

УДК 681.515.8

Здолбівська Н.В., Здолбівський А.П., Сопіжук Р.В., Супрунюк В.В.  
Луцький національний технічний університет

## DC-AC ПЕРЕТВОРЮВАЧ З МІКРОКОНТРОЛЕРНИМ КЕРУВАННЯМ ЧАСТОТИ ІНВЕРТОРА

**Н.В. Здолбівська, А.П. Здолбівський, Р.В. Сопіжук, В.В. Супрунюк. DC-AC перетворювач з мікроконтролерним керуванням частоти інвертора.** Розглянуто перетворювачі електричної енергії, їх схемотехнічні рішення та основні відмінності апаратної та програмної частин. Спроектовано підвищувальний імпульсний перетворювач постійної напруги із використанням недорогих сучасних електронних компонентів, наведено структурну та принципову схеми інвертора, дано рекомендації по використанню, вказано переваги та недоліки проєктованого рішення.

**Ключові слова:** інвертор, мікроконтролер, ATmega328P, трансформатор, транзистори, потенціометр, частота 50-200Гц.

**Рис. 4. Літ. 10.**

**Н.В. Здолбівская, А.П. Здолбівский, Р.В. Сопіжук, В.В. Супрунюк. DC-AC преобразователь с микроконтроллерным управлением частоты инвертора.** Рассмотрены преобразователи электрической энергии, их схемотехнические решения и основные различия аппаратной и программной частей. Спроектирован повышающий импульсный преобразователь постоянного напряжения с использованием недорогих современных электронных компонентов, приведена структурная и принципиальная схемы инвертора, даны рекомендации по использованию, указано преимущества и недостатки проектируемого решения.

**Ключевые слова:** инвертор, микроконтроллер, ATmega328, трансформатор, транзисторы, потенциометр, частота 50-200Гц.

**N.V. Zdobitska, A.P. Zdobitskiy, R.V. SopiZhuk, V.V. Suprunyuk. DC-AC converter with microcontroller -controlled frequency inverter.** Considered electric power converters, circuit solutions and their main differences between the hardware and software parts. Designed buoyant DC pulse converter using inexpensive modern electronic components are structural and schematic diagram of the inverter, Recommendations on use, given the advantages and disadvantages of the designed solution.

**Keywords:** inverter, microcontroller, ATmega328, transformer, transistors, potentiometer, frequency 50-200Hz.

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, називаються інверторами.

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, наприклад, постійну напругу 12 В у змінну напругу 220 В. Інвертор значно дешевший за міні-електростанцію, є мініатюрним і 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 перемикається в початковий стан очікування і зарядить акумулятори.

**Аналоги та схемотехнічні рішення.** Поширеними схемотехнічними 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 двохступеневого фільтра каскад формує багатоімпульсні 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 проєктуванні перетворювача постійної напруги (в

даному випадку робоча частота дорівнює 80 кГц), досягаються високі енергетичні і масо-габаритні характеристики. Двотактний мостовий каскад виконаний на польових транзисторах з ізольованим затвором MOSFET (в 200-ватному перетворювачі напруги застосовуються польові транзистори фірми International Rectifier IRFP23N50L: TR2, TR3, TR4, TR5). Мостовий каскад і силовий фільтр охоплені негативним зворотним зв'язком, який забезпечує високі енергетичні характеристики інвертора. Для забезпечення необхідної форми синусоїдальної вихідної напруги використовується дволанковий LC-фільтр змінного струму (дросель виконаний на кільцевому осерді з МО-пермалюю).

Однією із сфер застосувань інверторів є альтернативна енергетика. Наприклад, американська фірма Texas Instruments пропонує рішення C2000™ Solar DC/AC Single Phase Inverter на базі своїх нових мікроконтролерів C2000™ F28M35H52C. У пристрої конструктивно реалізовано 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 є його 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 грозозахист, 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.

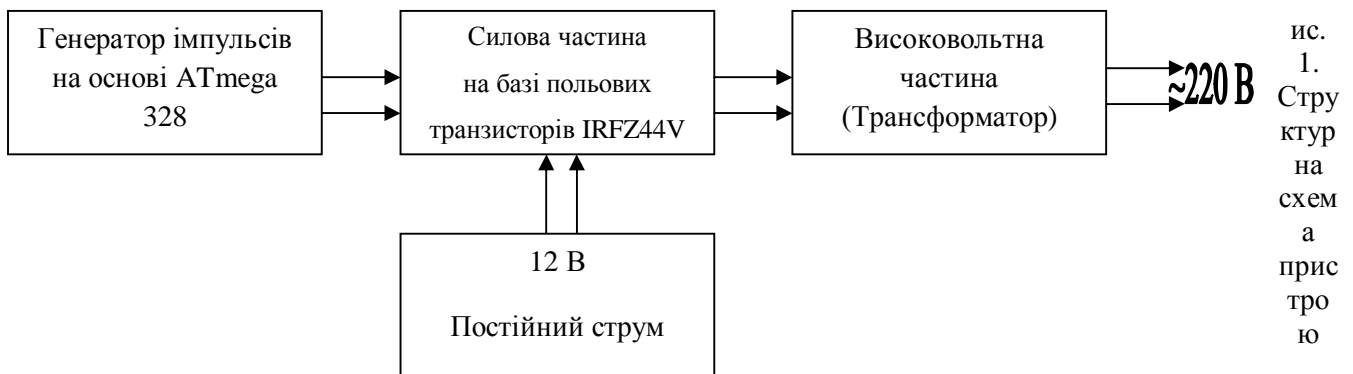
Одним із лідерів азіатського ринку є компанія CyberPower Systems [9]. Це тайванський виробник ББЖ та інверторів. Його продукція відрізняється відповідністю заявленим характеристикам, чистим синусом на виході інверторів, високою довговічністю.

Щодо елементної бази, то безперечним лідером виробником мікросхем обов'язки залишається компанія MAXIM™. Широко застосовуються її перетворювачі DC-AC на базі ШІМ-регулювання (наприклад серії MAX 1739, 1839) для регулювання яскравості флуоресцентних ламп [10].

**Мета та завдання розробки.** Метою роботи є розробка недорогого пристрою інвертора DC-AC на сучасній елементній базі. Основні технічні вимоги до проектованої системи:

- доступність елементної бази;
- напруга на вході 12 В (акумулятори, або напруга бортової мережі автомобіля);
- змінна напруга на виході інвертора 220 В;
- максимальне навантаження на інвертор 250 Ват;
- можливість контролю параметрів (напруга, частота, контроль режимів заряду та розряду акумуляторів).

**Структурна схема та принцип дії проектованої системи.** Структурна схема пристрою зображена на рисунку 1.



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. Ідеалізовані графіки напруги на трансформаторі показано на рисунку 2. Вихідна напруга знімається з вторинної обмотки, тому має аналогічні параметри.

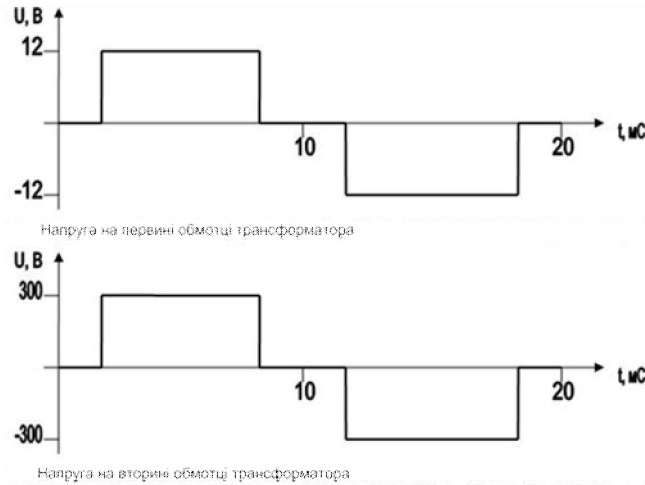


Рис. 2. Графіки напруги типу "модифікована синусоїда" на трансформаторі

Дана форма напруги називається "модифікована синусоїда" і широко застосовується в інверторах для мережі 50Гц. Взагалі параметри, що задають форму модифікованої синусоїди, це амплітуда вихідної напруги і коефіцієнт заповнення, що показує відношення тривалості імпульсу до періоду сигналу. Ці параметри задаються при конструюванні інверторів. З тих міркувань, що інвертор повинен замінювати мережу 220В/50Гц, зазвичай вибирається амплітудне значення напруги модифікованої синусоїди таке ж, як і в мережі, тобто 311В. При цьому, аби забезпечити ефективну напругу 220В, таку ж як і в мережі, коефіцієнт заповнення виходить 0.5. Проте в інверторі цього типу амплітуда вихідної напруги виходить залежною прямопропорційно від напруги джерела. Якщо як джерело енергії використовується акумулятор, а це найпоширеніший випадок, то його напруга при розряджанні знижується, і амплітуда модифікованої синусоїди на виході перетворювача також знижується, відповідно знижується і ефективне значення напруги на виході перетворювача. Для того, щоб поліпшити якість енергії на виході перетворювача в цих умовах часто застосовують схеми керування, які змінюють коефіцієнт заповнення вихідної напруги так, щоб підтримувати ефективну напругу незмінною.

На рисунку 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, що буде показано далі.

**Програмне забезпечення.** Фрагмент програмного коду, який відповідає за роботу згідно наведеного вище алгоритму:

```
digitalWrite(N,HIGH);  
delayMicroseconds(k);  
digitalWrite(N,LOW);  
delayMicroseconds(k);  
digitalWrite(M,HIGH);  
delayMicroseconds(k);
```

```
digitalWrite(M, LOW);
//----
#define N 11
#define M 12
int h=5000;
int k=5000;
//----
```

Даний елемент коду забезпечує генерування прямокутних імпульсів напруги, що мають затримку від 5000 до 1250 наносекунд. Генерація імпульсів здійснюється на виводах МК 11 та 12. Затримка між імпульсами обов'язкова, оскільки необхідно дати часовий інтервал для завершення перехідних процесів транзисторів. Можна також змінити скважність імпульсів, що допоможе знімати більшу потужність із вихідного трансформатора, але це потягне за собою в довгостроковій перспективі такі негативні наслідки, як перегрів транзисторів та зміну форми вихідного сигналу.

Для зміни частоти було використано потенціометр номіналом 20кОм, який підключений на вхід МК АЦП 0.

Реалізація АЦП із значенням від 0 -1023 здійснюється наступним фрагментом програмного коду:

```
k = map(analogRead(0), 0, 1023, 5000, 1250);
```

Функція map виконує провідну роль, адже саме вона перетворює дані (маппінг) діапазону 0-1023 на діапазон значень 5000-1250.

Для відображення даних був використаний дворядковий LCD монітор розміром 16x2 на базі контролера HD44780.

```
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("Hz=");
lcd.setCursor(3, 0);
lcd.print(Hz);
int v = (analogRead(1)/1023.0) * 20;
delayMicroseconds(k);
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("v=");
lcd.setCursor(2, 1);
lcd.print(v);
```

Для роботи з цим монітором було використано стандартну бібліотеку LiquidCrystal. Дисплей підключений до ніжок МК 4,5,6,7,8,9,10. На ньому інтерактивно відображається поточна частота в герцах та стан заряду акумулятора у відсотках.

Для отримання даних про стан заряду використано аналоговий вхід АЦП 1. Для роботи АЦП із підвищеною напругою акумулятора було використано резистивний поділювач напруги. Наступний фрагмент коду показує перетворення отриманих даних у вольти і у відсотки рівня заряду акумулятора:

```
int v = (analogRead(1)/1023.0) * 20;
```

Керуючий мікроконтролер працює на частоті 16 Мегагерц із зовнішнім кварцовим резонатором, що дозволяє отримати прийнятний рівень точності генерації імпульсів.

**Прототип та моделювання системи.** Даний перетворювач напруги побудований на основі мікроконтролера ATmega328P, який запрограмований на частоту 50Гц на мові програмування Arduino.

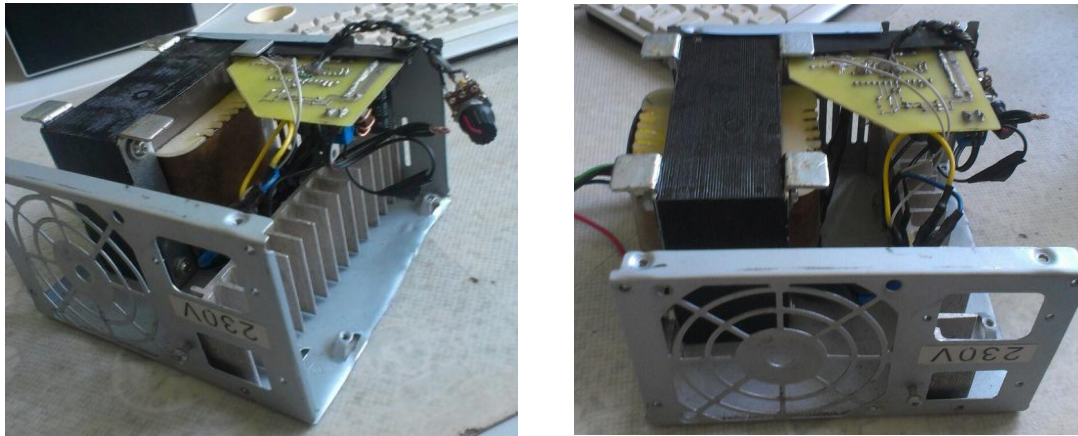


Рис. 3. Зовнішній вигляд прототипу перетворювача напруги

Даний інвертор є низькочастотним. Вимірний коефіцієнт корисної дії прототипу цього пристрою досягає 75%. Оскільки використовується трансформатор максимальною потужністю 350Вт, то існує можливість отримати більшу потужність за рахунок збільшення частоти та зниження загального ККД.

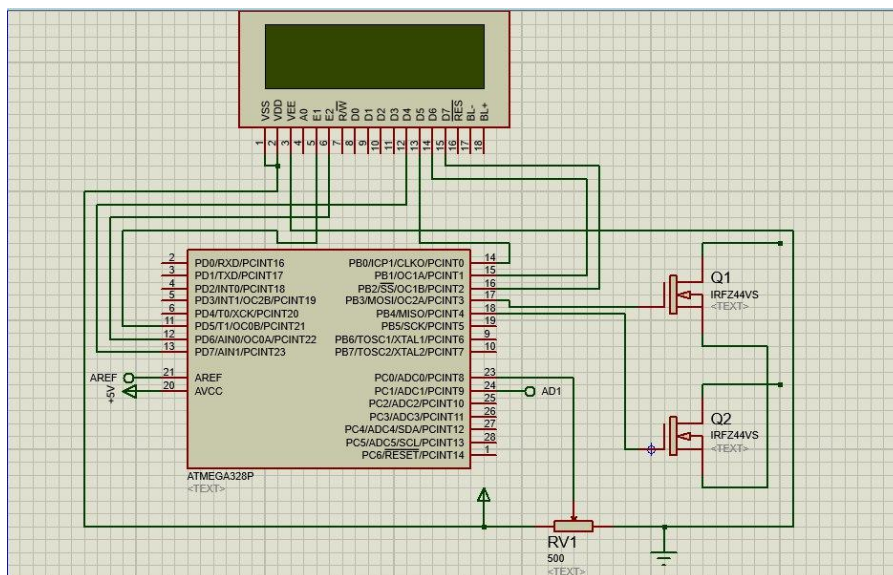


Рис. 4. Структурна схема перетворювача у програмі Proteus

В системі живлення електронної частини інвертора використано стабілізатор LM7805 та низькочастотний фільтр на базі котушки індуктивності і конденсатора великої ємності, які частково зменшують вплив змінної напруги, яка протікає у контурі трансформатора, на електронну частину. Під час роботи перетворювача напруги відбувається значне тепловиділення від польових транзисторів, тому було встановлено вентилятор із автоматичним регулюванням по температурі. При досягненні температури 60°C включається вентилятор для охолодження пристрою. При зниженні температури до 40 °C вентилятор вимикається. Захистом від перегріву служить термореле. Коли температура сягає більше 100 °C автоматично вимикається живлення мікроконтролера і припиняється робота приладу. Також встановлено захисний діод від переполусування.

Для зняття необхідної інформації та моніторингу інвертора використано давач струму, вольтметр, термодавач та LCD монітор який виводить всю необхідну інформацію. Також є RGB-діод, який інформує відповідним кольором про режим роботи перетворювача. Зелений колір – нормальний режим, червоний – перенавантаження.

**Особливості експлуатації приладу.** Даний пристрій здебільшого використовується в польових умовах, там де немає доступу до мережі 220 В. Він містить вбудований потенціометр, який запрограмований на зміну частоти пристрою. Слід зазначити, що не всі пристрої можна підключати до мережі з частотою більшою ніж 60 Гц. Зокрема це стосується таких пристроїв як двигуни. Швидкість обертів збільшиться і вони вийдуть з штатного режиму роботи. Але в переважній більшості електронні пристрої легко працюють на більшій частоті. При збільшенні частоти збільшується потужність пристрою, але тим самим значно навантажуються польові транзистори. Оскільки в розробленому пристрої є індикатор рівня заряду акумулятора, це дозволяє моніторити його стан. Коли рівень заряду нижчий за 11,5 В, припиняється генерація імпульсів.

#### Висновки

Результатом проведеної роботи є пристрій інвертор DC-AC на базі мікроконтролера ATmega328p, силового низькочастотного трансформатора та силових ключів. Було розроблена структурна схема пристрою, визначені технічні вимоги. Також в процесі налагодження та експлуатації було досягнуто відповідних технічних показників, які задовольняють вимоги технічного завдання, усунуто виявлені недоліки. Рівень якості виробу відповідає загальноприйнятим стандартам.

До переваг розробленого пристрою можна віднести:

- простоту схеми та доступність складових електронних компонентів;
- можливість змінювати частоту;
- коефіцієнт корисної дії досягає 80%;
- моніторинг частоти і заряду акумулятора;
- керування польовими транзисторами без спеціалізованого драйвера.

Недоліки:

- досить значні для даного класу пристроїв масо-габаритні показники, зумовлені наявністю низькочастотного трансформатора;
- порівняно з імпульсними перетворювачами напруги менша потужність;
- висока ціна трансформатора.

Можливим є подальше удосконалення пристрою, наприклад, дозволити змінювати частоту в залежності від навантаження. Існує можливість додатково підключати різні давачі для побудови чистої синусоїди за допомогою ШІМ модуляції і електролітичних конденсаторів низької ємності на затворах польових транзисторів. Подальші модифікації пристрою дозволять підвищити експлуатаційні характеристики пристрою.

1. Крогерис А., Рашевіц К., Рутманіс Л. и др. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии / Под ред. А. Крогериса. Рига: Зинатне. 1969.
2. Ирвинг М., Готтлиб. Источники питания. Инверторы, конвертеры, 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 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.radiosvoboda.org/content/article/26936954.html>.
5. Схема преобразователя 12\220 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <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. <http://www.xantrex.com/power-products/power-inverters/overview.aspx>
9. <https://www.cyberpowersystems.com/support/knowledge-center/general-literature>
10. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX1739-MAX1839.pdf>