

УДК 681.515.8

М.М. Поліщук, О.К. Каганюк, Р.В. Сопіжук  
Луцький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ DC-AC ПЕРЕТВОРЮВАЧА З МІКРОКОНТРОЛЕРНИМ КЕРУВАННЯМ ЧАСТОТИ ІНВЕРТОРА

**М.М. Поліщук, О.К. Каганюк., Р.В. Сопіжук. Дослідження DC-AC перетворювач з мікроконтролерним керуванням частоти інвертора.** Досліджено перетворювач електричної енергії, його режими роботи та основні складові частин від яких залежить потужність роботи пристрою. Досліджено режими роботи та характеристики інвертора при різних елементах пристрою, побудовані графіки роботи перетворювача, дано рекомендації по оптимізації, вказано переваги та недоліки проєктованого рішення.

**Ключові слова:** інвертор, мікроконтролер, ATmega328P, план Бокса-Бенкіна, трансформатор, транзистори, частота.

**Н.Н. Полищук, А.К. Каганюк, Р.В. Сопижук. Исследование DC-AC преобразователь микроконтроллерным управлением частоты инвертора.** Исследованы преобразователь электрической энергии, его режимы работы и основные составляющие частей от которых зависит мощность работы устройства. Исследованы режимы работы и характеристики инвертора при различных элементах устройства, построенные графики работы преобразователя, даны рекомендации по оптимизации, указано преимущества и недостатки проектируемого решения.

**Ключевые слова:** инвертор, микроконтроллер, ATmega328P, план Бокса-Бенкина, трансформатор, транзисторы, частота.

**M.M.Polishchuk, A.K.Kaganiuk., R.V.Sopizhuk. Research DC-AC converter with microcontroller-controlled frequency inverter.** Researched electrical energy converter, its modes of operation and the main components of which depend on the capacity of the device. Investigated modes and features inverter with various elements of the device, the graphs of the converter is given recommendations on optimization given the advantages and disadvantages of the designed solution.

**Keywords:** inverter microcontroller, ATmega328P, plan Box-Banking, transformer, transistor, frequency.

**Вступ.** Перетворювачем електричної енергії є пристрій, який пов'язує дві або більше електричні системи з відмінними один від одного параметрами і дозволяє по заданому закону змінювати ці параметри забезпечуючи обмін електричною енергією між зв'язуваними системами [1]. Напівпровідникові перетворювачі напруги - електронні трансформатори, що зв'язують системи змінного і постійного струму, а саме перетворювачі постійної напруги в змінну - інвертори.

Історично першими виникли перетворювачі енергії, на базі електромеханічних пристроїв. Електричний двигун перетворював електричну енергію в механічну, яка за допомогою генератора перетворювалась в електричну з потрібними параметрами [2]. Сучасні пристрої перетворення енергії не містять рухомих елементів, тому їх називають статичними перетворювачами, зокрема інвертори DC-AC перетворюють, постійну напругу 12 В у змінну напругу 220 В. Інвертор значно дешевший за міні-електростанцію, є мініатюрним та легким [3]. Спільно з одним, або декількома акумуляторами він може працювати як автономне джерело безперебійного живлення для будинку, котельної, пожежних і охоронних систем. Якщо є мережева напруга 220 Вольт, він просто пропускає його "крізь" себе і, при необхідності, заряджає акумулятори. Якщо напруга в мережі зникла, інвертор миттєво починає генерувати змінну напругу 220 Вольт від акумуляторів [4]. Час автономної роботи залежить від потужності навантаження і ємності акумуляторів. Так, наприклад, чотирьох акумуляторів по 190 А/г вистачить приблизно на 16 годин автономної роботи при постійному навантаженні 0,5 КВт [5]. При появі мережевої напруги прилад автоматично перемкнеться в початковий стан очікування і зарядить акумулятори.

**Мета та завдання розробки.** Мета дослідження – дослідження DC-AC перетворювача з мікроконтролерним керуванням частоти інвертора. Дане дослідження дозволить автоматизувати і удосконалити деякі елементи пристрою, а також, провести аналіз вхідних та вихідних даних.

Завдання дослідження зумовлюються метою роботи і полягають у наступному:

- проаналізувати вхідні та вихідні дані DC-AC перетворювача;
- дослідити елементну базу інвертора;
- виявити та систематизувати фактори що впливають на вихідні дані пристрою;
- здійснити оптимізацію елементної бази DC-AC перетворювача для кращого функціонування;

**Аналіз існуючих перетворювачів напруг.** Найпопулярніші технічними рішеннями для інверторів DC-AC стали класичні схеми мостових інверторів та їх модифікації. Наприклад, функціональну схему інвертора серії DA, що перетворює нестабільну напругу постійного струму в

стабілізовану (в тому числі і по частоті) однофазну напругу змінного струму, наведено в [6]. На вході силового двоступеневого фільтра, каскад формує багато-імпульсні послідовності. Силовий трансформатор, що входить до складу перетворювача постійної напруги живиться від мостового каскаду транзисторів MOSFET. При такому варіанті побудови інвертора, незважаючи на додаткове перетворення енергії в імпульсному перетворювачі напруги (440 В), при раціональному проектуванні перетворювача постійної напруги (в даному випадку робоча частота дорівнює 80 кГц), досягаються високі енергетичні і масо-габаритні характеристики.

У промисловому виконанні найбільшого поширення набули двотактні мостові схеми виконані на польових транзисторах фірми International Rectifier IRFP23N50L. Мостовий каскад і силовий фільтр охоплені негативним зворотним зв'язком, що дозволяє забезпечити високі енергетичні характеристики інвертора. Для забезпечення необхідної форми синусоїдальної вихідної напруги використовується дволанковий LC-фільтр змінного струму, який виконує функції дроселя виконаного на кільцевому сердечнику з МО - пермалой.

Однією із сфер застосувань інверторів є альтернативна енергетика. Наприклад, американська фірма Texas Instruments пропонує рішення C2000™ Solar DC/AC SinglePhase Inverter на базі своїх нових мікроконтролерів C2000™ F28M35H52C. У пристрої конструктивно реалізовано лише одна фаза змінної напруги. В основі інверторного каскаду перетворення лежить повний міст DC/AC. Цифровий контроль дозволяє реалізувати інтерфейси віддаленого моніторингу та контролю пристрою. Сумарний коефіцієнт нелінійних спотворень (THD) менший ніж на 5 відсотків, а повний ККД навантаження більший ніж 96%. Єдиним мінусом даного інверторного каскаду є висока ціна, яка досягає 450\$. [7].

До світових лідерів в галузі силової електроніки входить також американська компанія Xantrex [8]. Компанія була заснована більше 20-ти років тому і в результаті злиття виробників інверторів перетворилася на великий промисловий холдинг. Продукцію компанії відрізняє висока відмовостійкість, в конструктиві вже закладено грозовий захист, захист від екстрених перевантажень, захист від некоректної інсталяції. Останні 10-років компанія активно розвиває напрямок керуючих систем для вітрогенераторів, сонячних батарей і автоматизації систем автономного живлення. Ціна на продукцію Xantrex дуже висока, але в деяких випадках (універсальні контролери для сонячних батарей) конкурентні альтернативи відсутні.

Одним із лідерів азіатського ринку є компанія CyberPower Systems [9]. Це тайванський виробник ББЖ та інверторів. Його продукція відрізняється відповідністю заявленим характеристикам, чистим синусом на виході інверторів та високою довговічністю.

Щодо елементної бази, то безперечним лідером виробником мікросхем обов'язки залишається компанія MAXIM™. У каталозі продукції що випускається, широко застосовуються перетворювачі DC-AC на базі ШІМ-регулювання (наприклад серії MAX 1739, 1839) для регулювання яскравості флюоресцентних ламп [10].

**Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.** Наукова новизна дослідження полягає в наступному:

- досліджено вплив геометричних параметрів вторинної обмотки трансформатора на вихідну потужність перетворювача напруги.
- проведено лабораторні випробування розробленого пристрою для перетворення напруги із застосуванням математичного методу планування експерименту по чотирьох факторах на трьох рівнях, а саме симетричного некомпозиційного плану реалізації експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку.
- досліджено вплив вхідної напруги, вихідної частоти, потужності транзисторів, геометричних параметрів вторинної обмотки трансформатора на вихідну потужність DC-AC інвертора.

Для досягнення поставленого завдання було проведено аналіз вихідних даних при різних параметрах вхідних напруг, порівняльні характеристики можливостей перетворювача напруги із змінними елементами.

Дослідження DC-AC перетворювача проводилась методом експерименту, оскільки цей метод найбільш точніше продемонструє роботу інвертора за різних умов та елементів цього пристрою. У процесі дослідження будуть отримані дані, які характеризують умови роботи інвертора в оптимальному режимі, що наочно підтверджується графічним матеріалом. при різних режимах роботи інвертора. Лише на основі перевірки адекватності моделі формувалася найбільш оптимальна та ефективний режим роботи пристрою. Запропоновані зміни у перетворювача напруги дозволять пришвидшити роботу та збільшити потужність даного пристрою, завдяки

заміні параметрів трансформатора, транзистора та мікроконтролера, що у свою чергу дає можливість інвертору підключати більше електричних пристроїв та стабілізує вихідну напругу, а саме модифіковану синусоїду.

Результати дослідження показали працездатність інвертору з раціональними параметрами визначивши при цьому найоптимальнішу та найефективнішу елементну базу для нього [11]. Також був проведений аналіз роботи пристрою для різних вхідних напруг. Структурна схема пристрою зображена на рис. 1.

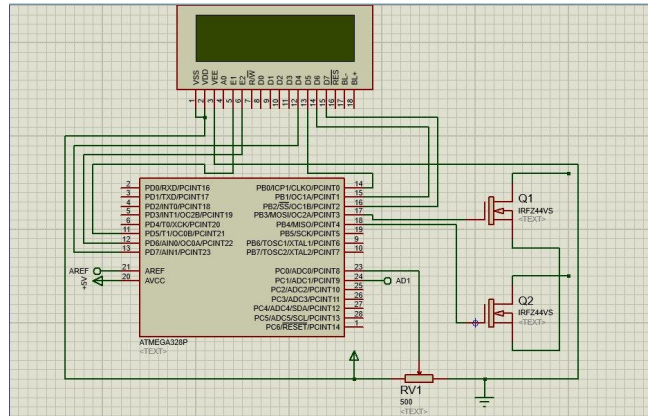


Рис. 1. Модель перетворювача у програмі Proteus

Джерело енергії постійного струму, в найпоширенішому випадку акумулятор 12В, підключається до трансформатора через трипозиційний комутатор. Комутатор є набором електронних ключів, що забезпечує 3 стани: до первинної обмотки трансформатора підключено джерело живлення позитивної полярності, до первинної обмотки трансформатора підключене джерело живлення негативної полярності та стан коли первинна обмотка короткозамкнена. Послідовно перемикаючи ці стани, на первинній обмотці формується змінна напруга частотою 50Гц і амплітудою 12В. На вторинній обмотці трансформатора при цьому формується напруга з тією ж частотою і формою, проте ефективна напруга складає 220В. Вихідна напруга знімається з вторинної обмотки, тому має аналогічні параметри.

На рис. 1 зображено блок-схему роботи пристрою, алгоритм роботи якого полягає в почерговому вмиканні і вимиканні 17 і 18 пінів мікроконтролера ATmega 328P. Відповідні сигнали надходять на затвори польових транзисторів, які в свою чергу керують напругою і струмом на трансформаторі, що піднімає напругу з 12 В до 220 В.

Наприклад, інвертор, розрахований на напругу джерела 12В, працює від розрядженого акумулятора з напругою 10В. При цьому амплітуда напруги на виході знижується пропорційно до 259В. Схема управління змінює коефіцієнт заповнення вихідної напруги до 0.72, при цьому ефективна напруга залишається рівною 220В. Проте форма напруги та її амплітуда змінюється, а це може бути недопустимо для деяких навантажень. Фото пристрою представлено на рис. 2.



Рис. 2. Зовнішній вигляд розробленого DC-AC перетворювача

**Методика лабораторно-виробничих випробувань пристрою.** Складність технологічного процесу перетворювача напруги при його структурі не дозволяє повністю визначити раціональні конструктивні параметри та оптимальні режими роботи пристрою аналітичним шляхом. Тому, для

встановлення впливу на потужність та стабільність роботи пристрою елементів було проведено лабораторно-виробничі випробування розробленого пристрою при різних складових елементах із застосуванням математичного методу планування експерименту.

Аналіз результатів теоретичного дослідження процесу оптимізації параметрів інвертора, показав що значний вплив на вихідну напругу та потужність пристрою має визначена потужність польових транзисторів та товщина провідника вторинної обмотки трансформатора та вхідна напруга. Результати експериментальних досліджень показують, що на потужність також впливає вихідна частота перетворювача. Тому, для дослідження роботи пристрою було вирішено провести чотирих-факторний експеримент.

Для проведення повнофакторного експерименту необхідно провести дослідів, які визначаються за формулою:

$$N = m^k, \quad (1)$$

де  $m$  – кількість рівнів дослідження;

$k$  – кількість факторів у серії дослідження.

Проведення повного факторного експерименту по чотирьох факторах на трьох рівнях вимагає проведення 81 дослідів. Враховуючи трудомісткість та вартість проведення дослідів, важливо було зменшити їх кількість до оптимально-необхідного значення. Цю задачу дозволяє розв'язати використання симетричного некомпозиційного плану реалізації експерименту Бокса-Бенкіна другого порядку. Для проведення чотири-факторного експерименту, згідно з вищезгаданим планом, необхідно провести 27 дослідів.

Планування експериментального дослідження включало такі етапи:

- кодування факторів;
- складання таблиці факторів і рівнів варіювання;
- складання матриці планування;
- реалізація плану експерименту згідно з матрицею планування;
- складання рівняння регресії для визначення коефіцієнтів;
- оцінка значущості коефіцієнтів регресії;
- перевірка адекватності отриманої математичної моделі.

При складанні таблиці факторів і рівнів варіювання (табл.1.1) враховували результати попередніх досліджень. План Бокса-Бенкіна розрахований на використання трьох рівнів для кожного фактора: верхнього (+1), нульового (0) і нижнього (-1) [12].

Таблиця 1.1. Фактори і рівні варіювання

Рівні варіювання	Фактори			
	Вхідна напруга $U_{вх}$ , В	Частота вихідна $\nu$ , Гц.	Потужність польових транзисторів $P$ , Вт	Площа січення вторинної обмотки трансформатора $S$ , мм <sup>2</sup>
	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$
Верхній (+1)	15	150	300	0,7
Нульовий (0)	12	100	200	0,5
Нижній (-1)	9	50	100	0,3
Інтервал варіювання, $\epsilon$	3	50	100	0,2

Дослідження проводили, використовуючи матрицю планування. У розкодованому вигляді матриця планування експерименту і порядок проведення дослідів представлені у таблиці. Зв'язок між кодованими і натуральними значеннями факторів встановлювався залежностями:

$$x_1 = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{вх}0}}{\varepsilon_1}; x_2 = \frac{v - v_0}{\varepsilon_2}; x_3 = \frac{P - P_0}{\varepsilon_3}, x_4 = \frac{S - S_0}{\varepsilon_4} \quad (2)$$

де  $x_1, x_2, x_3, x_4$  – кодовані значення факторів, відповідно, вхідна напруга, вихідна частота, потужність польових транзисторів та товщина провідника вторинної обмотки трансформатора;

$U_{\text{вх}}, v, P, S$  – натуральні значення факторів, відповідно, вхідна напруга, вихідна частота, потужність польових транзисторів та товщина провідника вторинної обмотки трансформатора;

$U_{\text{вх}0}, v_0, P_0, S_0$  – натуральні значення факторів на нульовому рівні;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  – інтервали варіювання факторів.

Нелінійний характер очікування функцій відгуку ступені дослідження інвертора в області факторного простору поданий у вигляді рівняння регресії:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{44}x_4^2 \quad (3)$$

Коефіцієнти регресії після реалізації плану експерименту визначено за такими формулами:

$$b_0 = 0,33333 \sum_{j=1}^n y_j - 0,16667 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 y_j, \quad (4)$$

$$b_i = 0,08333 \sum_{j=1}^n x_{ij} y_j, \quad (5)$$

$$b_{ii} = 0,125 \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 y_j + 0,0625 \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n x_{ij}^2 y_j - 0,16667 \sum_{j=1}^n y_j, \quad (6)$$

$$b_{ir} = 0,25 \sum_{j=1}^n x_{ij} x_{rj} y_j, \quad (7)$$

де  $j$ - номер дослідів в матриці планування;

$n$  - кількість дослідів в матриці планування;

$y_j$ - значення функції відгуку в  $j$ -му досліді;

$k$ -кількість факторів;

$x_{ij}, x_{rj}$ - кодовані значення  $i$ -го чи  $r$ -го фактору в  $j$ -му досліді;

$i, r$  - номери факторів.

Дисперсії коефіцієнтів регресії та їх коваріації визначено за формулами:

$$S_{b_0}^2 = 0,33333 S_y^2, \quad (8)$$

$$S_{b_i}^2 = 0,08333 S_y^2, \quad (9)$$

$$S_{b_{ii}}^2 = 0,1875 S_y^2, \quad (10)$$

$$S_{b_{ir}}^2 = 0,25 S_y^2, \quad (11)$$

$$\text{cov}_{b_0 b_{ii}} = -0,16667 S_y^2, \quad (12)$$

$$\text{cov}_{b_{ii} b_{ir}} = 0,0625 S_y^2. \quad (13)$$

Значимість коефіцієнтів регресії перевіряли шляхом порівнювання абсолютної величини цих коефіцієнтів з їх довірчими інтервалами. Довірчі інтервали розраховували згідно з формулами:

$$\Delta b_0 = t_{0,05;f_1} S_{b_0}, \quad (14)$$

$$\Delta b_i = t_{0,05;f_1} S_{b_i}, \quad (15)$$

$$\Delta b_{ir} = t_{0,05;f_1} S_{b_{ir}}, \quad (16)$$

$$\Delta b_{ii} = t_{0,05;f_1} S_{b_{ii}}, \quad (17)$$

де  $t_{0,05;f_1}$  - табличне значення критерію Ст'юдента при 5%-му рівні значущості та  $f_1 = n_0 - 1$  - числа ступенів вільності дисперсії відтворюваності ( $n_0$  - кількість дослідів у центрі плану).

Коефіцієнт регресії вважали статистично значущим, коли його абсолютна величина більша довірчого інтервалу або рівна йому. Незначущі коефіцієнти видаляли із моделі.

Перевірку адекватності рівняння проводили за допомогою  $F_\phi$  - критерію Фішера. Адекватність отриманої моделі матиме місце, якщо розрахункове значення критерію  $F_{f_2;f_1}^{\text{розн.}}$  менше табличного для прийнятого рівня значимості:

$$F_{f_2;f_1}^{\text{розн.}} \leq F_{0,05;f_2;f_1}^{\text{табл.}}, \quad (18)$$

де  $F_{0,05;f_2;f_1}^{\text{табл.}}$  - табличне значення критерію Фішера при 5%-му рівні значущості і ступенях вільності дисперсії неадекватності  $f_2$  та дисперсії відтворюваності  $f_1$ .

$f_2 = n - k'$  - число ступенів вільності дисперсії неадекватності з урахуванням числа  $k'$  залишених коефіцієнтів регресії (у тому числі і  $b_0$ ).

Розрахункове значення критерію Фішера становить:

$$F_{f_2;f_1}^{\text{розн.}} = \frac{S_{\text{неад.}}^2}{S_y^2}, \quad (19)$$

де  $S_{\text{неад.}}^2$  - дисперсія неадекватності, яка визначена з  $f_2$ - числом ступенів вільності;

$S_y^2$  - дисперсія відтворюваності експерименту, яка визначена з  $f_1$  - числом ступенів вільності.

Згідно з матрицею планування експерименту, кількість дослідів на нульовому рівні рівна трьом. Це дозволило використати для визначення дисперсії відтворюваності експерименту таку формулу:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} (y_{0_u} - \bar{y}_0)^2}{f_1}, \quad (20)$$

де  $u$  - номер дослідів у центрі плану;

$y_{0_u}$  - значення функції відгуку в  $u$ -му досліді в центрі плану;

$\bar{y}_0$  - середнє арифметичне значення функції відгуку отримане за результатами  $n_0$  дослідів у центрі плану;

Дисперсію неадекватності визначали, користуючись наступною формулою:

$$S_{\text{неад.}}^2 = \frac{SS_{\text{неад.}}}{f_2}. \quad (21)$$

При розрахунку дисперсії  $S_{\text{неад.}}^2$  враховували ту обставину, що при проведенні експериментів з усіх дослідів плану повторювався тільки один (дослід в центрі плану). Тому, сума квадратів  $SS_{\text{неад.}}$  дорівнює:

$$SS_{\text{неад.}} = n_0(\hat{y}_0 - \bar{y}_0)^2 + \sum_{j=1}^{n-n_0} (\hat{y}_j - y_j)^2, \quad (22)$$

де  $\hat{y}_0$  - значення функції відгуку в досліді із центру плану, що розраховане за рівнянням регресії;

$\hat{y}_j$  - значення функції відгуку в  $j$ -му досліді, що розраховане за рівнянням регресії;

$y_j$  - значення функції відгуку в  $j$ -му досліді, що визначене експериментально[12].

**Висновки.** Використана методика проведення експериментів планом Бокса-Бенкінадозволять:

1. Отримати математичну модель процесу оптимізації перетворювача напруги при його зміні елементної бази у вигляді рівняння регресії, функцією відгуку якого є потужність інвертора;
2. Провести аналіз вихідних даних при різних вхідних напругах, порівняльні характеристики можливостей перетворювача напруги із зміненими елементами;
3. Отримані результати проведених досліджень можуть вказати на певні особливості зміни властивостей інвертора. Так за збільшенням потужності польових транзисторів, відбувається збільшення потужності перетворювача. Крім цього, за наявності більшого провідника вторинної обмотки, що необхідно враховувати при виборі трансформатора, теж збільшується потужність. У випадку збільшення частоти пристрою можуть нести негативну дію на ефективність транзисторів та мікроконтролера. Тому, при конструюванні оптимальних складових пристрою необхідно в його конструкції застосовувати мультівібратор.

1. Крогерис А., Рашевиц К., Рутманис Л. и др. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии / Под ред. А. Крогериса. Рига: Зинатне. 1969.
2. Ирвинг М., Готтлиб. Источники питания. Инверторы, конверторы, линейные и импульсные стабилизаторы. – 2-е изд. – М.: Постмаркет, 2002. – 544 с.
3. Преобразователи напряжения и автомобильные инверторы напряжения (12-220В, 220-12В, 24-12В) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://auto-line.net/ru/shop/car-electrics/car-voltage-converters>.
4. «Польовий» перетворювач напруги [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.radiosvoboda.org/content/article/26936954.html>. (Дата звернення 01.04.17)
5. Схема преобразователя 12\220 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://monitor.espec.ws/section44/printview127136.html>.
6. Транзисторные DC-AC преобразователи напряжения: характеристики, структурные схемы, рекомендации по применению // "Силовая электроника" № 2, 2004.
7. C2000™ Solar DC/AC Single Phase Inverter // <http://www.ti.com/tool/TIDM-SOLAR-ONEPHINV#descriptionArea>
8. Power inverters [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.xantrex.com/power-products/power-inverters/overview.aspx> (дата звернення 05.04.17)
9. Product literature [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cyberpowersystems.com/support/knowledge-center/general-literature> (дата звернення 05.04.17)
10. WideBrightnessRangeCCFLBacklightControllers [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1739-MAX1839.pdf> (дата звернення 12.04.17).
11. Здолбіцька Н.В. DC-AC перетворювач з мікроконтролерним керуванням частоти інвертора / Н.В. Здолбіцька, А.П. Здолбіцький, Р.В. Сопіжук, В.В. Супрунок // Науковий журнал "Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво". – Луцьк: РВВ Луцького НТУ. – Вип. 23. – 2016. – С. 25-30.
12. Аністратенко В.О., Федоров В.Г. /Математичне планування експериментів в АПК: Навч. посібник.-К.Вишашк., 1993.-375 с.