

Многоступенчатый инвертор для преобразования энергии солнечных батарей

ИСЕМБЕРГЕНОВ Н.Т.

Рассматривается многоступенчатая схема инвертора для преобразования постоянного напряжения солнечных батарей в переменное промышленной частоты. Представлены рекомендации по оптимизации силовой части схемы, описана структура микропроцессорной системы управления ею, приведены результаты математического моделирования и исследования экспериментального образца установки.

Ключевые слова: солнечная батарея, многоступенчатый инвертор, синусоидальное напряжение, микропроцессорное управление

Известна [1] схема преобразования постоянного напряжения от последовательно и параллельно соединенных солнечных элементов (СЭ) в переменное напряжение с помощью инвертора, от которого питается нагрузка. Инвертор при этом должен обладать достаточно высокими энергетическими показателями (удельная мощность, КПД, коэффициент мощности и т.д.) и обеспечивать необходимое качество электроэнергии (синусоидальность формы кривой напряжения, стабильность частоты и напряжения). Для достижения качественных показателей электроэнергии необходимо после инвертора включать фильтр, рассчитываемый на низкие частоты. При увеличении мощности СЭ до десятков и сотен киловатт габариты фильтра существенно возрастают при этом потери мощности в нем также увеличиваются, что снижает КПД всей системы. Как показывает гармонический анализ кривой напряжения на выходе инвертора, высшие гармоники составляют в ней существенную долю. Эти гармоники и должны задерживаться фильтром, для исключения их попадания к потребителю, т.е. некоторая часть электроэнергии, получаемой от СЭ, не доходит до потребителя. Однако при этом фотоэлектрические преобразователи будут максимально использованы, что повышает стоимость всей системы преобразования.

Таким образом, существует потребность в высокоэффективных и энергосберегающих системах преобразования солнечной энергии в электроэнергию промышленной частоты и напряжения, обладающих более высокими, чем у рассмотренной схемы, технико-экономическими показателями, а также характеризующихся меньшими материальными и финансовыми затратами на их изготовление [2, 3].

A multistage inverter circuit is considered the use of which makes it possible to efficiently convert the d.c. voltage generated by solar batteries into a power-frequency a.c. voltage. Recommendations on optimizing the inverter's power circuit are given, the structure of its microprocessor control system is described, and results from mathematical simulation and study of an experimental model of the installation are presented.

Key words: solar battery, multistage inverter, sine-wave voltage, microprocessor control

Известны многоступенчатые преобразователи [4, 5], в которых формирование ступенчатого графика напряжения, аппроксимирующего синусоиду, осуществляется путем суммирования напряжений на секциях вторичных обмоток трансформаторов. Как правило, во всех указанных публикациях предлагается для повышения напряжения использовать трансформаторы. Таким образом, наша задача состояла в том, чтобы не использовать повышающий трансформатор при формировании «многоступенчатого» напряжения.

Предлагаемый в данной статье многоступенчатый преобразователь состоит из последовательно соединенных источников постоянного напряжения и многоступенчатого транзисторного инвертора, к выходу которого подключена общая нагрузка R_H (рис. 1). Преобразователь работает в режиме инвертора напряжения следующим образом.

Мостовая схема инвертора I , образованного транзисторами T_1-T_4 (рис. 1), подключена к первому источнику напряжения E_1 . В момент времени t_1 (рис. 2) открываются транзисторы T_1 и T_4 и постоянный ток от источника напряжения E_1 будет протекать через T_1 , нагрузку R_H и T_4 (направление постоянного тока через транзисторы и нагрузку показано штриховыми стрелками). Через некоторое время t_2 открывается транзистор T_6 и постоянный ток от второго источника постоянного напряжения E_2 будет протекать через T_1 , нагрузку R_H и T_6 , образуя вторую ступень напряжения на нагрузке. Для формирования ступенчатого графика напряжения на нагрузке в момент времени t_3 (рис. 2) открывается транзистор T_8 и постоянный ток от источника E_3 будет протекать через T_1 , нагрузку R_H и T_8 . Для подключения источника постоянного напряжения E_n в момент времени t_n открывается транзистор

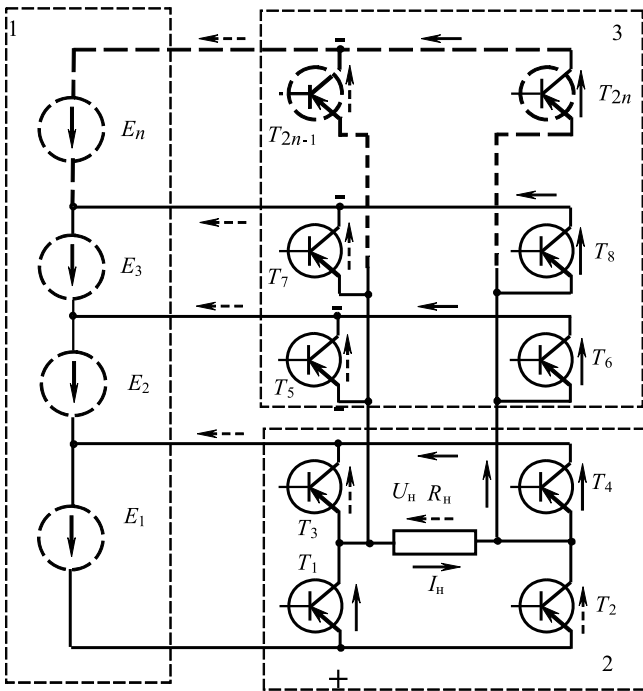


Рис. 1. Схема многоступенчатого инвертора при последовательном соединении источников постоянного напряжения

T_{2n} и постоянный ток будет протекать через T_1 , нагрузку R_H и T_{2n} .

Далее в момент времени t_{2n+1} закрывается транзистор T_{2n} , затем в момент $t_{2n+2} - T_8$, в момент времени $t_{2n+3} - T_6$ и в момент t_{2n+k} закрываются транзисторы T_4 и T_1 , где k – число интервалов времени для закрытия транзисторов. Таким образом происходит формирования положительного полупериода многоступенчатого графика напряжения на нагрузке.

Для формирования отрицательного полупериода многоступенчатого графика напряжения на нагрузке в момент времени $t_1 + T/2$ (рис. 2), где T – период напряжения, открываются транзисторы T_2 и T_3 и постоянный ток от E_1 будет протекать через транзисторы T_2 , T_3 и сопротивление нагрузки R_H в обратном направлении (на рис. 1 постоянный ток обратного направления показан штриховой стрелкой). Через время $t_2 + T/2$ открывается транзистор T_5 и постоянный ток от второго источника E_2 будет протекать через T_2 , нагрузку R_H и T_5 . В момент времени $t_3 + T/2$ открывается транзистор T_7 и постоянный ток от E_3 будет протекать через транзисторы T_2 и T_7 и нагрузку R_H . Источник постоянного напряжения E_n будет подключен в момент времени $t_n + T/2$ транзистором T_{2n} и постоянный ток будет протекать через транзисторы T_1 , T_{2n} и нагрузку R_H .

Далее в момент времени $t_{2n+1} + T/2$ закрывается транзистор T_{2n} , потом в момент времени $t_{2n+2} + T/2$ – транзистор T_7 , в момент времени $t_{2n+3} + T/2$

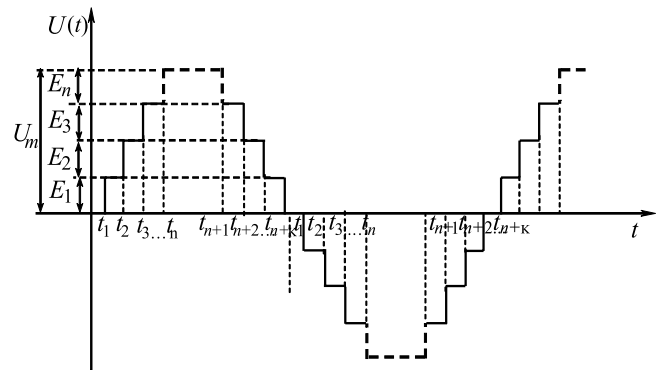


Рис. 2. Формирование ступенчатого графика напряжения на нагрузке

– транзистор T_5 и в момент времени $t_{2n+k} + T/2$ закрываются транзисторы T_2 и T_3 . Таким образом происходит формирование отрицательного полупериода многоступенчатого графика напряжения на нагрузке.

Напряжение на выходе транзисторного инвертора без учета падения напряжения на транзисторах будет равно напряжению на нагрузке:

$$U_H = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = \sum_{j=1}^n E_j. \quad (1)$$

Как видно из графика выходного напряжения (рис. 2) и из выражения (1), на нагрузке происходит суммирование всех ступенчатых графиков напряжения, причем форма кривой напряжения практически не будет отличаться от синусоиды. Таким образом, данный многоступенчатый транзисторный инвертор работает в режиме инвертора напряжения.

При параллельном включении n источников постоянного напряжения (рис. 3) принцип работы многоступенчатого транзисторного инвертора такой же, как при последовательном их включении (рис. 1). В этом случае происходит суммирование токов в нагрузке и инвертор работает в режиме источника тока. Соответственно, ток в нагрузке

$$I_H = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = \sum_{j=1}^n I_j. \quad (2)$$

Как видно из графика (рис. 3) и из последнего выражения (2), на нагрузке происходит суммирование ступенчатых графиков токов от всех источников напряжения, причем форма кривой тока практически не будет отличаться от синусоиды.

Гармонический анализ многоступенчатого выходного напряжения показал, что для устранения высших гармоник от третьего порядка до p -го необходимо иметь всего $n = 0,25(p + 1)$ «ступеней» в кривой, аппроксимирующей синусоиду напряжения. При этом амплитуда M_m произвольно выбранной «ступени» m и ее фазовый угол Q_m , отсчитыва-

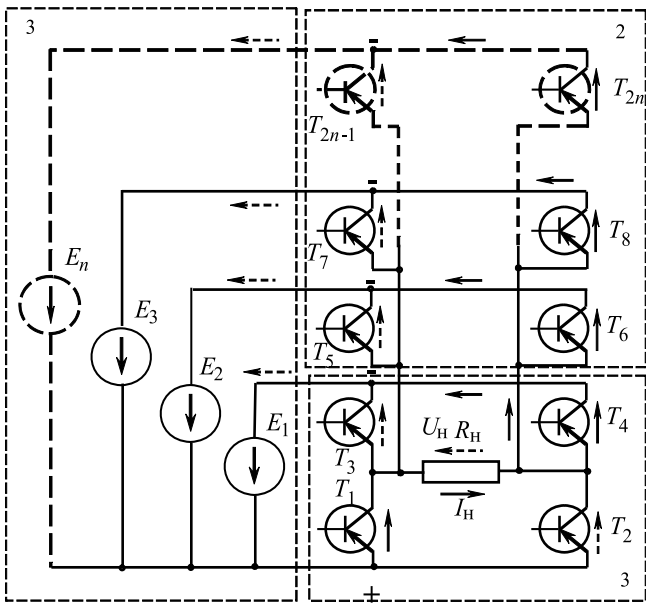


Рис. 3. Схема многоступенчатого преобразователя при параллельном соединении источников постоянного напряжения

ваемый от момента прохождения графика переменного напряжения через нуль, должны быть выбраны из условий:

$$M_m = A_1 \sin \frac{\rho m}{2n+1} \frac{\dot{e}}{\dot{e}} \frac{\rho}{2(2n+1)} \operatorname{cosec} \frac{\rho}{2(2n+1)} \frac{\dot{u}}{\dot{u}}$$

$$Q_m = \frac{\rho}{2} \frac{2m+1}{2n+1},$$

где A_1 – амплитуда основной (первой) гармоники выходного напряжения инвертора; m – порядковый номер «ступени» ($m = 1, 2, 3, \dots, n$) [5].

Анализ гармонических составляющих показал, что при четырех и более ступенях основная гармоника напряжения доминирует над другими гармониками, т.е. форма кривой напряжения на выходе инвертора практически не отличается от синусоиды.

Для более полного анализа с помощью системного проектирования System view [6] было выполнено моделирование ступенчатого графика напряжения при одной, трех, четырех и пяти ступенях. Анализ показал, что как при равномерном, так и неравномерном формировании многоступенчатого графика напряжения заметного уменьшения уровня высших гармонических составляющих не происходит.

Системное средство проектирования System view позволяет использовать метод быстрого преобразования Фурье (Fast Fourie Transform) для получения всех спектральных составляющих напряжения. В качестве примера на рис. 4 представлены спектры для четырех- и пятиступенчатого графиков напряжения.

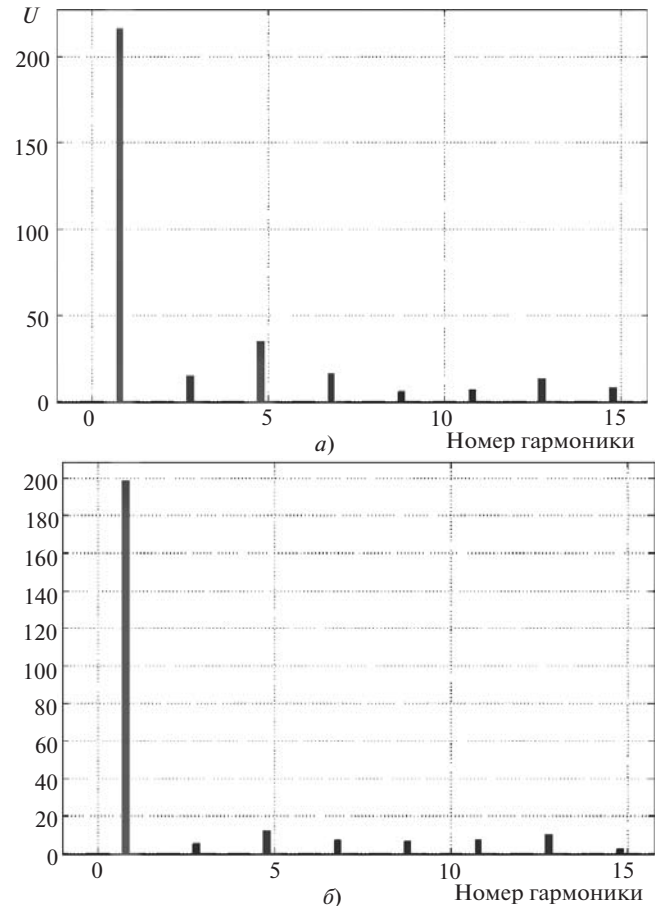


Рис. 4. Спектральный состав четырех- (а) и пятиступенчатого (б) напряжения

Стандартом предусмотрено ограничение действующего значения напряжения высших гармоник пятью процентами действующего значения напряжения основной гармоники:

$$\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \leq 0,05U_1. \tag{3}$$

Следовательно, коэффициент искажения напряжения должен быть в пределах

$$0,99875 \leq \eta_U \leq 1. \tag{4}$$

Условиям (3), (4) удовлетворяют четырех- и пятиступенчатые кривые напряжения. Но при пяти ступенях схема содержит еще одну дополнительную ступень, которую необходимо подключать к нагрузке, поэтому с экономической точки зрения четырехступенчатая кривая напряжения является наиболее эффективной.

Разработанная нами схема преобразования солнечной энергии в электроэнергию промышленной частоты (рис. 5) позволяет минимизировать число дорогостоящих солнечных элементов (СЭ). На вход инвертора подается напряжение с многоступенчатой формой кривой, на выходе его кривая синусоидальная.

соидална. Формирование многоступенчатой формы кривой напряжения, подаваемого на вход инвертора, осуществляется путем разделения n последовательно соединенных СЭ на пять ступеней с различным уровнем напряжения и m параллельно включенных соединений СЭ с различным временем коммутации. Каждая ступень напряжения подается к инвертору, а инвертор, в свою очередь, определенные группы параллельно и последовательно соединенных СЭ поочередно подключает к нагрузке, формируя напряжение с кривой, практически близкой к синусоидальной форме. Таким образом, инвертор формирует переменное напряжение промышленной частоты. При такой схеме построения инвертора некоторое число СЭ не используется. Поэтому необходимо оценить число таких неиспользуемых (пассивных) СЭ. Для этого каждый ЭС схемы будем рассматривать как элемент некоторой матрицы. Общее число $A_{\text{общ}}$ задействованных последовательно и параллельно соединенных между собой СЭ можно определить из следующей матрицы:

$$A_{\text{общ}} = \begin{pmatrix} a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nm} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1m} \end{pmatrix}$$

Если к этой матрице применить декомпозицию по ступеням и исключить не работающие СЭ, то можно определить матрицу активных элементов. При этом число матриц будет зависеть от числа ступеней напряжения на входе инвертора, формирующих напряжение на его выходе. При четырехступенчатом графике напряжения на входе инвертора декомпозиция матриц имеет следующий вид:

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{kn.1} & a_{kn.2} & \dots & a_{kn.m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k1.1} & a_{k1.2} & \dots & a_{k1.m} \end{pmatrix}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} a_{k_n,(k_1+1)} & a_{k_n,(k_1+2)} & \dots & a_{k_n,(m-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_2,(k_1+1)} & a_{k_2,(k_1+2)} & \dots & a_{k_2,(m-1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_1,(k_1+1)} & a_{k_1,(k_1+2)} & \dots & a_{k_1,(m-1)} \end{pmatrix}$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} a_{k_n,(k_1+3)} & a_{k_n,(k_1+4)} & \dots & a_{k_n,(m-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_2,(k_1+3)} & a_{k_2,(k_1+4)} & \dots & a_{k_2,(m-3)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_1,(k_1+3)} & a_{k_1,(k_1+4)} & \dots & a_{k_1,(m-3)} \end{pmatrix}$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} a_{k_n,(k_1+4)} & a_{k_n,(k_1+5)} & \dots & a_{k_n,(m-4)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_2,(k_1+4)} & a_{k_2,(k_1+5)} & \dots & a_{k_2,(m-4)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_1,(k_1+4)} & a_{k_1,(k_1+5)} & \dots & a_{k_1,(m-4)} \end{pmatrix}$$

Отметим, что число декомпозированных матриц будет зависеть от числа ступеней последовательно соединенных СЭ, строки матриц могут быть равномерными или же неравномерными – зависит от формируемого уровня напряжения на ступени.

Если сложить все матрицы, разложенные по ступеням, то получим сумму активных элементов:

$$A_{\text{ак}} = A_1 + A_2 + \dots + A_n,$$

тогда число пассивных СЭ

$$A_{\text{пас}} = A_{\text{общ}} - A_{\text{ак}}.$$

Пассивные СЭ по второй схеме преобразования можно исключить для удешевления схемы системы. Эффективность разработанной схемы преобразования (экономия СЭ) можно определить как

$$\eta_{\text{пас}} = \frac{A_{\text{пас}}}{A_{\text{общ}}} = \frac{A_{\text{ак}}}{A_{\text{общ}}} \times 100\%.$$

Применим изложенную методику для расчета многоступенчатого инвертора, в котором используются СЭ, выпускаемые фирмой «Ветроэнергетика» (Россия). Напряжение СЭ (модули серии АСЭ-50) составляет 17 В, ток нагрузки 2,88 А.

Для преобразования солнечной энергии в электрическую при напряжении переменного тока с действующим значением 220 В необходимо 18 модулей серий АСЕ-50 последовательно соединенных солнечных элементов. Тогда первую ступень напряжения будут формировать пять СЭ, вторую ступень – четыре, третью – пять и четвертую ступень – четыре последовательно соединенных СЭ. Как показали результаты гармонического анализа, при подаче такого «четырёхступенчатого» напряжения на вход инвертора на его выходе кривая напряжения будет иметь синусоидальную форму, т.е. фильтр не требуется. Для получения мощности 6,22 кВт при токе 20 А необходимо параллельно соединить между собой десять солнечных элементов, ток каждого из которых составляет 2 А.

Тогда для традиционной схемы преобразования общая матрица для 18 последовательно и 10 параллельно соединенных СЭ запишется следующим образом:

$$A_{\text{общ}} = \begin{pmatrix} a_{181} & a_{182} & \dots & a_{1810} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{310} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{210} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{11} & a_{12} & \dots & a_{110} \end{pmatrix} \quad a_{ij} = 180.$$

Матрицы первой – четвертой ступеней задействованных СЭ в предлагаемой схеме преобразователя будут иметь следующий вид:

$$A_1 = \begin{pmatrix} a_{51} & a_{52} & \dots & a_{510} \\ a_{41} & a_{42} & \dots & a_{410} \\ a_{31} & a_{32} & \dots & a_{310} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{210} \\ a_{11} & a_{12} & \dots & a_{110} \end{pmatrix} \quad a_{ij} = 50;$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} a_{92} & a_{93} & \dots & a_{99} \\ a_{82} & a_{83} & \dots & a_{89} \\ a_{72} & a_{73} & \dots & a_{79} \\ a_{62} & a_{63} & \dots & a_{69} \end{pmatrix} \quad a_{ij} = 32;$$

$$A_3 = \begin{pmatrix} a_{144} & a_{145} & a_{146} & a_{147} \\ a_{134} & a_{135} & a_{136} & a_{137} \\ a_{124} & a_{125} & a_{126} & a_{127} \\ a_{114} & a_{115} & a_{116} & a_{117} \\ a_{104} & a_{105} & a_{106} & a_{107} \end{pmatrix} \quad a_{ij} = 20;$$

$$A_4 = \begin{pmatrix} a_{185} & a_{186} \\ a_{175} & a_{176} \\ a_{165} & a_{166} \\ a_{155} & a_{156} \end{pmatrix} \quad a_{ij} = 8.$$

Сумма этих матриц определяет общее число активных (задействованных) СЭ:

$$A_{ак} = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 = 110.$$

Вычитая активную матрицу СЭ из общей матрицы, определяем число пассивных элементов:

$$A_{пас} = A_{общ} - A_{ак} = 70.$$

Отсюда следует, что в предлагаемой схеме пассивные СЭ можно удалить и тем самым сэкономить некоторое их число. Экономия СЭ можно определить следующим образом:

$$\bar{A}_{пас} = \frac{A_{пас}}{A_{общ}} = \frac{70}{189} \times 100\% = 38,88\%.$$

Таким образом, предлагаемая схема соединения СЭ для преобразования солнечной энергии в электроэнергию при переменном напряжении промышленной частоты позволяет сэкономить некоторое число дорогостоящих СЭ и снизить стоимость.

Был разработан и изготовлен экспериментальный образец трехступенчатого инвертора с микропроцессорным управлением. Структурная схема системы микропроцессорного управления однофазным трехступенчатым инвертором приведена на рис. 5. Представленная система состоит из источника питания, солнечного модуля, инвертора, оптронной развязки, датчика, микропроцессора, панели управления и однофазной нагрузки. Напряжения +5 и +15 В от источника питания подаются на микроконтроллер и схемы оптронной развязки. Панель управления предназначена для управления преобразователем в ручном режиме. Оптронная развязка необходима для обеспечения надежной и безопасной работы микроконтроллера и обеспечивает разделение низковольтных управляющих узлов и высоковольтных силовых цепей.

Формирование многоступенчатой формы кривой напряжения на входе инвертора осуществляется путем разделения последовательно-параллельно

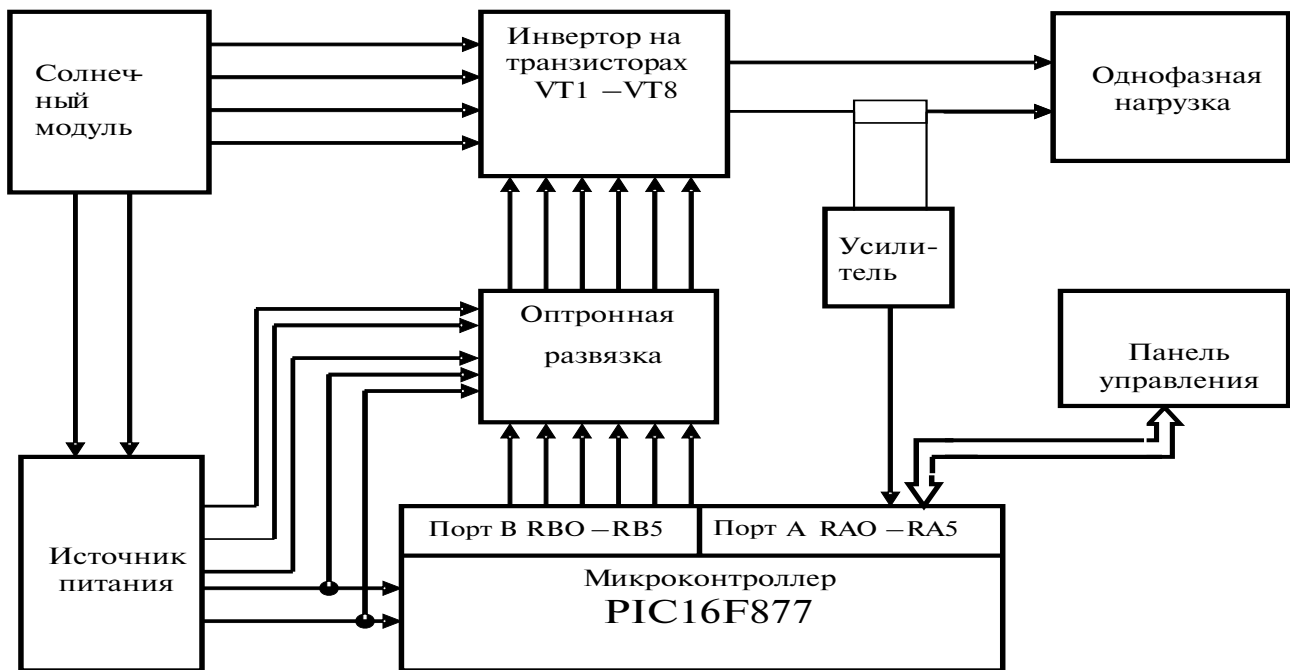


Рис. 5. Структурная схема микропроцессорного управления

соединенных СЭ на несколько ступеней с различным уровнем напряжения и программно-управляемым временем коммутации. Инвертор собран на транзисторах по структуре, где первая ступень выполнена по мостовой, а вторая и третья — по полумостовым схемам. Каждая ступень напряжения модуля присоединяется к мостовой и полумостовым схемам инвертора. Мостовая схема состоит из четырех, а полумостовые — из двух транзисторов. В определенные моменты времени на каждой ступени необходимо коммутировать два транзистора для формирования положительной и отрицательной полуволны синусоидального напряжения. Режим коммутации транзисторов организован так, чтобы исключить КЗ источников напряжения.

Микропроцессор формирует управляющие сигналы коммутации транзисторов по определенной временной диаграмме. Схема управления инвертором (рис. 5) выполнена на PIC-микроконтроллере [5]. Выходные сигналы управления $A-G$ формируются на выходной шине B порта ввода-вывода. Генератор тактовых импульсов стабилизирован кварцевым резонатором. Включённое состояние иницируется светодиодом $VD1$. Выходные сигналы

$A-G$ микроконтроллера через оптронную развязку поступают на входы транзисторов. На рис. 6 представлены осциллограммы напряжений при активной и индуктивно-активной нагрузках.

Выводы. 1. Разработанный многоступенчатый инвертор для преобразования постоянного тока в переменный позволяет получить синусоидальную форму кривой напряжения при четырех или пяти ступенях постоянного напряжения на входе.

2. Предложенная схема подключения солнечных батарей к многоступенчатому инвертору позволяет уменьшить число солнечных элементов, снизить стоимость солнечных преобразователей и повысить КПД и мощность системы.

3. Экспериментально подтвержден принцип работы многоступенчатого инвертора; ступенчатое подключение солнечных элементов к инвертору позволяет на его выходе получить напряжение, с кривой близкой к синусоиде.

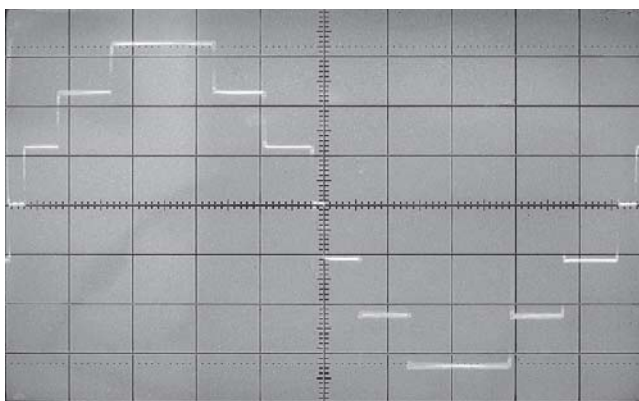
4. Микропроцессорное управление транзисторами инвертора позволяет программно корректировать форму кривой выходного напряжения в зависимости от типа нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

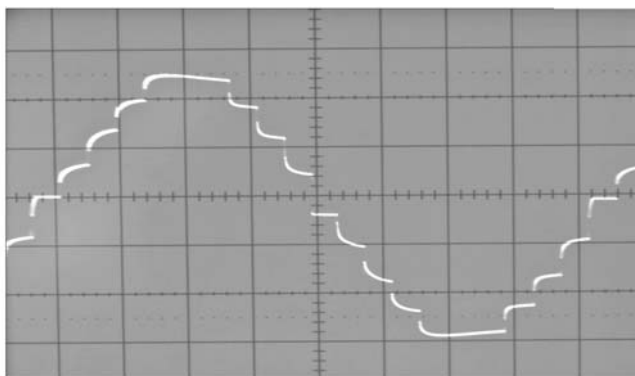
1. Твайделл Дж., Уэйр А. Возобновляемые источники энергии/Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. А.с. № 60621 на патент (Республика Казахстан). Многоступенчатый транзисторный инвертор (варианты)/Н.Т. Исембергенов, Л.Б. Илипбаева. — БИ, 2009, № 9.
3. Isebergenov N.T., Matkarimov B.T. Using Genetic Algorithm for Finding Switching Angles of a Single-phase Multilevel DC/AC Converter on Solar Modules. — Proc. of the Eighth Intern. Conf. on Machine Learning and Applications, New York, 13–15 November 2009.
4. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. — М.: Энергоатомиздат, 1986.
5. Ромаш Э.М., Дробавич Ю.И., Юрченко Н.Н., Шевченко П.Н. Высоочастотные транзисторные преобразователи. — М.: Радио и связь, 1988.
6. Разевиг В.Д., Лаврентьев Г.В., Златин И.Л. SystemView средство системного проектирования радиоэлектронных устройств — М.: Горячая линия — Телеком, 2002.
7. Предко М. Справочник по PIC-контроллерам. — М.: ДМК, 2002.
8. Тавернье К. PIC-контроллеры: практика и применение. — М.: ДМК, 2002.

[14.02.11]

Автор: *Исембергенов Налик Турегалиевич* в 1975 г. окончил электромеханический факультет Московского энергетического института. В 2002 г. защитил докторскую диссертацию «Электромашинные преобразователи на базе асинхронизированных машин для нетрадиционных источников энергии» в Алмаатинском энергетическом институте (Казахстан). Заведующий кафедрой «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Казахского национального технического университета им. К.И. Сатпаева.



а)



б)

Рис. 6. Осциллограммы напряжения при активной (а) и активно-индуктивной (б) нагрузках