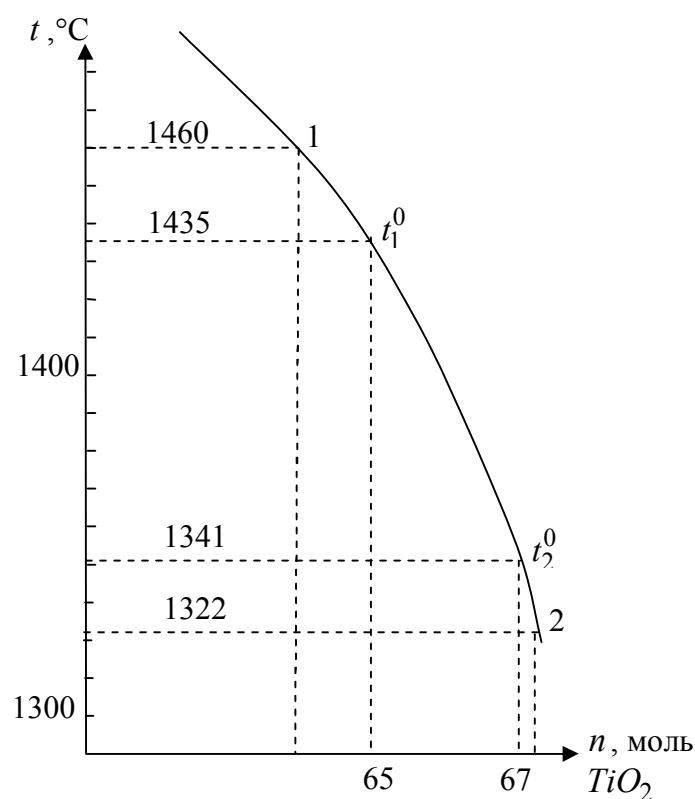
Постановка задачи. Стехиометрический титанат бария ($BaTiO_3$) обладает необходимыми для применения нелинейными свойствами в кубической и тетрагональной фазах, существующих при температурах ниже $1460^{\circ}C$. Однако температура плавления этого соединения, необходимая для кристаллизации, значительно выше ($1618^{\circ}C$). При ней существует необратимая гексагональная модификация, в которой эти свойства отсутствуют [4]. Для обхода этой модификации возможен метод выращивания $BaTiO_3$ из расплава нестехиометрического состава титаната бария с избытком рутила [5]. Он требует выполнения целого ряда условий температурного режима и следования диаграмме фазового равновесия компонентов среды образования кристаллов при механическом извлечении стехиометрического монокристалла. Исследование процесса выращивания объемных монокристаллов $BaTiO_3$ из расплава системы $BaTiO_3 - TiO_2$ является задачей настоящей работы.

Результаты работы. Основу ростового цикла для материала сложной системы составляет согласование динамики снижения температуры маточного расплава в соответствии с фазовой диаграммой компонентов загрузки $BaTiO_3 - TiO_2$ и скорости механического извлечения монокристалла стехиометрического титаната бария ($BaTiO_3$) необходимой кристаллической модификации. Это позволяет выбрать на затравку из фиксированного объема расплава максимальное количество требуемого материала. Так как температура гексагонального фазового перехода $1450^{\circ}C$, то кристаллизацию необходимо производить ниже этой границы.

Возможны два варианта подготовки шихты: 1) исходные порошки TiO_2 и BaO ; 2) порошки TiO_2 и $BaTiO_3$. На наш взгляд, более эффективным является второй вариант – смесь TiO_2 и $BaTiO_3$, в котором соотношение молярных компонент исходной

загрузки должны быть $35v_1 = 30v_2$ соответственно. Учитывая плотность порошков TiO_2 и $BaTiO_3$ $\rho_1 = 1,88 \cdot 10^3$ кг/м³ и $\rho_2 = 1,35 \cdot 10^3$ кг/м³ соответственно, а также их молярные массы $\mu_1 = 79,9 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и $\mu_2 = 233,23 \cdot 10^{-3}$ кг/моль при объеме загрузки (объем платинового тигля) $V = 25$ см³, массы компонент исходной шихты составили $m_1 = \mu_1 v_1 = 8,18 \cdot 10^{-3}$ кг (TiO_2) и $m_2 = \mu_2 v_2 = 27,82 \cdot 10^{-3}$ кг ($BaTiO_3$), где v_1 и v_2 – количество исходных компонент в молях. На основании фазовой диаграммы [4] и учитывая методику [6], произведен расчет режима снижения температуры расплава в ростовом цикле. Температурный диапазон процесса выращивания должен быть между нижней границей гексагонализации 1460°C , точка 1 (рис.1) и эвтектической точкой 2 (1322°C). Для надежности результата реальный диапазон мы выбрали несколько уже: $t_1^0 = 1435^\circ\text{C}$, $t_2^0 = 1341^\circ\text{C}$.

Состав маточного расплава, в процессе роста кристалла удобно представить в виде:



t_1^0 – начальная температура расплава;
 t_2^0 – температура расплава в момент отрыва кристалла

Рисунок 1 – Рабочий участок фазовой диаграммы снижения температуры системы $BaTiO_3 - TiO_2$

$$(BaTiO_3)_{1-\frac{n}{100}} - (TiO_2)_{\frac{n}{100}}, \quad (1)$$

где n – количество молярных % TiO_2 , изменяющееся в ростовом цикле на участке температур от t_1^0 до t_2^0 . В процессе роста при снижении температуры и извлечении $BaTiO_3$ в виде монокристалла состав системы (1) изменяется, то есть увеличивается содержание компоненты TiO_2 . Чтобы процесс кристаллизации происходил оптимально (стехиометрически) в соответствии с фазовой диаграммой вдоль кривой 1-2 (рис.1), необходимо согласовать скорость снижения температуры dt^0/dt с заданной скоростью вытягивания кристалла dz/dt . Очевидно, что скорость увеличения массы образующегося кристалла $BaTiO_3$

$$\frac{dm}{dt} = S\rho \frac{dz}{dt}, \quad (2)$$

где dz – приращение длины кристалла за dt , S и ρ – площадь и плотность монокристаллической були. Тогда с учетом изменения усредненной молярной массы системы маточного расплава, согласно фазовой диаграммы, рассчитали dt^0/dt при фиксированных скоростях вытягивания $dz/dt = 1$ мм/час и $0,25$ мм/час для сечения кристалла $S = 1$ см² (табл.1).

Таблица 1 – Параметры скорости охлаждения dt^0/dt маточного расплава системы $BaTiO_3-TiO_2$ и наращивания массы монокристалла m стехиометрического титаната бария от значения температуры t^0 в зоне кристаллизации

$t^0, ^\circ C$		1430	1420	1410	1400	1390	1380	1370	1360	1350	1340
$\frac{dt^0}{dt}$	$1 \frac{град}{час}$	8,5	9,5	10,6	11,8	12,9	14	15,1	16,1	17,2	18,2
	$0,25 \frac{град}{час}$	2,0	2,2	2,3	2,5	2,7	2,9	3,1	3,3	3,5	3,7
$m \times 10^{-3}, кг$		0	0,3	0,7	1,0	1,6	2,1	2,6	3,5	4,2	4,5

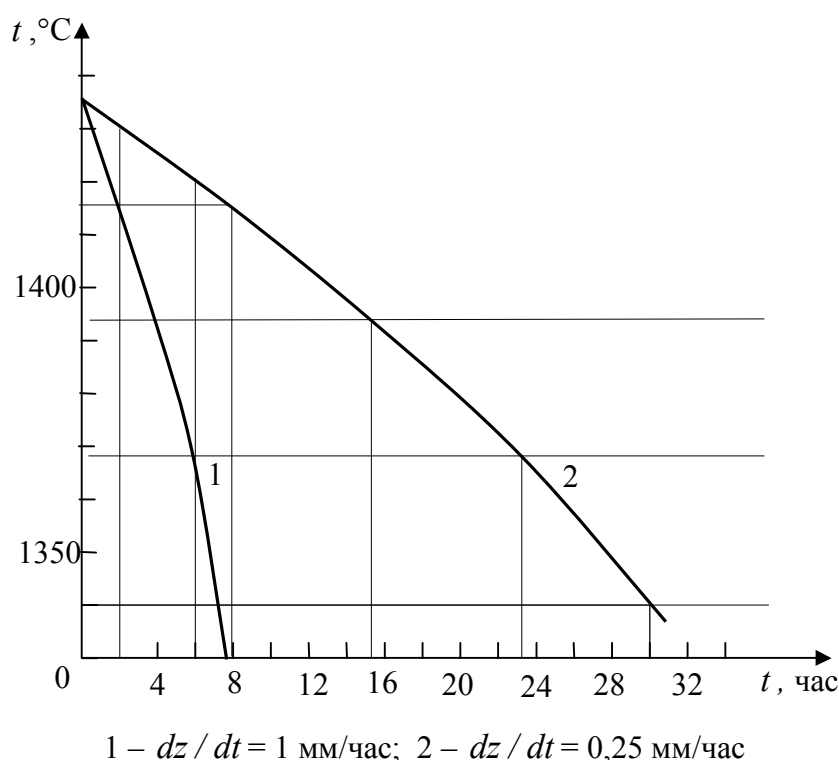


Рисунок 2 – Температурно-временная зависимость при скорости вытягивания dz/dt

Экспериментально установлено, что, выдерживая постоянным сечение кристалла, скорость снижения температуры нужно увеличивать при понижении температуры и при заданных скоростях вытягивания кристалла dz/dt следовать зависимостям (рис.2).

Выводы. Рассчитаны параметры ростового цикла титаната бария из расплава системы $BaTiO_3-TiO_2$ на ориентировочную затравку, используя которые удалось оптимизировать процесс выращивания оптически однородных монокристаллов титаната бария сечением до 1 см^2 с минимальными механическими напряжениями и пригодных для использования в электрических и оптических элементах.

Установлен оптимальный температурный диапазон роста $1430-1340^\circ C$ и скорость вытягивания кристалла $\frac{dz}{dt} = 1 \div 0,25 \frac{мм}{час}$. Согласованы скорость снижения температуры расплава и фронтального роста кристалла $BaTiO_3$ в соответствии с фазовой диаграммой его стехиометрического состава.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фридкин В.М. Сегнетоэлектрики-полупроводники / В.М.Фридкин. – М.: Наука, 1976. – 408с.
2. Барфут Дж. Полярные диэлектрики и их применение / Дж.Барфут, Дж.Тейлор. – М.: Мир, 1981. – 526с.

3. Кузьминов Ю.С. Сегнетоэлектрические кристаллы для управления лазерным излучением / Ю.С.Кузьминов. – М.: Наука, 1982. – 400с.
4. Rase D.E. Phase Equilibria in the System $BaTiO_3-TiO_2$ / D.E.Rase, R.Roy // J.Amer.Cer.Soc. – 1955. – № 38. – P.102-113.
5. Петров А.А. Выращивание объемных монокристаллов титаната бария из раствора в расплаве методом Чохральского / А.А.Петров, Б.В.Афанасьев, Н.Ф.Карпенко // VI Всесоюзн. конф. по росту кристаллов, 16-17 ноября 1985 г.: сб. тезисов докл. – Ереван: Изд. АН АССР, 1985. – С.13.
6. Lompre P. Construction d'une machine de monocristaux application an titanate de baryum / P.Lompre. // J.Appl.Cryst. –1978. – V.11. – P.332-338.

Поступила в редколлегию 15.02.2016.

УДК537.311.6

БОЧКОВА Т.М.*, к.ф.-м.н., доцент
ПЛЯКА С.М.*, к.ф.-м.н., доцент
ТРУССЕВА Н.О., к.ф.-м.н., доцент

Дніпродзержинський державний технічний університет
*Дніпропетровський національний університет ім. Олесья Гончара

ДОСЛІДЖЕННЯ ІМПЕДАНСУ ОРТОГЕРМАНАТУ ВІСМУТУ МЕТОДОМ ЕКВІВАЛЕНТНИХ СХЕМ

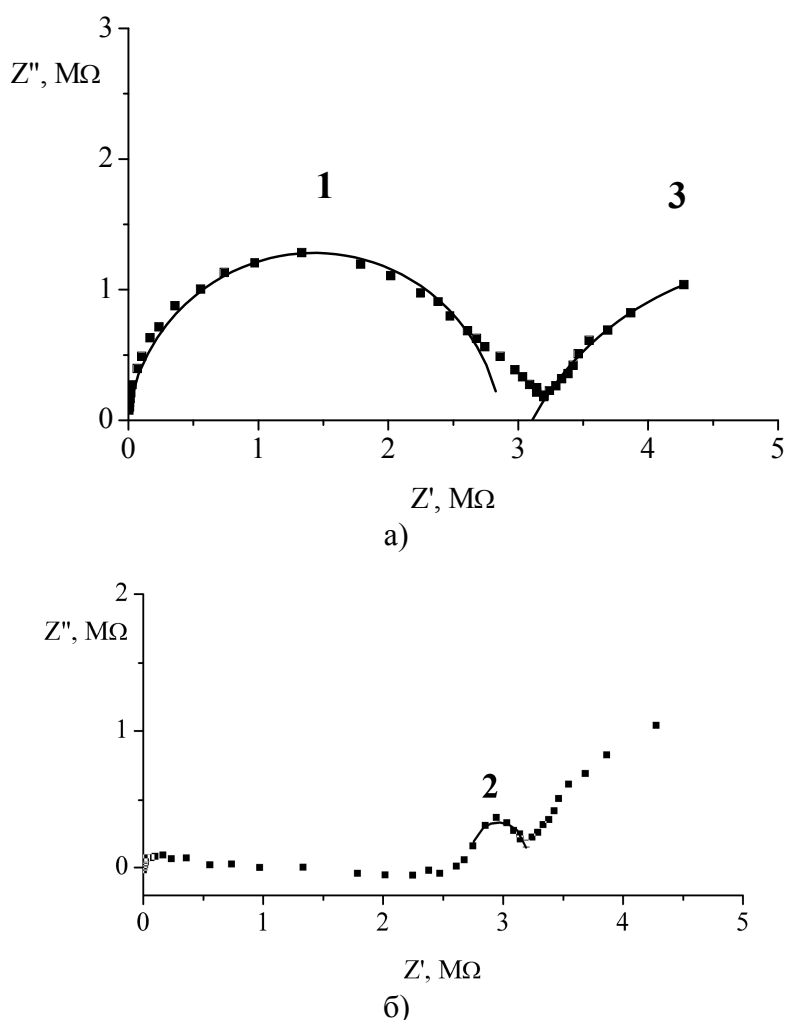
Вступ. Кристалічний ортогерманат вісмуту ($Bi_4Ge_3O_{12}$, BGO), широко відомий сцинтилятор для детектування високоенергетичного випромінювання [1], в останні роки також застосовується як фоторефрактивний матеріал [2-3]. Для підвищення ефективності запису голографічних решіток необхідно знання механізмів переносу заряду в кристалах $Bi_4Ge_3O_{12}$. Це складна задача твердотільної електроніки, оскільки ортогерманат вісмуту – високоомний напівпровідник із шириною забороненої зони $\sim 4,5$ еВ. Шляхом комплексних досліджень в роботах [4-7] встановлено, що кристали ортогерманату вісмуту за своїми електричними властивостями (високий опір, стрибковий механізм електропровідності, степеневий характер зростання провідності у змінному полі, низька рухливість носіїв заряду та її активаційне зростання, низька концентрація рухливих носіїв заряду, значний час діелектричної релаксації) належать до релаксаційних напівпровідників. Наявність подвійної інжекції носіїв заряду з платинових електродів в кристал дозволяє спостерігати формування просторових зарядів різного типу: збіднених та збагачених основними носіями заряду. До температур ~ 425 К відбувається інжекція електронів і спостерігається явище струмів, що обмежуються просторовим зарядом, вище – спостерігається інжекція дірок і процеси рекомбінації, на які впливає наявність домішок. Дуже цікавим може бути зіставлення запропонованої моделі та експериментальних даних частотних вимірювань повного комплексного опору $Z^*(\omega)$ кристала. Як відомо, графічна залежність $Z^*(\omega)$ у координатах Z', Z'' (координати Найквіста) називається годографом імпедансу або його спектром. Побудова годографів імпедансу корисна для інтерпретації його частотних залежностей. У цьому випадку аналізується відповідність виду годографа досліджуваного зразка годографу еквівалентної електричної схеми, кожен елемент якої характеризує фізичний або електрохімічний процес, що протікає в реальному досліджуваному зразку. Раніше імпеданс кристалів $Bi_4Ge_3O_{12}$ вивчався тільки для температур вище 775 К [8].

Постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз процесів переносу заряду в

кристалах ортогерманату вісмуту шляхом імпедансної спектроскопії в інтервалі температур 300-700 К.

Результати роботи. У роботі проведено вимірювання модуля та фази повного імпедансу кристалів ортогерманату вісмуту в залежності від частоти за умови фіксованих температур. Використовувалися зразки кристалів, що вирощувалися на кафедрі фізики твердого тіла і оптоелектроніки ДНУ методом Чохральського із подвійною перекристалізацією. Електроди з платини були нанесені методом катодного розпилення. Вимірювання проводилися в зазначеному інтервалі температур та в діапазоні частот $10-10^5$ Гц за допомогою вимірювача повного імпедансу Tesla BM 507. За отриманими експериментальними даними зроблено розрахунки частотних і температурних залежностей дійсної та уявної частин комплексної провідності.

До температур ~ 500 К вимірювання ускладнені внаслідок низької провідності $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$, в інтервалі 500-600 К в спектрі імпедансу спостерігається одне півколо, при більш високих температурах проявляються ще два в області менших частот. На рис.1 наведено спектр імпедансу при $T=675$ К для зразка кристала $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ товщиною 0,85 мм із платиновим електродом діаметром 3 мм.



а) точки – експериментальні значення,
суцільна лінія – теоретична апроксимація півкола 1 та півкола 3;
б) точки – різниця між експериментальним і теоретичним спектром,
суцільна лінія – теоретична апроксимація півкола 2

Рисунок 1 – Спектр імпедансу кристалу $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ за температури 675 К

В рамках методу еквівалентних схем годографу у вигляді півкола відповідає паралельний RC-ланцюжок. Згідно з частотним діапазоном назвемо високочастотне півколо півколом 1, середньочастотне – півколом 2 та низькочастотне – півколом 3. Для кожного півкола буде справедливим рівняння

$$\left[Z' - \frac{(2R_1 + R_2)}{2} \right]^2 + (Z'')^2 = \left(\frac{R_2}{2} \right)^2,$$

яке описує окружність радіуса $R_2 / 2$ із центром на осі абсцис на відстані $(R_1 + R_2 / 2)$ від початку координат. За допомогою комп'ютерного аналізу для всіх трьох процесів зроблено теоретичну апроксимацію отриманих експериментальних значень та визначено R_1 , R_2 для кожного RC-ланцюжка.

Згідно з методом еквівалентних схем зразок кристала, який має спектр імпедансу у вигляді трьох півкіл, може бути представлений моделлю Войта у вигляді трьох послідовно з'єднаних паралельних RC-ланцюжків зі своїми величинами R та C . Одразу треба зауважити, що в ідеальному RC-ланцюжку опір R та ємність C є частотно-незалежними величинами, але експериментальні дані свідчать про те, що насправді їх провідність залежить від частоти. Тому використання для моделювання електрофізичних процесів, які виникають в реальних діелектриках, ідеальних RC-ланцюжків є доволі грубим наближенням.

Температурна динаміка спектрів імпедансу свідчить про складні процеси переносу заряду в кристалах ортогерманату вісмуту на змінному струмі. Як встановлено в роботах [4-7], кристали $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ можуть розглядатися як частково компенсовані напівпровідники, в яких рухливими є як електрони, так і дірки. При використанні електродів з індій-галію, срібла та платини спостерігаються процеси подвійної інжекції носіїв заряду в кристал та їх рекомбінації. Вивчення струмів монополярної інжекції в кристалах ортогерманату вісмуту показало, що електрони є основними носіями заряду до температур ~ 425 К, а вище – стають помітними процеси інжекції дірок. При високому рівні інжекції неосновних носіїв заряду процеси рекомбінації обумовлюють формування приелектродної області, збідненої основними носіями. Цей висновок зроблено в результаті виміру вольт-амперних характеристик і підтверджено дослідженням розподілу напруженості електричного поля в зразку ортогерманату вісмуту поляризаційно-оптичним методом.

Аналіз частотних залежностей компонент комплексної діелектричної проникності й процесів переносу носіїв заряду в кристалах $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ в роботі [9] показав, що в області температур до 500 К діелектричні втрати визначаються електронно-дірковою провідністю. В області температур 500- 700 К проявляються релаксаційні процеси теплової поляризації, обумовлені, скоріш за все, міграцією об'ємних зарядів поблизу контактів.

З метою ідентифікації механізмів переносу заряду, що обумовлюють появу півкіл в спектрах імпедансу ортогерманату вісмуту, зроблено спробу побудувати температурні залежності активного опору для всіх трьох півкіл та знайти енергію активації процесів E_a . Вона складає: для високочастотного півкола – $0,65 \pm 0,5$ еВ, для середньочастотного та низькочастотного $\sim 0,9-1,1$ еВ. Похибка для двох останніх значно більша, тому що півкола 2, 3 не є повністю сформованими, і отримані результати мають скоріше орієнтовний характер. Збіг значення E_a для високочастотного півкола з енергією активації діркової провідності, яку отримано з вимірювань на постійному струмі [5], дозволяє нам зробити припущення, що перше півколо відповідає процесу об'ємної діркової електропровідності, яка здійснюється при достатньо високих температурах. Щодо

середньочастотного півкола 2, ми вважаємо, що воно може бути обумовлене міграцією приелектродних шарів підвищеного опору, які виникають внаслідок збіднення основними носіями заряду за рахунок рекомбінації. Тоді енергія активації цього процесу може бути пов'язана із заляганням рекомбінаційних рівнів. Ідентифікація низькочастотного півкола 3 потребує подальшого дослідження. В роботі [8], присвяченій дослідженню імпедансу в ортогерманаті вісмуту у температурному інтервалі 775-975 К, спостерігається вже тільки одне сформоване півколо з енергією активації 1,4 еВ, яке автори пов'язують з об'ємною електронною провідністю з глибоких рівнів.

Висновки. Проведено вимірювання модуля та фази повного імпедансу кристалів ортогерманату вісмуту в залежності від частоти в інтервалі температур 300-700 К. Розраховано частотні і температурні залежності дійсної та уявної частини комплексного опору і побудовано в координатах Найквіста.

За допомогою комп'ютерної апроксимації отриманих годографів в рамках метода еквівалентних схем встановлено, що спектр імпедансу кристала $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ складається з трьох півкіл, що відповідає моделі зразка кристала у вигляді трьох послідовно з'єднаних паралельних RC-ланцюжків. Визначено температурні залежності активного опору, обчислено енергію активації процесів переносу заряду. Зроблено припущення, що високочастотне півколо відповідає процесу об'ємної діркової провідності, середньочастотне – обумовлене міграцією об'ємного заряду, що виникає біля контактів за рахунок збіднення основними носіями заряду внаслідок рекомбінації.

ЛІТЕРАТУРА

1. Экспортно-ориентированное производство сцинтилляционных элементов BGO / Я.В.Васильев, Г.Н.Кузнецов, Ю.Г.Стенин, В.Н.Шлегель // Материалы электронной техники. – 2001. – № 3. – С.1-8.
2. Marinova V. Light induced properties of ruthenium-doped $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystals / V.Marinova, Shiuann Huei Lin, Ken Yuh Hsu // J.Appl.Phys. – 2005. – Vol. 98. – P.113527(1–5).
3. Optical and holographic properties of Fe+Mn co-doped $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ crystals / V.Marinova, D.Petrova, Shiuann Huei Lin, Ken Yuh Hsu // Optics Communs. – 2008. – Vol. 281. – P.37-43.
4. Bochkova T.M. Unipolar injection currents in $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ single crystals / T.M.Bochkova, S.N.Plyaka, G.Ch.Sokolyanskii // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2003. – V. 6, № 4. – P.461-464.
5. Bochkova T.M. Charge transport in bismuth orthogermanate crystals / T.M.Bochkova, S.N.Plyaka // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2011. – V. 14, № 2. – P.170-174.
6. Бочкова Т.М. Формування просторових зарядів у кристалах $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ / Т.М.Бочкова, С.М.Пляка // Вісник ДНУ. – 2012. – Т.20. – Вип.19, № 2. – С.119-124.
7. Бочкова Т.М. Особенности процессов переноса заряда в кристаллах $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ / Т.М.Бочкова, С.Н.Пляка // Физика диэлектриков: XIII междунар. конф., 2-6 июня 2014 г.: материалы. – Санкт-Петербург, 2014. – С.1.4.
8. Macedo Z.S. Characterization of $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ Single Crystals by Impedance Spectroscopy / Z.S.Macedo, A.L.Martinez, A.K.Hernandes // Materials Research. – 2003. – Vol. 6, № 4. – P.577-581.
9. Бочкова Т.М. Тепловая поляризация в ортогерманате висмута / Т.М.Бочкова, С.Н.Пляка // Вісник ДНУ. – 2008. – Т.15. – № 2/2. – С.106-109.

Надійшла до редколегії 10.03.2016.

Дніпродзержинський державний технічний університет

ІНФОРМАЦІЙНО-СИНЕРГЕТИЧНА МОДЕЛЬ ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Вступ. Здоров'я людини є «робочим інструментом» особистості. Стан здоров'я людини являє собою надскладну систему, яка залежить від багатьох чинників.

Розширення можливостей вільного вибору форм, методів та технологій підтримки здоров'я вимагає від людини нової якості знання про стан її здоров'я з метою збільшення тривалості життя та збереження працездатності людини у похилому віці.

Тому й не дивно, що в останні роки в літературі часто зустрічається поняття «культура здоров'я» як найбільш загальна його характеристика. Крім того, «культура здоров'я» людини може стати новим, ще не освоєним внутрішнім ресурсом прогресивних змін у галузі охорони здоров'я. Адже в останні роки районні поліклініки і лікарні перестають відігравати вирішальну роль в охороні здоров'я. Істотне старіння населення країни збільшило навантаження на лікарів. Впровадження системи «домашнього лікаря» суттєво не вирішило цієї проблеми. Концепція «культура здоров'я» передбачає участь кожного члена суспільства в підтримці свого здоров'я і своєчасне визначення початку захворювання та звернення до лікаря.

На жаль, в медицині поки що відсутні цілісні моделі здоров'я людини, які створені на сучасній методологічній основі і технічно реалізовані для широкого застосування. Все це гальмує широке впровадження використання на практиці концепції «культури здоров'я».

Постановка задачі. У таких дослідженнях цілком виправданими є задачі як: розробити сучасну модель здоров'я людини (МЗЛ); розкрити зміст і структуру сучасної моделі здоров'я людини; створити алгоритм визначення стану здоров'я людини на основі сучасної моделі здоров'я людини.

Результати роботи. Для дослідження питання раннього визначення порушення здоров'я особистості в даній роботі запропоновано використання такого підходу: постійний моніторинг стану здоров'я людини за принципом застосування мініатюрних, закріплених на тілі людини датчиків виміру різних параметрів здоров'я. Ця інформація із застосуванням розроблених «моделей здоров'я» (МЗ) і відповідного програмного забезпечення дозволяє відображати отримані значення стану здоров'я особистості на екрані мобільного комунікатора та ПК домашнього лікаря. Деякі питання цієї ідеї опубліковано авторами у роботах [1-3].

У відповідності до цього підходу здоров'я особистості як інтегрально-соціальна характеристика є надзвичайно складною системою якостей і цінностей деяких медичних показників здоров'я людини. Вважаємо, що ця система знаходиться в рівноважному динамічно стаціонарному стані (РДСС), тобто в ній відбуваються якісні зміни, але вони узгоджені з відповідним станом людини для кожного вікового періоду його життя. Ця система є ієрархічною: вона складається з відносно автономних підсистем різних розмірів і взаємного підпорядкування. Для того, щоб однозначно описати таку систему, в даному разі – здоров'я людини, потрібно встановити значення значної кількості величин, які називаються мікропараметрами (x_i) і які не можуть бути зведені до простіших.

Це зробити надзвичайно складно. Але завдяки синергетичним процесам самоорганізації, які відбуваються на рівні кожної з автономних підсистем і системи в цілому, з'являється скінчений набір більш загальних характеристик – макропараметрів (X_k), за допомогою яких можна також однозначно описати систему, але більш простим спосо-

бом. Фактично маємо справу із «стисненням» інформації через встановлення залежних від віку людини функціональних залежностей між макропараметрами, які інтегрували в собі інформацію відповідних масивів мікропараметрів. Цілком очевидно, що кожен із ієрархічних рівнів здоров'я особистості має власні макропараметри. Проте, окремі з них можуть бути макропараметрами й інших рівнів (підсистем) та системи в цілому.

Відповідно до положень розробки «моделей здоров'я» як адаптивних складних систем треба відмітити, якщо система перебуває в РДСС, тобто її склад, структура і функції залишаються незмінними, між її макропараметрами встановлюються сталі в часі відношення – порядок, який не змінюється, аж поки система не перейде в нерівноважний стан (НРС). Характер цього зв'язку між макропараметрами можна виразити за допомогою спеціальних символів, літер, чисел, знаків тощо, а також засобами звичайної мови – у вигляді правила, твердження або набору правил-алгоритмів. Такий функціональний зв'язок між макропараметрами трактується як закон самоорганізації (ЗС-закон) і позначається літерою (ξ_n).

Сукупність законів самоорганізації системи (множина ξ) можливо розглядати в якості основних принципів організаційної культури – здоров'я.

Результати попередніх досліджень свідчать, що для того, щоб засобами звичайної мови задати множину ξ , тобто сукупність законів самоорганізації, потрібно дотримуватися кількох основних правил.

1. Кількість законів самоорганізації ξ_n повинна бути мінімальною, але достатньою для того, щоб повністю описати всі наявні функціональні залежності між макропараметрами X_k .

2. До множини ξ можуть входити закони самоорганізації не лише загальносистемного рівня, а й нижчих ієрархічних рівнів, які розкривають зміст відповідних їм систем.

3. Закон самоорганізації конкретного ієрархічного (підсистемного або загальносистемного) рівня повинен містити лише макропараметри цього рівня.

4. Кожний закон самоорганізації повинен містити до 5 макропараметрів, між якими розкривається функціональна залежність.

5. Характер функціональної залежності між макропараметрами в конкретному законі самоорганізації повинен бути найбільш простим.

Для того, щоб дати точний опис стану такої складної системи як «модель здоров'я» особистості, скористаємось інформаційно-синергетичною моделлю складної системи, запропонованої авторами [1, 4].

Відповідно до неї будь-яку складну систему (S) можна однозначно задати за допомогою кортежу:

$$S = \langle \{ X_1, X_2, \dots, X_k \}, \{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \} \rangle, \quad (1)$$

де X_k – макропараметри стану системи;

ξ_n – закони самоорганізації системи;

$$k = 1, 2, \dots, K;$$

$$n = k(1, 2, \dots, N).$$

Отже, «модель здоров'я» людини (МЗЛ) можна представити як кортеж:

$$\text{МЗЛ} = \langle \{ X_1, X_2, \dots, X_k \}, \{ \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n \} \rangle, S = \langle \{ X_1, X_2, \dots, X_k \}, \{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \} \rangle \quad (2)$$

де X_k – якісні особистості (макропараметри стану);

ξ_n – цінності особистості (закони самоорганізації);

$$k = 1, 2, \dots, K ;$$

$$n = k(1, 2, \dots, N) .$$

Із формули (2) видно, що цінності особистості – це функціональний зв'язок між скінченою кількістю якостей особистості. Це дуже важливо для практичного застосування, адже на практиці значимими є не стільки наявність чи відсутність у людини тієї чи іншої якості (наприклад, зріст, вага, обхват грудей), а, насамперед, постійні в часі їх комбінації, тобто цінності особистості. Для встановлення вигляду ЗС-законів конкретної особистості потрібно здійснити аналіз проявів її адаптації (самоорганізації), тобто встановити зв'язок і реакцію організму людини на зовнішні та внутрішні фактори, які можна назвати артефактами (АФ). Цілком зрозуміло, що множина АФ має нескінчену кількість елементів.

Кортеж множин АФ і ξ , тобто артефактів і законів самоорганізації, утворюють цілісну систему, а в даному разі – цілісну систему МЗЛ.

Чи завжди множина ξ однозначно визначає множину АФ? Ні, адже реальні вчинки, реакції і стан людини визначаються не лише її внутрішніми особливостями та ресурсами, а й зовнішніми умовами.

Але чи може у множині АФ бути те, чого не було у множині X ? Звісно, що також ні. Отже, власне систему МЗЛ варто вважати саме множини ξ .

Тому цілком логічно під поняттям «культура здоров'я людини» (КЗЛ) розуміти впорядковану сукупність особистісних цінностей, які безпосередньо або опосередковано визначають його життєву культуру, тобто сукупність його цінностей як *homo sapiens*, який приймає відповідні рішення, вчиняє відповідні поступки відповідно до стану його фізичного і психологічного самопочуття та відповідного стану навколишнього середовища.

Відповідно до формули (2) можна записати:

$$S = \langle \{ X_1, X_2, \dots, X_k \}, \{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \} \rangle \text{ МЗЛ} = \langle \{ X_1, X_2, \dots, X_k \}, \{ \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n \} \rangle, \quad (3)$$

$$\text{або } S = \langle \{ X_1, X_2, \dots, X_k \}, \{ \xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n \} \rangle \text{ МЗЛ} = \langle \{ \zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n \} \rangle, \quad (4)$$

де X_k – якісні особистості (макропараметри стану);

ξ_n – цінності особистості (закони самоорганізації);

$$k = 1, 2, \dots, K ;$$

$$n = k(1, 2, \dots, N) .$$

Важливо розуміти, що мова в даному разі йде не про механізми і процеси, які розкривають суть підтримки (збереження) здоров'я людини у відповідному стані, а лише про відображення стану його здоров'я у вигляді математичної функції – математичної моделі (ММ). Фактично ми «піднімаємось» над рівнями фізико-біологічних процесів, які протікають в системах організму людини, і проводимо дослідження на рівні законів впорядкування внутрішнього стану людини з зовнішніми подразниками.

На людину діє ряд факторів, які різною мірою впливають на стан його здоров'я. Можливо виділити відносно самостійні групи цих факторів: компонент зовнішнього середовища, соціальний компонент, професійний компонент, індивідуальний компонент, які на більш вищому рівні ієрархії факторів можливо віднести до зовнішніх та внутрішніх факторів.

Тому цілком логічно розглядати й відповідні до них компоненти «моделі здоров'я». У ході дослідження встановлено особистісні якості здоров'я сучасної людини, які згідно з інформаційно-синергетичною моделлю типу (3) або (4) є макропараметрами (X_k) системи МЗЛ, а саме:

1. *Макропараметри зовнішнього середовища:*

- x_{11} – космічні, геліо-і геофізичні чинники;
- x_{12} – стан навколишнього середовища – 20-25%;
- x_{13} – кліматичні і метеорологічні чинники;
- x_{14} – хімічні (техногенні) чинники.

2. *Соціальні макропараметри:*

- x_{21} – умови життя людей – 50-55%;
- x_{22} – медичне забезпечення – 10-15 %.

3. *Професійні макропараметри (професійні фактори небезпек):*

- x_{31} – ризики нещасних випадків;
- x_{32} – несприятлива дія фізичних чинників;
- x_{33} – шкідлива дія хімічних речовин;
- x_{34} – несприятлива дія біологічних чинників;
- x_{35} – досконале знання нормативно-законодавчої бази техніки безпеки;
- x_{36} – вміння майстерно виконувати професійні дії.

4. *Індивідуальні макропараметри:*

- x_{41} – генетичні фактори – 15-20%;
- x_{42} – антропометричні фактори;
- x_{43} – фактори способу життя і повсякденної поведінки – 50-55%.

Під час аналізу характеристик макропараметрів вдалося їх виділити і повторно сформулювати (з дотриманням названих вище 5 правил) найбільш вживані комбінації макропараметрів (X_k), які у смислових твердженнях є законами самоорганізації (ξ_n) системи МЗЛ.

Ці показники було об'єднано у три відносно самостійні групи:

1. *Соціальний компонент.*

$X_{11}=f(b_{11}, b_{12}, b_{13})$: «Сучасна людина постійно цікавиться життям соціуму, бере в ньому активну участь і є успішною».

2. *Професійний компонент.*

$X_{21}=f(b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24})$: «Сучасна людина – це особистість, яка має всі потрібні для цієї професії знання та у власному стилі професійно виконує роботу».

$X_{22}=f(b_{21}, b_{22}, b_{23}, b_{24}, b_{25})$: «Сучасна людина постійно працює над підвищенням свого фахового рівня».

$X_{23}=f(b_{24}, b_{26})$: «Сучасна людина постійно презентує власні здобутки колегам».

3. *Індивідуальний компонент.*

$X_{31}=f(b_{31})$: «Сучасна людина – це фізично здорова людина, яка постійно турбується про своє здоров'я»;

$X_{32}=f(b_{32}, b_{33})$: «Сучасна людина – це людина з позитивними установками до інших людей»;

$X_{33}=f(b_{34}, b_{35}, b_{36}, b_{37})$: «Сучасна людина – це хороший працівник»;

$X_{34}=f(b_{37}, b_{38}, b_{12})$: «Сучасна людина – це ерудована людина з власним баченням світу, яке вона проявляє у постійній пізнавальній і мистецькій діяльності».

Отже, в аналітичній формі типу (3) або (4) передаємо зміст і структуру оптимальної моделі здорової людини.

$$\text{ОМЗЛ} = \langle \{X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{31}, X_{32}, X_{33}, X_{34}, X_{35}, X_{36}, X_{37}, X_{38}\}, \{\xi_{11}, \xi_{21}, \xi_{22}, \xi_{23}, \xi_{31}, \xi_{32}, \xi_{33}, \xi_{34}\} \rangle \quad (5)$$

або
$$\text{ОЗМЛ} = \langle \{\xi_{11}, \xi_{21}, \xi_{22}, \xi_{23}, \xi_{31}, \xi_{32}, \xi_{33}, \xi_{34}\}, \quad (6)$$

Цілком очевидно, що носієм культури здоров'я є сама особистість, а тому для цілеспрямованого її розвитку (формування, змінювання) потрібно забезпечити цілеспрямовану активність самої особистості, причому певного змісту й протягом досить тривалого часу.

Що ж до управління процесом розвитку культури здоров'я особистості, то найбільш доцільно цей вплив здійснювати на основі:

- а) висунення обґрунтованих вимог до змісту і структури культури здоров'я сучасної людини;
- б) забезпечення можливостей кожній особистості досягти поставленої мети власним, максимально індивідуалізованим способом;
- в) створення систем повноцінного організаційно-методичного забезпечення і стимулювання відповідних дій людини.

Це можливо зробити за допомогою розробки і реалізації індивідуальної програми розвитку культури здоров'я кожної окремої людини.

Алгоритм управління системним розвитком за принципами організаційної культури здоров'я з урахуванням здоров'я особистості описано нижче.

1. Розробка (вибір) моделі здоров'я людини (особистості).

Для цього було використано інформаційно-синергетичну модель складної системи (1) і представлено моделі здоров'я людини (S) у вигляді кортежу якостей (X_k) і цінностей (ξ_n) (3), (4).

2. Визначення оптимального стану здоров'я людини.

За допомогою моделі МЗЛ (3), (4) здійснено аналіз масиву очікувань станів здоров'я людини щодо якостей і цінностей параметрів здоров'я людини. Склад і структуру бажаної моделі людини представлено у вигляді формул (5) і (6).

3. Розробка механізму (переведення) людини до бажаного стану.

Оскільки об'єкт дослідження – людина – є досить складним, а переведення його в новий стан вимагає тривалого часу, більш доцільно управління процесом оздоровлення здійснити на основі розроблення і реалізації каскадної програми розвитку [5]. Ця технологія дозволяє здійснювати спрямований розвиток складних об'єктів у межах одного якісного переходу. Такі програми складаються з обмеженої кількості акцій – конкретних дій (проектів), які є реплікаторами системного розвитку.

4. Розробка програми оздоровлення.

Цей етап доцільно реалізувати з використанням розробленого спеціального документу – бланка-концепції процесу оздоровлення, включивши в нього типи, класи і види артефактів (результати визначення поточних значень стану здоров'я людини, запланованого оптимального стану здоров'я та особистих досягнень людини), які відповідають конкретним цінностям (ξ_n), що ввійшли до структури ОМЗЛ (5), (6). Під час визначення сукупності артефактів потрібно враховувати особливості діяльності людини (реальний стан зовнішнього середовища) та реальний стан здоров'я.

З аналітичної точки зору створення людиною ОМЗЛ за допомогою запропонованого їй бланка-концепції оздоровлення людини означає пошук нею індивідуальних коефіцієнтів макропараметрів (X_k), які входять до законів самоорганізації (ξ_n) і наповнюють їх конкретним (індивідуальним) змістом, не спотворюючи самої функціональної залежності між макропараметрами. Цей пошук матеріалізується за допомогою планування людиною конкретних видів діяльності і способів досягнення результатів. Завдяки цьому траєкторія руху є індивідуальною, але забезпечує рух до наперед поставленої мети – бажаного стану здоров'я, тобто до ОМЗЛ.

5. Реалізація програми оздоровлення.

Реалізація людиною ОМЗЛ має самостійний характер, але цей процес відбувається в умовах організаційно-методичного сприяння, матеріального й духовного стимулювання людини, її бажання та наполегливості.

6. Аналіз процесу та результатів оздоровлення.

Цей етап реалізується як особисто людиною і її домашнім лікарем, так і фахівцем з психології.

7. Розроблення пропозицій для корекції змістовного наповнення алгоритму процесу оздоровлення.

Зазначений етап реалізується за допомогою фахівців з психології, дієтологів, спортивних лікарів із залученням науковців і методистів з геронтології.

Важливо відмітити, що використання будь-яких технологій управління системним оздоровленням є досить складним процесом і вимагає постійного науково-методичного супроводу цієї діяльності. Технологія управління станом здоров'я, розвитком за принципами організаційної «культури здоров'я» не є виключенням із цього правила. Тому таку роботу доцільно організовувати як інноваційну діяльність або експериментальне дослідження за участю науково-методичних фахівців протягом всього життя, всіх циклів вікової періодизації – від першого до останнього етапів з корекцією алгоритмів управління станом здоров'я на кожному з них за принципами «культури здоров'я».

Висновки. Використання методологічної основи синергетичної за своєю природою теорії адаптивних самоналагоджувальних систем дозволило представити надзвичайно складний об'єкт – «модель здоров'я» людини (S) – як скінчений і зрозумілий для сприймання та зручний у використанні набір якостей і цінностей особистості. Цей підхід дозволив розробити інформаційно-синергетичну модель здоров'я людини (3), (4) і розкрити зміст і структуру оптимальної моделі здоров'я людини (5), (6).

Використання алгоритму управління станом здоров'я за принципами організаційної культури здоров'я дозволило виявити і розкрити зміст етапів управління станом здоров'я людини, тобто розробити технологію переведення поточного стану здоров'я – МЗЛ – до нового, бажаного стану – ОМЗЛ, який відповідає бажаному стану здоров'я особистості і сучасним суспільним очікуванням і вимогам до людини.

Використання інструментарію синергетичних підходів для дослідження стану здоров'я людини виявилось надзвичайно продуктивним і розкриває перспективи для подальшого дослідження, зокрема, в напрямі створення бланків-концепцій індивідуальних програм розвитку «культури здоров'я» пересічних громадян різних вікових категорій і розроблення механізмів організаційно-методичного супроводу створення і здійснення таких програм.

ЛІТЕРАТУРА

1. Луценко В.Г. Комп'ютерна візуалізація адаптивного потенціалу серцево-судинних захворювань / В.Г.Луценко, А.І.Трикіло // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ, 2011. – Випуск 1(18). – С.69-72.
2. Гаврютченков Я.В. Електронний біомедичний комплекс контролю і керування вмістом інсуліну / Я.В.Гаврютченков, А.Т.Нельга // Наукові дослідження: зв'язок теорії і практики: XX Всеукраїнська наукова Інтернет-конференція, 29-30 квітня 2012 р.: тези доп. – Тернопіль, 2012. – С.1-4.
3. Дубовик И.С. Исследование и математическое описание неинвазивного метода определения сахара в крови с применением компьютерных технологий / И.С.Дубовик, А.И.Трикіло // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету (технічні науки). – Дніпродзержинськ, 2011. – Випуск 2(17). – С.170-173.
4. Вайнер Э.Н. Валеология [Электронный ресурс]: учебник для вузов / Вайнер Э.Н. – Режим доступа: http://www.bsu.ru/content/page/1415/hecadem/wainer_en/p4.php.htm.
5. Осадчий І.Г. Синергетика в управлінні освітою: основи теорії БМ-систем / І.Г.Осадчий // Шлях освіти. – №4. – 2001. – С.26-31.

Надійшла до редколегії 15.02.2016.