

DOI 10.24412/1829-0450-fm-2025-1-53-63  
УДК 621.548

Поступила: 03.02.2025г.  
Сдана на рецензию: 13.02.2025г.  
Подписана к печати: 10.03.2025г.

## **ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИНВЕРТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ В СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПО КРИТЕРИЮ ИСКАЖЕНИЯ ФОРМЫ НАПРЯЖЕНИЯ**

***Л.А. Арутюнян***

*Национальный политехнический университет Армении  
lianain@outlook.com*

### **АННОТАЦИЯ**

Параметры электрической энергии, генерированной солнечными панелями, и параметры электроэнергии, потребляемой сетью, принципиально не совместимы по роду тока, отклонению формы напряжения от синусоидальной, величине и отклонению напряжения. Согласование параметров генерации электрической энергии солнечными панелями и параметров потребления электроэнергии сетью должно выполняться инвертором. Это является важной функцией инвертора и определяет выбор его типа. В настоящее время на солнечных электростанциях предпочтение отдается инверторам напряжения, а не инверторам тока, что недостаточно обосновано. С целью обоснования выбора типа инвертора на основании разработанной программы посредством спектрального анализа исследуются формы генерированного напряжения, их искажения относительно синусоидальной, и частотные спектры сравнительно для инвертора напряжения и инвертора тока.

**Ключевые слова:** инверторы напряжения, тока, частотный спектр.

В настоящее время солнечные электростанции получили широкое распространение во всем мире, в том числе и в Армении. Наиболее

распространены фотоэлектрические (или вольтаические) солнечные электростанции непосредственного преобразования солнечной энергии в электрическую. Установленная мощность сооружаемых солнечных электростанций и вырабатываемая ими электроэнергия экспоненциально увеличиваются [1]. Подавляющее большинство солнечных электростанций работает в режиме параллельной работы с сетью, отдавая всю выработанную электроэнергию в промышленную электрическую сеть.

Солнечные панели преобразуют энергию солнечного излучения в электрическую энергию постоянного тока. Величина напряжения на выходе панелей зависит от интенсивности солнечного облучения панелей и, в зависимости от природных условий, изменяется от нуля до номинальной. Это нерегулярное напряжение постоянного тока с выхода панелей посредством инвертора преобразуется в переменное напряжение синусоидальной формы с напряжением и частотой сети. Выход инвертора соединен с электрической сетью. Генерированная солнечными панелями электрическая мощность передается в электрическую сеть.

Параметры генерированной электрической энергии солнечными панелями и параметры электроэнергии в сети – такие, как род тока, напряжение (величина и отклонение напряжения), форма кривой напряжения, частота, характеристики регулирования, принципиально не совместимы [2].

Согласование параметров электроэнергии, генерированной солнечными панелями, и параметров электроэнергии в сети должно выполняться инвертором. Это является важной функцией инвертора.

### ***Постановка задачи и обоснование методики***

В настоящее время в солнечных электростанциях предпочтение отдается инверторам напряжения. Затем исследуется схема инвертора напряжения по условию совместимости указанных параметров с целью обоснования и выбора типа инверторов для фотоэлектрических солнечных электростанций.

### Инвертор напряжения

Инвертор напряжения представляет собой коммутатор (переключатель полярности) в цепи постоянного тока, который преобразует однополярное напряжение постоянного тока в переменное напряжение переменного тока [3, 4], (Рис. 1, 2, 3). Коммутатор выполняется на полупроводниковых ключах – тиристорах или на биполярных транзисторах с изолированным затвором *Insulated gate bipolar transistor* (так называемых транзисторах *IGBT*). Инвертор напряжения является источником напряжения с малым внутренним сопротивлением. Схема однофазного инвертора напряжения, выполненного на тиристорах, приведена на Рис.1, диаграмма напряжения и тока – на Рис. 2.

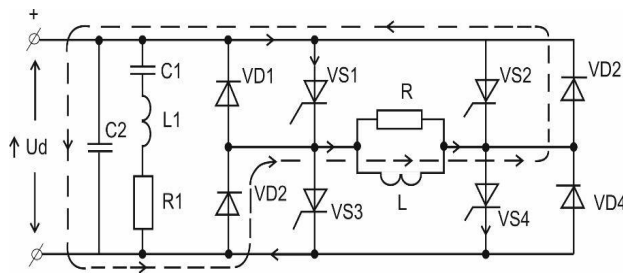


Рис.1. Схема однофазного инвертора напряжения на тиристорах.

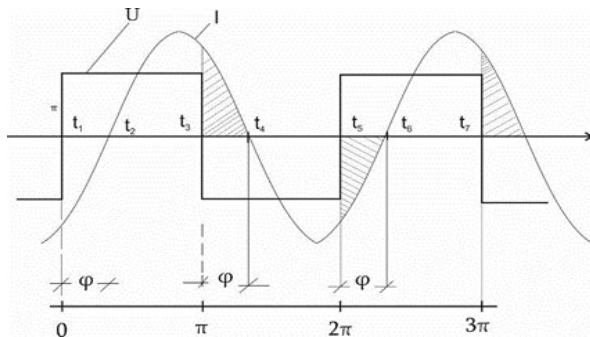


Рис.2. Диаграмма тока и напряжения и тока.

Инвертор состоит из двух пар коммутационных тиристоров VS1, VS4 и VS2, VS3, двух пар обратных диодов VD1, VD4 и VD2, VD3,

резонансного контура искусственной коммутации, состоящего из конденсатора  $C1$ , индуктивности  $L1$  и регулировочного резистора  $R1$ ; инвертор соединен с нагрузкой  $R-L$  переменного тока (в общем случае активно-индуктивной нагрузкой сети). Обратные диоды  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$ ,  $VD4$  создают цепь для протекания отстающей от напряжения части активно-индуктивного тока нагрузки (на Рис. 2 эта часть тока заштрихована, путь протекания тока указан пунктирной линией).

Принцип работы инвертора напряжения изложен в [3, 4]. Напряжение на выходе инвертора имеет прямоугольную форму (Рис. 2), амплитуда выходного напряжения не зависит от величины и фазы нагрузки. Величина переменного тока и его форма определяются величиной и характером нагрузки (активная, индуктивная, емкостная) в цепи переменного тока.

Особенностью инвертора напряжения, выполненного на тиристорах, является необходимость принудительного запираания коммутационных тириستоров предыдущей полярности при переходе выходного напряжения с одной полярности на противоположную. Это выполняется посредством контура искусственной коммутации тиристоров.

Инвертор напряжения может быть выполнен на биполярных транзисторах с изолированным затвором – так называемых транзисторах *IGBT* (*Insulate gate bipolar transistor*). Достоинствами транзисторов *IGBT* относительно тириستоров являются: управление напряжением, а не током, возможность запираания цепи под током посредством снятия сигнала управления, малые потери, высокая термоустойчивость. В настоящее время созданы транзисторы *IGBT* напряжением несколько киловольт и током несколько килоампер.

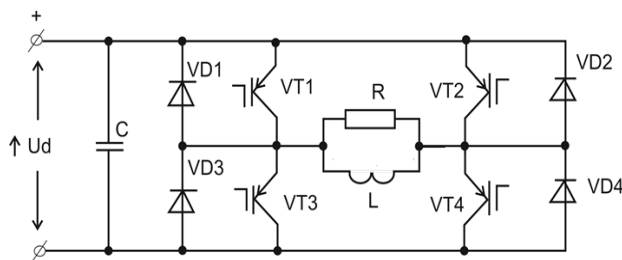


Рис.3. Схема инвертора напряжения на транзисторах.

## Результаты исследования

### *Форма напряжения на выходе инвертора*

Одним из основных параметров электроэнергии в энергосистеме является форма напряжения. Форма напряжения оценивается коэффициентом искажения относительно синусоидальной формы. Коэффициент искажения напряжения на шинах потребителя нормируется ГОСТом [2] на уровне 8%. Выходное напряжение инверторов напряжения, как было показано выше, заметно отклоняется от синусоиды согласно принципу работы инвертора: напряжение инвертора напряжения имеет прямоугольную форму (Рис. 2). Причем указанные формы напряжений не зависят от величин напряжений и нагрузки.

Отклонение формы напряжения от синусоидальной наносит значительный качественный и экономический ущерб.

Коэффициент искажения формы кривой напряжения аналитически определяется посредством разложения функции выходного напряжения инвертора в ряд Фурье и последующих вычислений следующим образом.

Функция выходного напряжения инвертора представляется в виде разложения в ряд Фурье:

$$U_t = f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nx = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\alpha + \varphi_n) \quad (1)$$

$$n=1,3,5,\dots,$$

где  $n$  – коэффициенты разложения постоянной составляющей:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi f(x) dx = 0; \quad (2)$$

в рассматриваемом случае  $a_0 = 0$ ,

cos-ных составляющих:

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi f(x) \cos nx \, dx \quad (3)$$

$$(n=1,3,5,\dots);$$

sin-ных составляющих:

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi f(x) \sin nx \, dx \quad (4)$$

$$(n=1,3,5,\dots);$$

коэффициенты (амплитуды) частотных составляющих:

$$A_n = a_n \cos n\alpha + b_n \sin n\alpha; \quad (5)$$

коэффициент искажения формы кривой напряжения:

$$K_f = \sqrt{A_3^2 + A_5^2 + A_7^2 + \dots + A_{11}^2} \cdot 100\%. \quad (6).$$

Коэффициент искажения формы кривой напряжения представляет собой отношение среднеквадратической суммы всех высших гармонических составляющих напряжения к основной составляющей напряжения, имеющей синусоидальную форму и основную частоту 50 Гц.

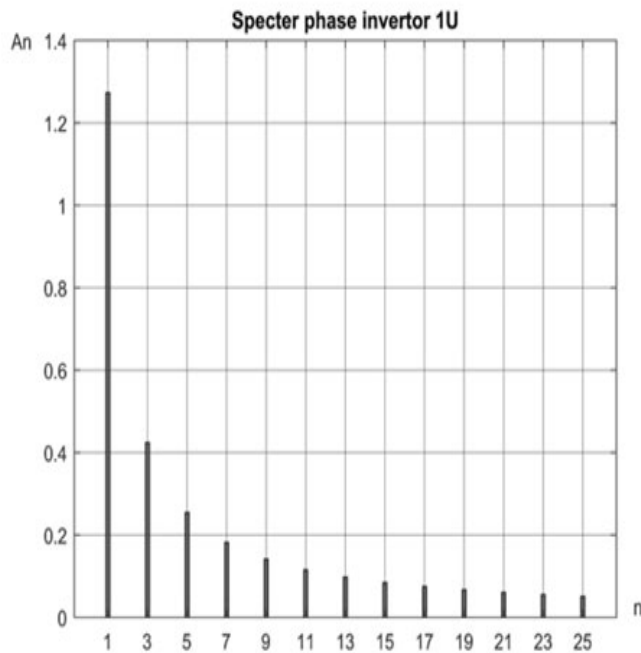
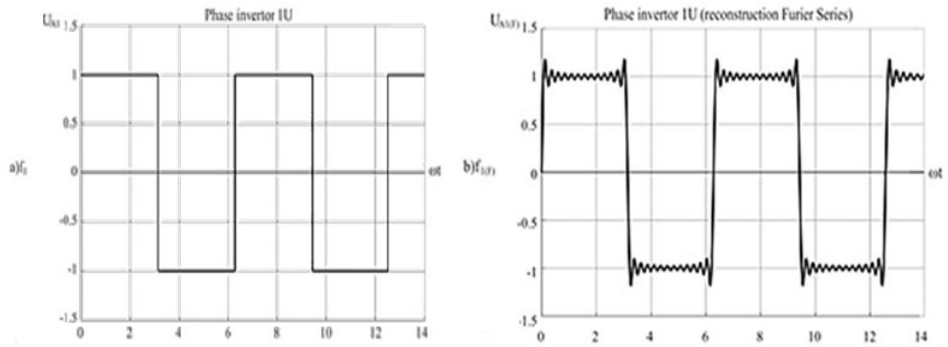
Высшие гармонические напряжения представляют собой помехи в отношении генерации основного напряжения синусоидальной формы частоты 50, т.е. являются паразитными.

Указанные функции выходного напряжения инвертора разлагаются в ряд Фурье по (1...6) до 25-й гармонической составляющей согласно разработанной программе. Результаты представлены ниже.

На рис. 4 приведены результаты разложения функции фазового напряжения  $f_1$  трехфазного инвертора напряжения (либо однофазного инвертора напряжения),  $f_1$  (рис.4 а) реконструкции напряжения с использованием гармоник до 25-й включительно (рис.4 б) и частотный спектр (рис. 4 в). В численной Табл. (Рис. 4 б, в) частотного спектра указаны амплитуды гармоник по (4); в нижней строке указана величина коэффициента искажения по (5).

На рис. 5 приведены результаты разложения функции линейного напряжения  $f_4$  с укороченной длительностью импульса  $f_4$  (Рис. 5 б, а) трехфазного инвертора напряжения, реконструкции напряжения с использованием гармоник до 25-й (Рис. 5 б, в) и частотный спектр (Рис. 5 б, в). При данной форме напряжения в частотном спектре отсутствуют гармоники, кратные трем.

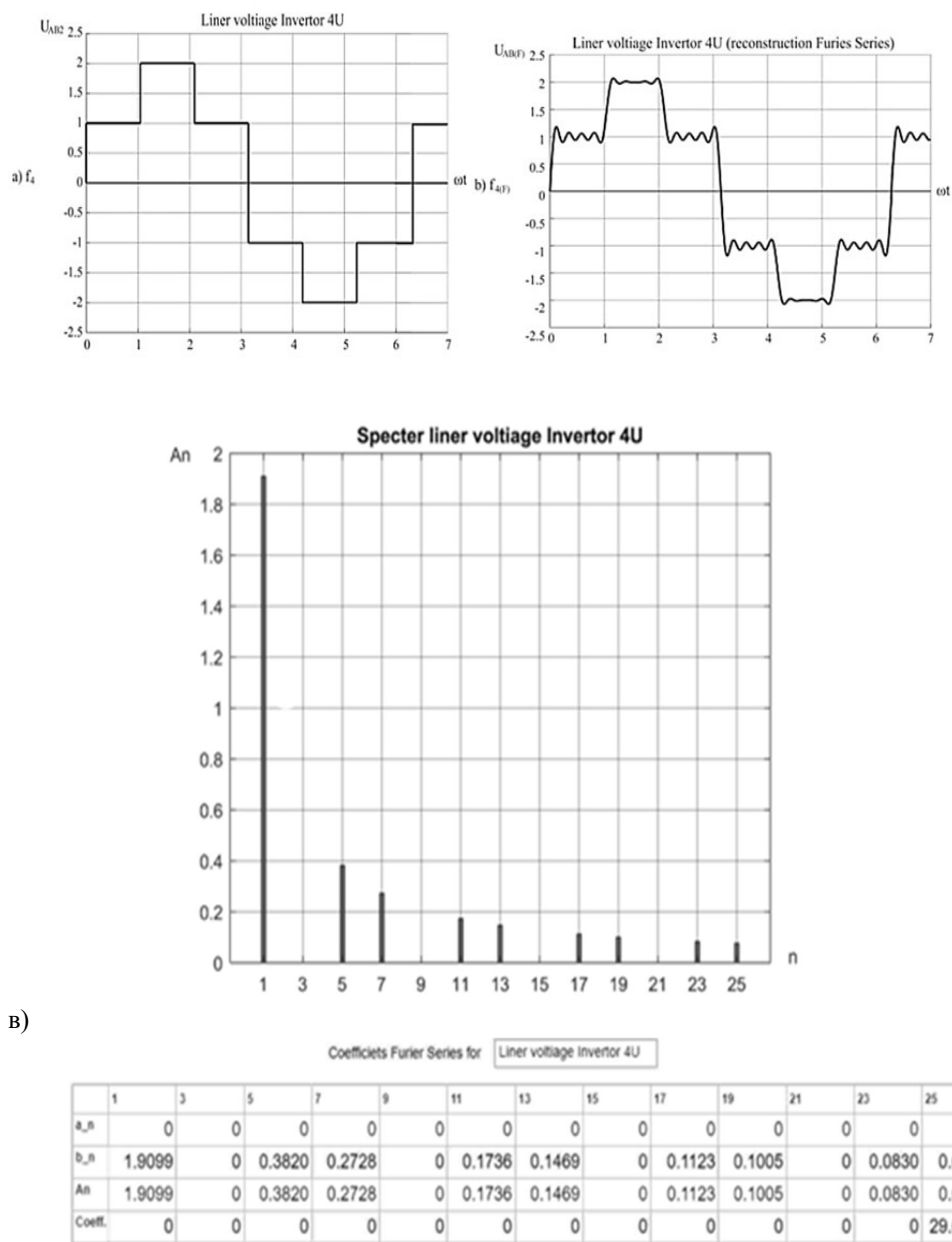
На основании вышеизложенного выполняется анализ формы напряжения, рассчитываются частотные спектры, уровень искажения напряжений инверторов напряжения и инверторов тока солнечных электростанций.



в)

| Coefficients Furier Series for <div>Phase invertor 1U</div> |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |         |
|-------------------------------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
|                                                             | 1      | 3      | 5      | 7      | 9      | 11     | 13     | 15     | 17     | 19     | 21     | 23     | 25      |
| $a_n$                                                       | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0       |
| $b_n$                                                       | 1.2732 | 0.4244 | 0.2546 | 0.1819 | 0.1415 | 0.1157 | 0.0979 | 0.0849 | 0.0749 | 0.0670 | 0.0606 | 0.0554 | 0.0509  |
| $A_n$                                                       | 1.2732 | 0.4244 | 0.2546 | 0.1819 | 0.1415 | 0.1157 | 0.0979 | 0.0849 | 0.0749 | 0.0670 | 0.0606 | 0.0554 | 0.0509  |
| Coeff.                                                      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 46.3119 |

Рис.4. Фазовое напряжение инвертора напряжения:  
а) функция, б) реконструкция, в) частотный спектр.



*Рис.5. Линейное напряжение инвертора:  
а – функция, б – реконструкция, в – частотный спектр.*



На основании изложенных выше результатов исследований в таблице приведены параметры инвертора напряжения по коэффициентам искажения выходного напряжения Рис. 4–5, формула (7).

Таблица 1.

| Вид инвертора       | Выходное напряжение | Коэффициент искажения формы напряжения $K_f$ , % | Снижение КПД $\Delta\eta$ , % |
|---------------------|---------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------|
| Инвертор напряжения | фазовое напряжение  | 46,31                                            | 46,31                         |
|                     | линейное напряжение | 29,03                                            | 29,03                         |

Высшие гармонические составляющие напряжения также генерируются солнечными панелями, на их генерацию затрачивается солнечная энергия, выделяются тепловые потери, рассчитывается установленная мощность оборудования. Электрическая энергия высших гармоник напряжения является паразитной, по этой причине она подавляется фильтрами. Электрическая энергия высших гармоник в сеть не поступает и не используется. Исходную искаженность формы генерированного напряжения относительно синусоидальной следует рассматривать как фактор снижения КПД инвертора и солнечной электростанции. Количественно указанное снижение КПД равно

$$\Delta\eta = K_{f\text{исх}} / K_{f\text{доп}}, \quad (7)$$

где  $K_{f\text{исх}}$  – исходный коэффициент искажения напряжения относительно синусоидальной на выходе инвертора (6) (Табл.1);

$K_{f\text{доп}}$  – допустимый коэффициент искажения напряжения на выходе фильтра (8%).

Снижение КПД преобразования пропорционально искажения напряжения относительно синусоидальной на выходе инвертора (7).

## **Выводы**

1. Форма выходного напряжения инверторов напряжения имеет значительные искажения и высокий уровень низкочастотных гармонических составляющих потерь. Это обстоятельство требует установки специальных высокочастотных фильтров.

2. Инверторы напряжения обладают простой схемой, жесткой однозначной связью действующих напряжений на входе и выходе, что обеспечивает б'ольшую устойчивость и возможность модуляции относительно иных типов инверторов.

3. Переменное напряжение, создаваемое на выходе инверторов напряжения, имеет значительные искажения формы относительно синусоидальной. Показано, что в трехфазной схеме коэффициент искажения переменного однофазного напряжения составляет 46,31%, а линейного напряжения 29,03%.

4. Указанные искажения напряжения приводят также к уменьшению КПД преобразования напряжения и КПД электростанции – на ту же величину.

5. Указанные величины искажений достаточно велики, превышают допустимые Стандартом требования, и вызывают необходимость принятия мер по улучшению формы выходного напряжения инвертора до требований Стандарта. При этом в той же степени может быть повышен КПД инвертора и электростанции.

6. Использование в схеме инверторов запираемых транзисторов *IGBT* (вместо тиристоров) уменьшает материалозатратность инверторов напряжения и рекомендуется для использования.

7. Изложенная комбинация параметров инверторов напряжения является предпочтительной для использования в солнечных электростанциях относительно инверторов других типов.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. <https://renen.ru/the-installed-capacity-of-world-solar-energy-exceeded-400-gw>  
Установленная мощность мировой солнечной энергетики.

2. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения.
3. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов. М. : Высшая школа, 1980. 424с.
4. Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов Р.С. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. М.: «Энергия», 1980. 328с.

## STUDY OF VOLTAGE INVERTERS BY MEASURING THE VOLTAGE CURVE OF SOLAR POWER PLANTS

*L. Harutyunyan*

*National Polytechnic University of Armenia*

### ABSTRACT

The parameters of electrical energy generated by solar panels and the parameters of electricity consumed by the network are fundamentally incompatible in terms of the type of current, the deviation of the voltage form from a sinusoidal, the magnitude and deviation of the voltage. Coordination of the parameters of electricity generation by solar panels and the parameters of electricity consumption by the network must be carried out by the inverter. This is an important function of the inverter and determines the choice of its type. Currently, in solar power plants, preference is given to voltage inverters, rather than current inverters, which is not sufficiently justified. In order to justify the choice of the type of inverter based on the developed program, by means of spectral analysis, the forms of the generated voltage, their distortion relative to the sinusoidal and the frequency spectra are studied comparatively for the voltage inverter and the current inverter.

**Keywords:** voltage and current inverters, frequency spectrum.