

## ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА И АЛГОРИТМ РАБОТЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

<https://doi.org/10.5281/zenodo.20464271>

**Б.Э.Эгамбердиев, Х.Х.Мамиров**

*Институт военной авиации Республики Узбекистан*

*e-mail: bahrom\_prof@mail.ru*

### **Аннотация**

В данной статье рассматривается один из этапов при разработке энергоэффективных принципиальных схем автономного инвертора и алгоритм инверторных схем. Разработаны алгоритм работы и принципиальные схемы инвертора а также анализируются решения проблемы, возникающей при разработке энергоэффективных принципиальных схем и основные режимы работы автономного инвертора напряжения на основе новых источников.

### **Ключевые слова**

инвертор, IGBT транзистор, пульсирующее напряжение, напряжение выпрямителя, фильтр, датчик

### **Abstract**

This article examines one of the stages in developing energy-efficient principal circuits of an autonomous inverter and the algorithm of inverter circuits. The operating algorithm and principal circuits of the inverter have been developed, and solutions to the problem arising from the development of energy-efficient principal circuits and the main operating modes of an autonomous voltage inverter based on new sources have been analyzed.

### **Keywords**

inverter, IGBT transistor, pulsating voltage, rectifier voltage, filter, sensor.

### **Введение**

Энергоэффективность и энергосбережение, являясь приоритетными направлениями развития науки, технологии и техники, были включены в Энергетическую стратегию Узбекистане на период до 2030 года, что подчеркивает важность этого направления для модернизации и технологического развития Узбекисканской экономики, повышения ее конкурентоспособности. Современные процессы производства, передачи и потребления электрической энергии, без которых невозможна современная экономика, требуют многократного ее преобразования, для которого используются мощные полупроводниковые автономные инверторы, от эффективности и надежности функционирования которых зависит эффективность и надежность функционирования всех потребителей

электроэнергии. Наиболее важным этапом проектирования инвертора является выбор топологии и метода модуляции, которые обеспечат наилучшие технико-экономические показатели проектируемого устройства. Наличие критериев и процедур выбора на данном этапе снижает вероятность ошибок и сокращает время проектирования полупроводникового прибора. Таким образом, задача обеспечения обоснованности проектных решений и формирование критериев выбора является актуальной. К настоящему моменту в области силовой электроники накоплен большой объем материалов, посвященных вопросам разработки новых и улучшения существующих схемотехнических решений с целью повышения эффективности применения автономных инверторов напряжения. В то же время вопрос сравнения принципиально разных схем и алгоритмов модуляции остается открытым.

### **Методы исследования**

Известен способ изготовления инвертора, в частности к преобразователям электрической энергии напряжения постоянного тока в напряжение переменного тока (инверторам), и могут быть использованы изменения в автономных источниках электропитания для обеспечения выходного переменного напряжения, либо его по заданному закону [1-4].

Задачей работы является уменьшение себестоимости, суммарных габаритных размеров трансформатора. При увеличении мощности габарит трансформатора тоже увеличиться. Поэтому в данной работе увеличили количества транзисторов, чтобы увеличить ток на выходе. Источником электроэнергии автономного инвертора напряжения является солнечная панель (батарея) с номинальным напряжением постоянного тока 48 В. В качестве резервного источника электроэнергии применяется аккумуляторная батарея. Солнечная панель и аккумуляторная панель подключаются к инвертору через контроллер заряда, позволяющий распределять их ресурс в зависимости от текущего режима работы (Рис.1).

Повышение коэффициента полезного действия автономного инвертора напряжения достигается за счет увеличения выходного тока до максимального значения при неизменном выходном напряжении. Для этого были использованы восемь IGBT полевых транзисторов на двух силовых каскадах. Максимальный выходной ток выбранного транзистора составляет 40 А, а напряжение 600 В. При параллельном подключении транзисторов выходной ток увеличивается [5-6].

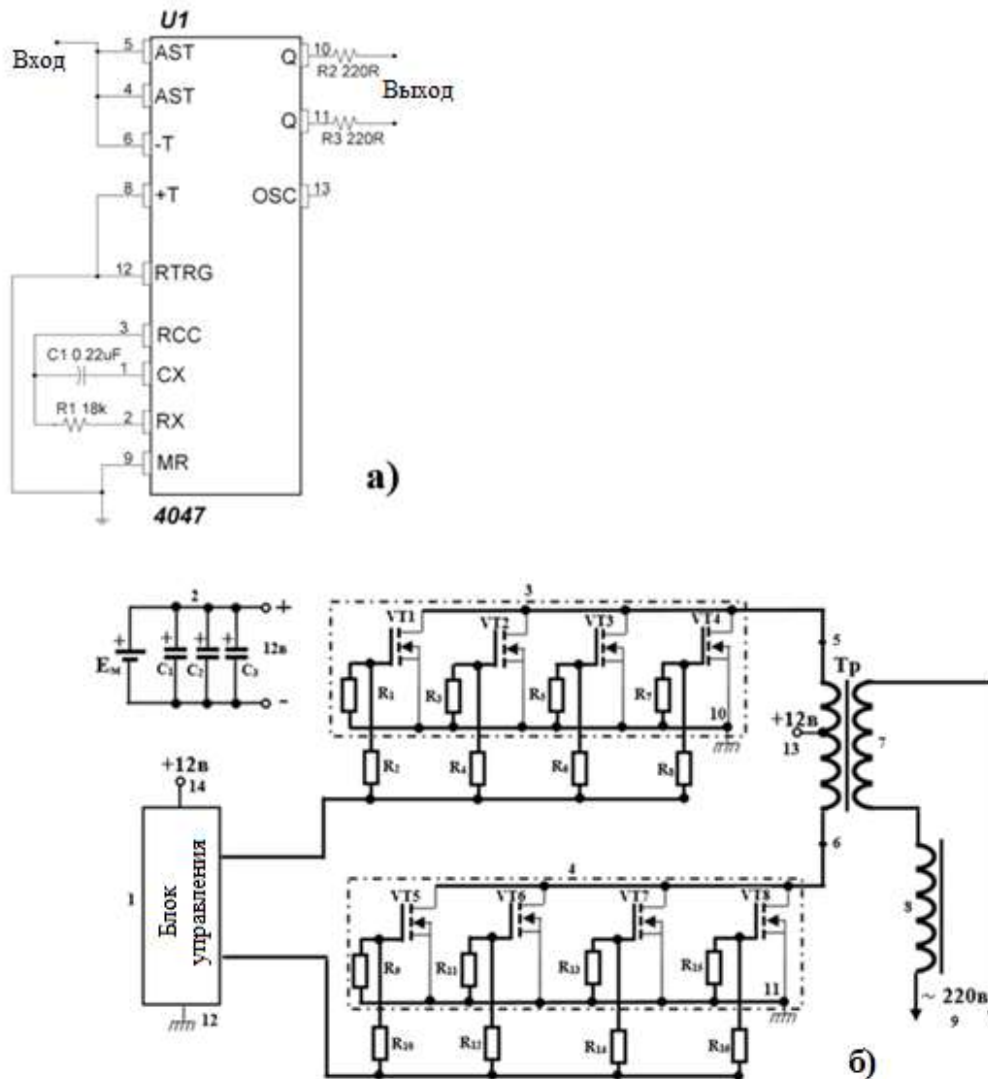


Рис.1. – Принципиальная схема автономного инвертора.

а- принципиальная схема блока управления, б-принципиальная схема инвертора.

### Результаты и обсуждение

Постоянное напряжение от солнечных панелей или аккумуляторной батареи подключается к конденсаторам  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , выполняя две функции: входной фильтр, который обеспечивает требуемое качество напряжения постоянного тока и гасит колебания напряжения во время коммутации полевых транзисторов в схеме напряжения инвертора. Постоянное напряжение, создаваемое панелями, преобразуется в переменное напряжение через инверторные схемы напряжения, состоящие из восьми полевых транзисторов (рис.1).

Инвертор подключен к выходной цепи через вторичные катушки трансформатора через фильтры  $\Phi$  в выходной цепи. Трансформатор индуцирует однофазное синусоидальное напряжение во вторичных выходных катушках. На выходе инвертора к потребителям подключается синусоидальное напряжение 220 В (рис.1). Для контроля качества выходного

напряжения использовался микроконтроллер CD4047 (рис.1) в блоке управления. Микроконтроллер управляет полевыми транзисторами VT1-VT8 инвертора в двух силовых каскадах с помощью высокочастотных ШИМ-сигналов.

Принципиальная схема автономного инвертора состоит из следующих компонентов. Е<sub>м</sub>-аккумуляторная батарея, 2-конденсаторный фильтр, 1-блок управления, 3 и 4-силовой каскад. Каждый каскад состоит из четырёх транзисторов. Блок управления 1 управляет режимами работы восьми транзисторов IGBT40N60N в силовом каскаде 3 и 4, то есть управляет открытием и закрытием состояние. Транзисторы должны открываться и закрываться в течение 20 мс, чтобы импульсные сигналы широкой импульсной модуляции (ШИМ), выходящие из блока управления 1, генерировали частоту 50 Гц на выходе. Для этого время  $t_{имп}$  выходящее из модулятора, управляет транзисторами. Поскольку на выходе транзисторов образуется переменный импульс, в точках 5 и 6 первичной обмотки трансформатора через переменный импульс возникает самоиндукция.

На второй обмотке трансформатора 7 возникает переменное напряжение 50 Гц. Управляющий импульс подается на затвор транзисторов VT1, VT2, VT3, VT4 в каскаде 3 через постоянные сопротивления R<sub>2</sub>, R<sub>4</sub>, R<sub>6</sub>, R<sub>8</sub> с номиналом 10 Ом. Функция постоянных сопротивлений R<sub>1</sub>, R<sub>3</sub>, R<sub>5</sub>, R<sub>7</sub> в 1 кОм используется для замыкания транзистора. На участок 10 силовом каскаде 3 подается отрицательное напряжение -12 В. Время открывание и закрывание транзисторов контролируется микроконтроллером CD4047 в блоке управления 1.

Управляющий импульс подается на затвор транзисторов VT5, VT6, VT7, VT8 в 4 каскадах через постоянные сопротивления R<sub>10</sub>, R<sub>12</sub>, R<sub>14</sub>, R<sub>16</sub> с номиналом 10 Ом. Функция постоянных сопротивлений R<sub>9</sub>, R<sub>11</sub>, R<sub>13</sub>, R<sub>15</sub> в 1 кОм используется для замыкания транзистора. На участок 11 силовом каскаде 3 подается отрицательное напряжение -12 В. Время открывание и закрывание транзисторов контролируется микроконтроллером CD4047 в блоке управления 1. Последовательное открывание и закрывание каскадов 3 и 4 силовом каскаде создает переменное напряжение 220 В, индуцированное в обмотке 7 трансформатора Тр. Фильтр дросселя 8, подключенный последовательно к выходному напряжению трансформатора 7, изменяет форму напряжения 220 В на выходе в соответствии с законам синуса, то есть генерирует 220 В с синусоидальной переменной частотой 50 Гц на нагрузке.

Таким образом, разработанный в результате исследовательской работы преобразователь (инвертор) постоянного напряжения в переменное имеет следующие преимущества: упрощенная конструкция; малые массогабаритные показатели для удобства транспортировки; стабильность выходных частот; компактность и низкая стоимость, что позволяет расширить арсенал подобных устройств. На выходе преобразователя получены

напряжение синусоидальной формы. Изменение мощности на выходе устройства зависит от частоты, выходного напряжения и силы выходного тока. При изменении любого из этих показателей мощность уменьшается. Основная цель - обеспечить стабильность этих показателей в устройстве.

Поскольку два напряжения на выходах блока управления подключены к каскадным транзисторам через отдельные выходы, это обеспечивает высокую точность характеристик управления и качество управления. Транзисторы в силовом каскаде защищены от обратного напряжения, возникающего во втором полупериоде обмотки трансформатора, через внутреннее сопротивление сток-исток по переменному току.

Для повышения эффективности работы автономного инвертора при различных нагрузках выходные импульсы блока управления контролируют режимы работы транзисторов. Например, при обеспечении стабильного (постоянного) сопротивления нагрузки на выходе можно регулировать выходное напряжение пропорционально частоте (режим 1).

$$\frac{U}{f} = const. \quad (1)$$

При подключении к источнику электропривода с высокой мощности напряжение на выходе инвертора можно регулировать пропорционально квадрату частоты (режим 2).

$$\frac{U}{f^2} = const. \quad (2)$$

Если мощность нагрузки обратно пропорциональна скорости, напряжение на выходе инвертора можно регулировать пропорционально квадратному корню частоты (режим 3).

$$\frac{U}{\sqrt{f}} = const. \quad (3)$$

Режим работы автономного инвертора управляется алгоритмом микроконтроллера в блоке управления, и в то же время параметры выходного напряжения могут регулироваться через выходные импульсы ШИМ (рис.2).

В принципиальной электрической схеме (Рис.1) процессы работы транзисторов в силовом каскаде являются основными показателями, определяющими переходные процессы [7-10]. Максимальное значение выходного тока зависит от времени открывание транзистора, и если транзистор не открывается полностью, выходной ток будет иметь минимальное значение. Поэтому напряжение размыкания транзисторов регулируется блоком управления. При этом микроконтроллер постоянно контролирует выходное напряжение инвертора и изменяет значения управляющих импульсов ШИМ таким образом, чтобы напряжение на выходе инвертора не отклонялось от заданного значения.

Если выходное напряжение инвертора изменяется от номинального значения до минимального, контроллер в блоке управления подключает устройство к аккумуляторной батарее [11-12]. Полевые транзисторы в схеме силового каскада стабилизируют выходную мощность путем усиления силы

тока. Кроме того, в схеме уделено внимание стабильности выходного напряжения. Напряжение потребления блока управления 12 В постоянное напряжение.

В силовом каскаде использованы восемь IGBT 40N60N транзисторов (рис. 1.б). Номинальный ток транзисторов составляет 40 А, а напряжение 600 В. В результате параллельного подключения напряжение на выходе каскада напряжения составляет 600 В, а максимальное значение силы тока равно 160 А. Для открывания транзисторов первого каскада через резисторы  $R_2, R_4, R_6, R_8$  импульс от блока управления подается на затвор транзистора. Транзисторы закрываются через резисторы  $R_1, R_3, R_5, R_7$ . Время открывания и закрывания транзисторов должно составлять 20 мс. Этот процесс управляется импульсными сигналами блока управления. Для открывания транзисторов во втором каскаде через резисторы  $R_{10}, R_{12}, R_{14}, R_{16}$  от блока управления к затвору транзистора подается импульс. Транзисторы закрываются через резисторы  $R_9, R_{11}, R_{13}, R_{15}$ . Потребляемая ток блока управления не превышает 0,1 А. Причина низкого потребления тока схемой заключается в том, что потребляемая мощность низкая, и она практически не влияет на общий КПД инвертора.

Выходные параметры транзистора соответствуют аварийным ситуациям или различным режимам работы инвертора при напряжении автономного инвертора. Поскольку транзисторы напряжения работают в ключевом режиме VT1-VT8 и имеют очень малое сопротивление в открытом состоянии, очень низкое энергопотребление, инвертор обладает высокой эффективностью при любом режиме работы. Использование микроконтроллера создает возможности плавного управления характеристиками инвертора и высокие эксплуатационные характеристики. Разработан алгоритм для разработки программы микропроцессора, управляющего режимом работы инвертора напряжения, который представлен на рис. 2.

На рис.2 приведены элементы функций и их выходные параметры, которые объясняются с помощью принципа работы системы управления, приведенного на рис. 1. Датчики напряжения ДН1 и ДН2 в алгоритме инвертора определяют время открывание и закрывание транзисторов VT1-VT4, VT5-VT8 в зависимости от отклонения напряжения от заданного значения  $\Delta u$ .



выходным параметрам. Установлено, что при изменении входного напряжения от 12 В до 48 В коэффициент полезного действия инвертора при напряжении 48 В на 4-6% выше, чем при других напряжениях.

Разработаны алгоритм работы и принципиальные схемы блока управления. На основе разработанного алгоритма стабильность частоты и напряжения на выходе трансформатора, а также синусоидальное напряжение были получены путем регулирования времени  $t_{п}$  пауз и  $t_{д}$  длительности выходного импульса микроконтроллера.

На основе анализа энергетических характеристик принципиальной схемы автономного инвертора с помощью программы имитации компьютерной модели и результатов расчетов аналитическими методами установлено, что степень точности результатов сравнения не превышает  $\pm 3\%$ .

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Ivanov S.A. Frequency converters and electric drive control systems. Moscow: Energoatomizdat; 2018. 320 p.
2. Rashid M.H. *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. 4th ed. Pearson; 2013. 912 p.
3. Modern methods and technologies of frequency converters // *Vestnik of Chuvash University*. 2019;3:95-105.
4. Texas Instruments. *Datasheet: TCA785 Phase Control IC*. Available from: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tca785.pdf>
5. Мамиров Х. Х., Эгамбердиев Б. Э. Development Of An Autonomous 3 KW Inverter For Solar And Wind Mini Power Plants// *Texas journal of Engineering and Technology*// ISSN: 2770-4491, Vol 6, Issue 4, 2025. С. 1-6
6. Мамиров Х. Х. "Разработка конструкции солнечных инверторов", O'R HX va MU HAI OAK tasarufidagi SAMO QALQONLARI ilmiy-uslubiy jurnali. 16 (4) 2025-yil. 285-289 betlar
7. Халилов Ф. Х. Переходные процессы в энергетических системах / Ф. Х. Халилов. - СПб.: НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2013. - 80 с.
8. Melnikov A.P, Smirnov I.V. Pulse-width modulation and inverter control. Moscow: Radio i svyaz; 2016. 210 p.
9. Kuznetsov I.N. Frequency converters in marine power systems. St. Petersburg: Sudostroenie; 2015. 270 p.
10. Bobrov V.G, Kuzmichev D.S. Modeling control systems for electric drives in Proteus. *Electrotechnics and Electronics*. 2021;56(4):34-40.
11. Senator V.E, Rudenko A.V. Thyristor frequency converters: theory and application. Moscow: Energiya; 2014. 300 p.
12. Буре И. Г., Буре А. Б., Хевсуриани И. М., Нурмеева Д. Р. Оптимизация параметров пассивных элементов силовых гибридных

фильтров. Практическая силовая электроника №43/ И. Г. Буре., А. Б. Буре., И. М. Хевсуриани., Д. Р. Нурмеева. 2011. - 10-13с.

13. Ей Вин, Виссарионов В. И. Оптимизация параметров системы энергоснабжения с использованием солнечной энергии для автономного потребителя в Мьянме/ Ей Вин В. И. Виссарионов. - М.: Издательский дом МЭИ/Вестник МЭИ. 2012, No 5, 42÷49 с.

14. Эгамбердиев Б. Э., Мамиров Х. Х., О. Т. Холов., А. А. Акбаров., Н. М. Рахимова. **Патент** “Автономный инвертор” Министерство юстиции Республики Узбекистан **IAP 8396** 2026г.