

УДК 621.314.1:621.314.26

Э.А.Бекиров, докт.техн.наук (Национальная академия природоохранного и курортного строительства, Симферополь)

Разработка метода и устройства преобразования напряжения постоянного тока фотоэлектрических преобразователей в трехфазное синусоидальное напряжение

В работе рассматривается метод преобразования напряжения постоянного тока фотоэлектрических модулей солнечных батарей в трехфазное напряжение. Предложено устройство для реализации этого метода с подключением к питающей сети и синхронизацией выходных напряжений с трехфазным напряжением сети по частоте и по фазе.

У роботі розглядається метод перетворення напруги постійного струму фотоелектричних модулів сонячних батарей у трифазну напругу. Запропоновано пристрій для реалізації даного методу з підключенням до мережі живлення та синхронізацією вихідної напруги з трифазною напругою мережі за частотою та фазою.

Тенденции широкомасштабного использования нетрадиционных возобновляемых источников энергии, особенно солнечных фотоэлектрических преобразователей, приводит к необходимости разработки методов и устройств преобразования постоянного напряжения в переменное однофазное и трехфазное синусоидальное напряжение.

Автономные источники электропитания на базе солнечных фотоэлектрических преобразователей в настоящее время являются наиболее перспективными в плане электроснабжения как индивидуальных потребителей, так и при генерировании электрической энергии в питающую элек-

трическую систему. Сущность предлагаемого метода заключается в стабилизации постоянного напряжения фотоэлектрических преобразователей, преобразование этого напряжения в прямоугольные импульсы, умножение по частоте и через распределитель фаз, подача прямоугольных импульсов на три инвертора, выходы которых подключены к трем усилителям мощности, и подключение этих усилителей мощности к трем фазам питающей системы.

Блок-схема предлагаемого устройства, реализующего предложенный метод, представлена на рис. 1.

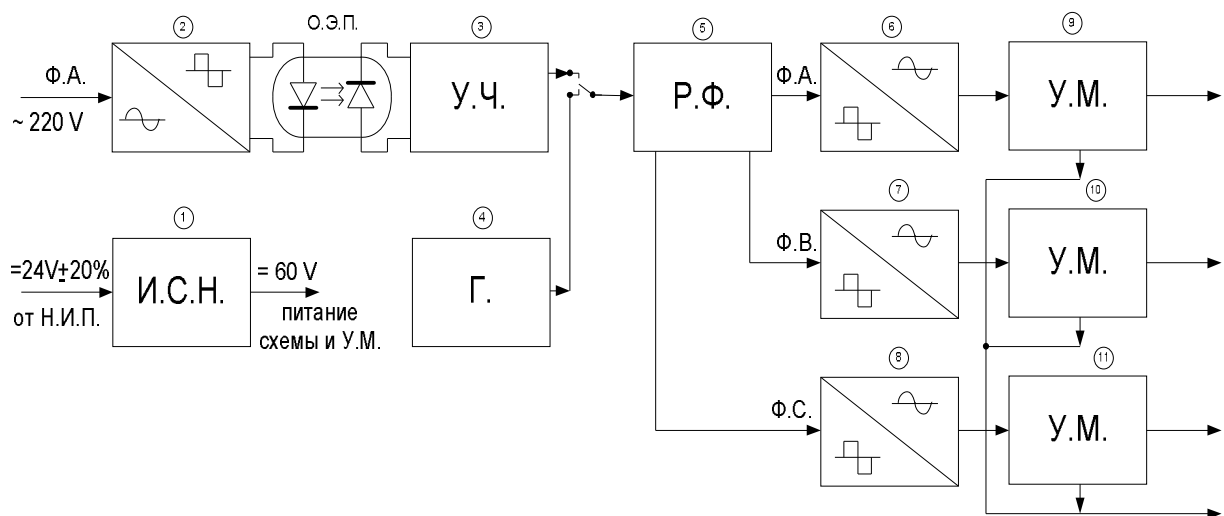


Рис. 1. Блок-схема преобразователя постоянного напряжения НИЭ в трехфазное синусоидальное напряжение.

Напряжение постоянного тока от нетрадиционного источника энергии (НИЭ) поступает на импульсный стабилизатор напряжения (ИСН) [1] – блок 1. ИСН преобразовывает нестабильное напряжение нетрадиционного источника питания в стабильное напряжение постоянного тока. Мощность источника зависит от применяемых силовых ключей и мощности нетрадиционного источника питания. С выхода ИСН стабилизированное напряжение поступает на умножитель частоты и на питание схемы управления, на все блоки и устройства.

Напряжение одной из фаз, например, фазы А, поступает на блок 2 – узел формирования напряжения прямоугольной формы [2]. Это напряжение поступает на ОЭП – оптоэлектронную пару "светодиод – фотодиод", служащую гальванической развязкой между сетевым напряжением и источником питания схемы преобразователя соответственно и входом прибора. Фотодиод ОЭП подключен к умножителю частоты (УЧ), блок 3. Умножитель частоты служит для умножения в шесть раз частоты сетевого напряжения. Блок 3 через переключатель подключается к распределителю по фазам – блок 5, то есть, получение из умноженной частоты фазы А других фаз, фазы В, фазы С или трехфазного напряжения. При наличии фазового сдвига воспользуемся методом преобразо-

вания фазового сдвига во временной интервал между импульсами, сущность которого заключается в преобразовании напряжений, соответствующих моментам переходов этих напряжений через нуль от отрицательных к положительным значениям, и последующем измерении относительной длительности по отношению к периоду временных интервалов между передними фронтами этих импульсов, которые пропорциональны фазовому сдвигу:

$$\varphi = \omega \cdot \Delta t = (2\pi/T) \cdot \Delta t; \quad \varphi = 360^\circ \cdot \Delta t / T, \text{ который не превышает } 1^\circ.$$

В предлагаемом устройстве предусмотрен генератор – блок 4. Это внутренний генератор частотой 300 Гц для работы в режиме отсутствия напряжения сети.

Выходы распределителя по фазам подключены к блокам 6, 7, 8 – преобразователи напряжения прямоугольной формы в напряжение синусоидальной формы [3] фазы А, фазы В, фазы С соответственно. Выходы блоков 6, 7, 8 подключены к блокам 9, 10, 11 – усилители мощности каждой фазы соответственно. Принципиальные схемы блоков приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 приведены принципиальные схемы блоков 2, 3, 4, 5. На рис. 3 приведены принципиальные схемы блоков 6, 7, 8 и 9, 10, 11.

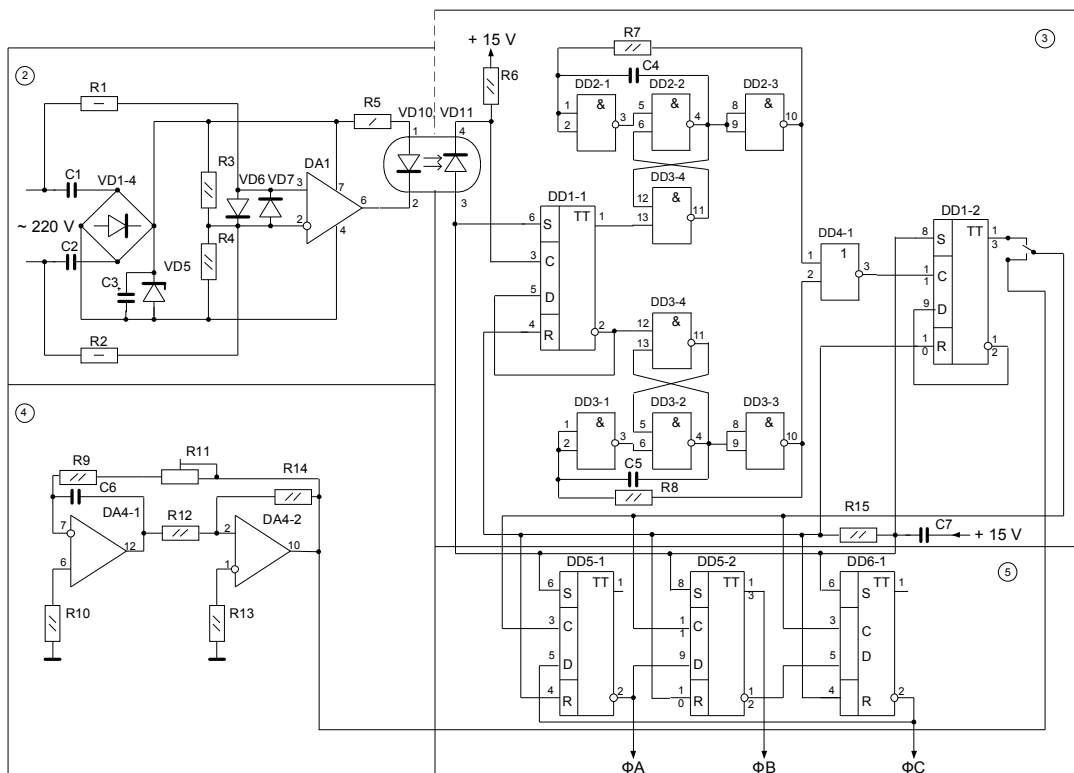


Рис. 2. Принципиальная схема блоков 2, 3, 4, 5.

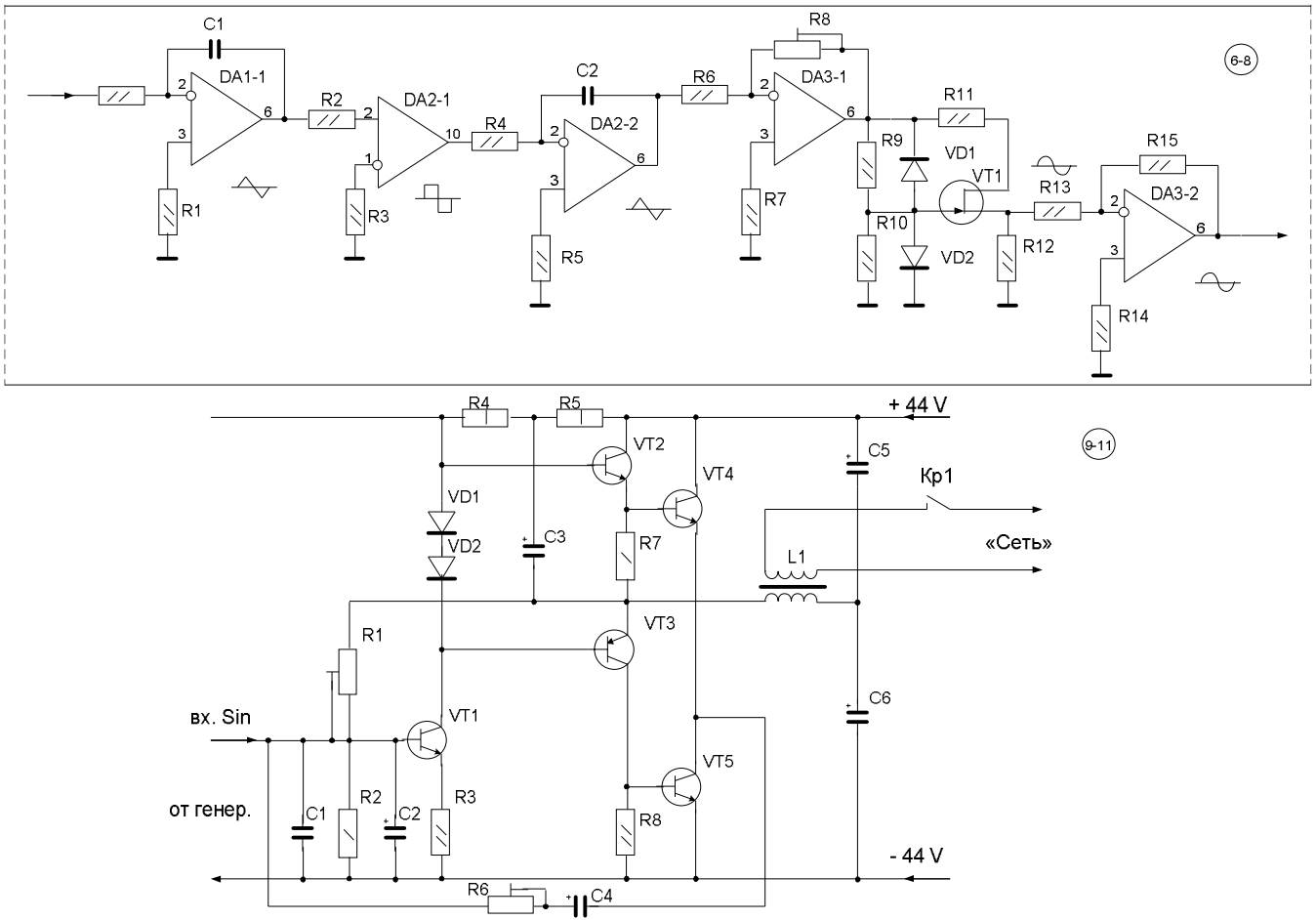


Рис. 3. Принципиальная схема блоков 6, 7, 8 и 9, 10, 11.

Устройство формирования прямоугольных импульсов (блок 1) выполнено по бестрансформаторной схеме с оптоэлектронной развязкой. Умножитель частоты (блок 3) умножает частоту сети в 6 раз для нормальной работы распределителя фаз (блок 6), который собран по схеме регистра сдвига – DD5-1, DD5-2, DD6-1. Умножитель частоты собран на элементах DD2-1, DD2, DD3, DD4-1, DD1-2. На элементах DD2-1, DD2-2, DD2-3, DD2-4 собран заторможенный мультивибратор, то есть, количество периодов укладывается целое число раз в отрицательной полуволне прямоугольного напряжения выхода DD1-1 и, соответственно, количество периодов укладывается целое число раз в положительной полуволне прямоугольного напряжения, обеспечивающего за-

торможенным мультивибратором на элементах DD3-1, DD3-2, DD3-3, DD3-4. Ввиду того, что у данного мультивибратора скважность не равна 2, выход первого и второго мультивибраторов складывается на DD4-1 ("ИЛИ"), затем делится на 2, чтобы скважность была равна 2, и поступает на распределитель фаз, который собран по схеме регистра сдвига без начальной записи – DD5-1 DD5-2, DD6-1 (рис. 2). Цепь начальной установки распределителя фаз собрана на R15, C7. Генератор (блок 4) предназначен для полной автономной работы с источником НИЭ, генерирует импульсы для работы распределителя фаз при отсутствии питающей сети и вся система синхронизации работает от одной фазы. Работа преобразователя объясняется эпюрами напряжений.

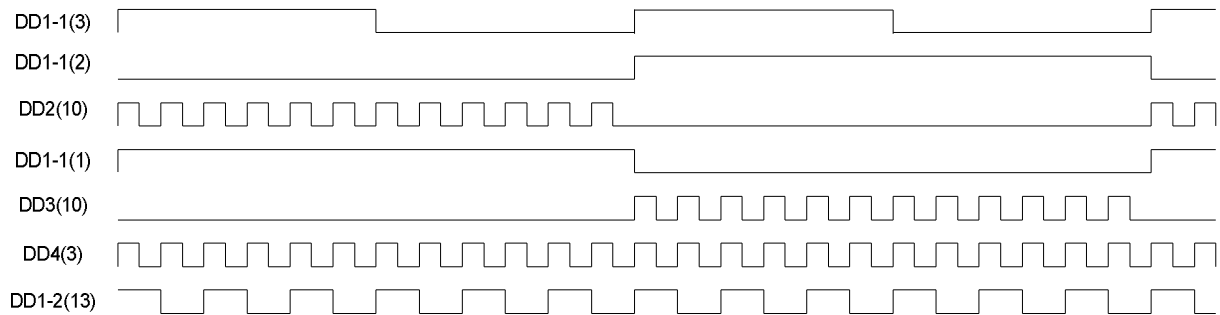


Рис. 4. Напряжения с элементов умножителя частот.

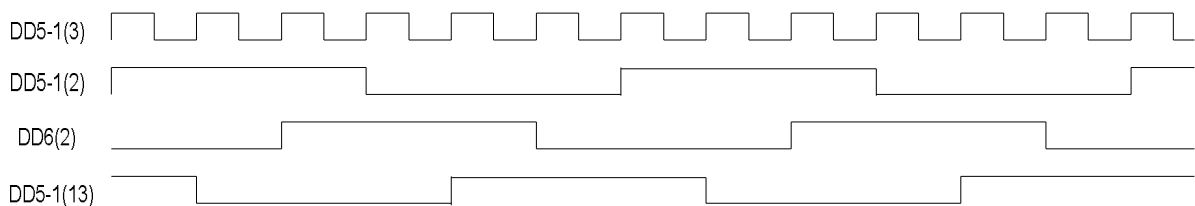


Рис. 5. Напряжения с элементов распределителя фаз.

Для получения синусоидального сигнала на выходе устройства выполним гармонический анализ функций, заданных дискретно. Проведем теоретическое обоснование. Допустим, имеется следующая задача теории приближения периодической функции с периодом T , заданной на промежутке $[0, T]$ в точках t_k ($k = 0, 1, \dots, T$). Требуется построить аналитическую зависимость $\tilde{f}(t)$ этой функции так, чтобы среднеквадратическая погрешность на точках t_k была минимальной:

$$\Delta = \frac{1}{T} \sum_{k=0}^N \left[f(t_k) - \tilde{f} \right]^2 (t_{k+1} - t_k) = \min .$$

Функцию $\tilde{f}(t)$ ищем в виде линейной комбинации гармонических периодических функций $C_k(t)$, составляющих ортогональную систему на точках t_k отрезка $[0, T]$, где t_k заданы с постоянным шагом

$$t_k = k \frac{T}{N} .$$

Такого рода представление функций называется гармоническим анализом, то есть представление $\tilde{f}(t)$ имеет вид ряда Фурье:

$$\tilde{f}(t) = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cos i \frac{2\pi}{T} t + B_1 \sin i \frac{2\pi}{T} t = \sum_{j=0}^{2n} a_j C_j(t)$$

как разложение по гармоническим функциям.

Здесь $\frac{2\pi}{T}$ – основная частота функции $\tilde{f}(t)$;

$j \frac{2\pi}{T}$ – кратные частоты; $\sqrt{A_j^2 + B_j^2}$ – амплитуда

колебаний по j -той гармонике; $\varphi_j = -\arctg \frac{B_j}{A_j}$ –

сдвиг фаз j -той гармоники.

Можно показать [1], что гармоники $C_j = (t)$ ортогональны на системе точек t_k :

$$\sum_{k=0}^N C_j(t_k) C_p(t_k) = \begin{cases} 0, & \text{если } j \neq p; \\ \delta_j(N), & \text{если } j = p; \end{cases} \quad (p=0, 1, \dots, 2n);$$

$$\delta_j(N) = \sum_{k=0}^N C_j^2(t_k) = \frac{N}{2}; \quad \delta_0(N) = N; \quad C_0(t) = 1 .$$

Этим свойством можно воспользоваться для определения неизвестных параметров приближения

a_j – коэффициентов Фурье функции $\tilde{f}(t)$, определяемых на основе метода наименьших квадратов, к которому сведена наша задача: найти параметры a_j , при которых ошибка приближения $\Delta(a_0, a_1, a_2 \dots a_{2n})$ имеет минимум:

$$\Delta(N, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N \left[f(t_k) - \sum_{j=0}^{2n} a_j C_j(t_k) \right]^2 ;$$

$$\Delta(N, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N f^2(t_k) - \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{2n} f(t_k) C_j(t_k) + \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{2n} a_j^2 \delta_j(N);$$

$$\Delta(N, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N f^2(t_k) - \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{2n} a_j^2 \delta_j(N) + \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{2n} a_j^2 \delta_j(N) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N f^2(t_k) - \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{2n} a_j^2 \delta_j(N).$$

Если применить равенство Парсеваля [2]:

$$\frac{1}{N} \sum_{k=0}^N f^2(t_k) = A_0^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N/2} A_i^2 + B_i^2,$$

то при $n = N/2$ ошибка приближения равна нулю, то есть происходит гармоническая интерполяция, когда значения обеих функций $f(t)$ и $\tilde{f}(t)$ в точках t_k совпадают. При $n < N/2$ ошибка существует.

Таким образом, построен алгоритм решения задачи приближения функции, заданной на равномерной сетке, гармоническим рядом Фурье, который решает задачи точно, когда число искомым параметров совпадает с числом точек разбиения. В этом варианте решения необходимо вычислить коэффициенты ряда Фурье по известным формулам и затем найти ошибку приближения как функцию двух чисел: n – число членов ряда Фурье; N – число точек в таблице значений функций $f(t)$.

Численную реализацию гармонического анализа дискретно заданных функций можно произвести следующим образом.

Гармонический анализ на равномерной сетке отрезка $[0, T]$ можно производить на отрезке $[0, 1]$, так как все искомые величины зависят от отношения $\frac{t_k}{T}$, что позволяет ввести новую переменную $x = \frac{t}{T}$, которая изменяется от нуля до единицы с шагом $h = \frac{1}{N}$, $x_k = \frac{k}{N}$. Таким образом, заданными величинами являются:

N – четное число заданных значений функции f_k ;

$N < N/2$ – число членов ряда Фурье, приближающего функцию;

$x_k = \frac{k}{N}$ – точки разбиения, где $k = 0, 1, \dots, N$;

$f(X_k) = f_k$ – значение дискретно заданной функции в точках X_k .

Необходимо вычислить:

1. Значение функций $C_j(X)$ по формулам:

$$C_0 = 1; C_j = \begin{cases} \sin\left(\frac{j+1}{2} 2\pi x\right), & \text{для } j = 1, 3, 5, \dots, 2n-1; \\ \cos\left(\frac{j}{2} 2\pi x\right), & \text{для } j = 2, 4, 6, \dots, 2n. \end{cases}$$

2. Величины:

$$\delta_j(N) = \begin{cases} \frac{N}{2}, & \text{для } j \geq 1; \\ N, & \text{для } j = 0. \end{cases}$$

3. Коэффициент ряда Фурье:

$$a_j = \frac{1}{\delta_j(N)} \sum_{j=2n+1}^N a_j^2 \delta_j, \quad (j = 0, \dots, 2n).$$

4. Ошибка приближения:

$$\Delta(N, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N f^2(t_k) - \sum_{j=0}^{2n} a_j^2 \delta_j,$$

или

$$\Delta(N, n) = \sum_{j=0}^{2n} a_j^2 \delta_j, \text{ так что } \Delta = 0 \text{ при } n = N/2.$$

Описанный алгоритм реализован на алгоритмическом языке *Turbo Pascal*.

Выводы. Предлагаемое устройство предназначено для преобразования постоянного напряжения нетрадиционных возобновляемых источников энергии в трехфазное синусоидальное напряжение и подключения этих напряжений в питающую сеть с синхронизацией по частоте и фазе с напряжениями сети. Предложен алгоритм решения задачи приближения функции, заданной на равномерной сетке, гармоническим рядом Фурье, который решает задачи точно, когда число искомым параметров совпадает с числом точек разбиения.

1. Патент Украины 64247А Импульсный стабилизатор напряжения. Бекиров Э.А., Н02 М 7/5395. Бюл. 2, 2004 г.
2. Патент Украины 61747А Формирователь сетевых импульсов напряжения. Бекиров Э.А. Н03 Д5/00 Бюл. 11, 2003 г.
3. Патент Украины 55943А Генератор синусоидального напряжения. Бекиров Э.А., Н03 В 5/00 Бюл. 4 2003 г.