

Томский политехнический университет

Инженерная школа энергетики

**Методические указания**

**по выполнению лабораторных работ**

«Изучение трехфазного статического преобразователя на основе автономного инвертора напряжения»

по дисциплине

«Системы электроснабжения летательных аппаратов»

Томск-2018

## 1. Назначение статических преобразователей

Статические преобразователи представляют собой полупроводниковые преобразователи постоянного напряжения 28 В, 270 В в переменный однофазный ток напряжением 115В, частотой 400Гц или в переменный трехфазный ток с линейным напряжением 36В, 115 В частотой 400Гц. В системах электроснабжения, где первичная система является системой постоянного тока, преобразователь служит для получения переменного тока. В системах переменного тока преобразователь используется как аварийный источник переменного тока при отказе основной системы электроснабжения.

В настоящее время на летательных аппаратах применяются статические преобразователи типа: ПОС-25, ПОС-125, ПОС-800, ПОС-1000, ПТС-250, ПТС-500, ПТС-800, ПТС 2500, 5000.

Наименование преобразователей: П – преобразователь; О - однофазный; Т- трехфазный; цифровое обозначение – мощность нагрузки (рис.1).

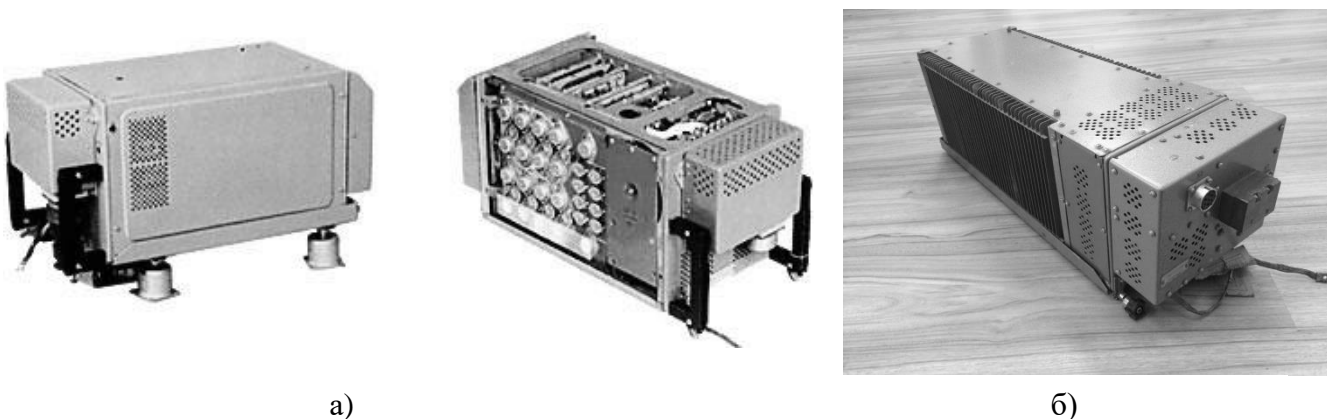


Рис.1. Пример статических преобразователей ПТС-800 (а) и ПТС-2500 (б)

### Теоретические сведения о статических преобразователях

Статические преобразователи напряжения выполняются на основе однофазных и трехфазных автономных инверторов напряжения (АИН).

Рис. 2 поясняет принцип управления однофазным мостовым АИН в режиме синусоидальной широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и при питании от источника постоянного напряжения – выпрямителя или аккумуляторной батареи АБ.

АИН состоит из четырех транзисторов, например, типа IGBT (isolated gate bipolar transistor) – составной транзистор, состоящий из полевого входного, биполярного выходного транзисторов и обратного диода. Правая стойка АИН, состоящая из транзисторов  $VT_2, VT_3$  управляется от противофазных сигналов основной частоты, например, 50 или 400 Гц. Левая стойка, состоящая из транзисторов  $VT_1, VT_4$ , управляется противофазными и модулированными по длительности («ширине») по синусоидальному закону  $U_{\text{мод}}$  сигналами. ШИМ-сигнал можно получить, сравнивая синусоидальное и пилообразное напряжение на компараторе К. При этом на нагрузке получается ШИМ-напряжение, форма которого приведена на рис. 3.

Для получения синусоидального выходного напряжения применяют один из фильтров, схема которых приведена на рис.3 б. При этом на выходе фильтра получается напряжение, форма которого зависит от параметров фильтра (индуктивности дросселя и емкости конденсатора) и частоты пилообразного напряжения (см. рис. 3 в-г). Величину выходного напряжения можно регулировать изменением скважности ШИМ-сигнала  $\gamma = t_{\text{имп}}/T$ . Такая ШИМ называется однополярной, т.к. выходное напряжение АИН в течение полупериода также однополярно. Принципиально также возможно получение двуполярной ШИМ (см. рис. 2 в).

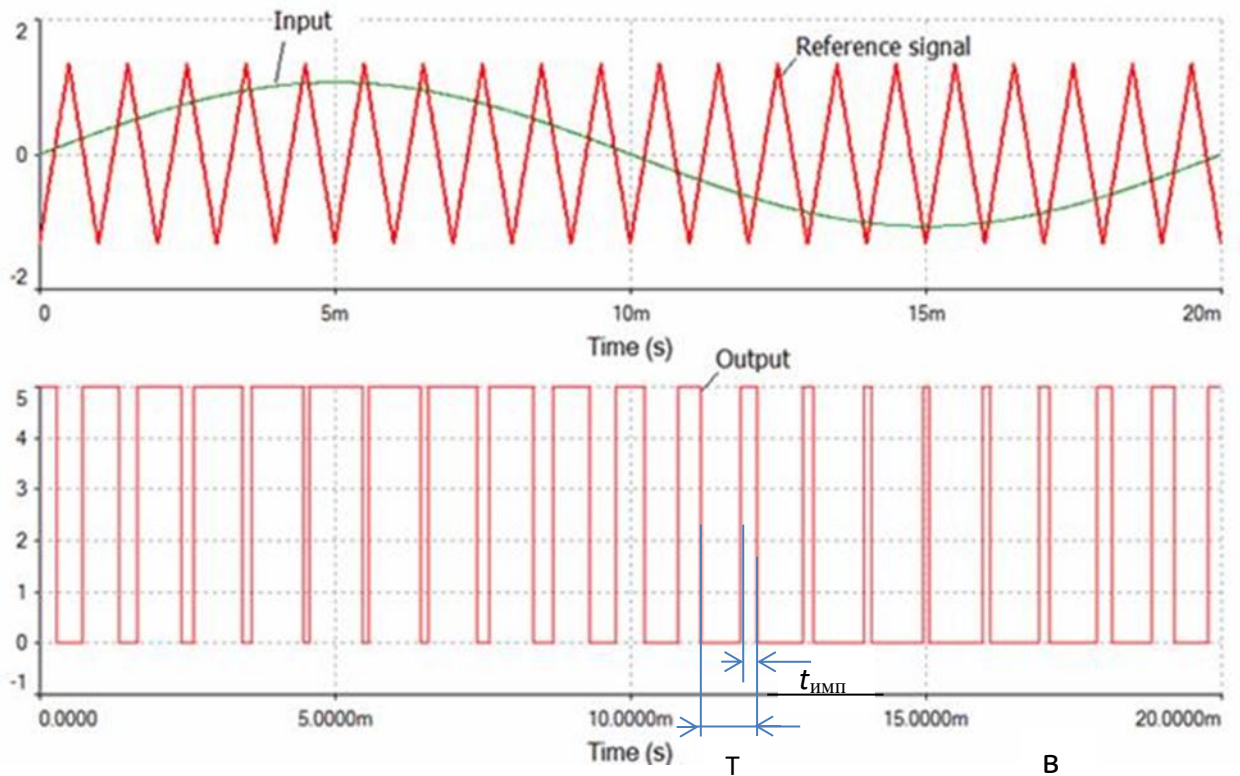
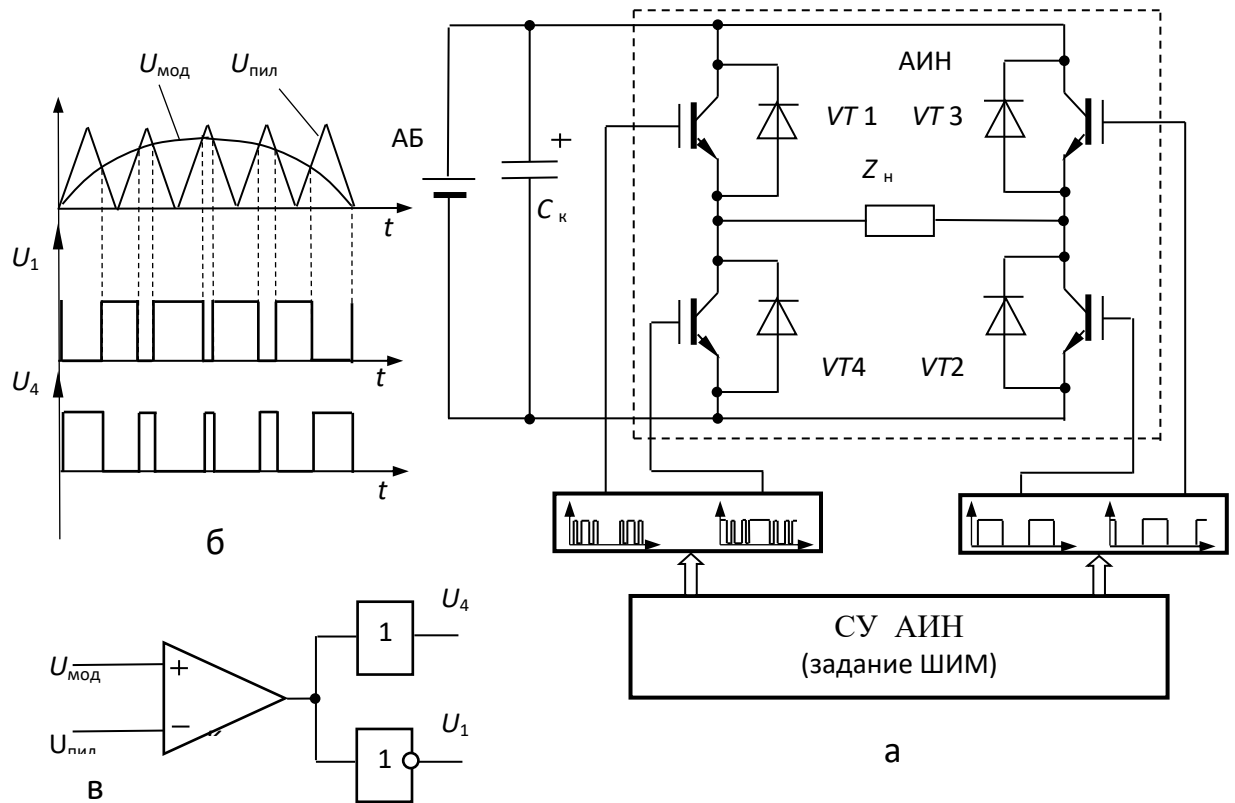


Рис. 2. Мостовой автономный инвертор напряжения с ШИМ (а), принцип формирования ШИМ-сигнала управления (б) и его схемная реализация; в – принцип получения двуполярной ШИМ

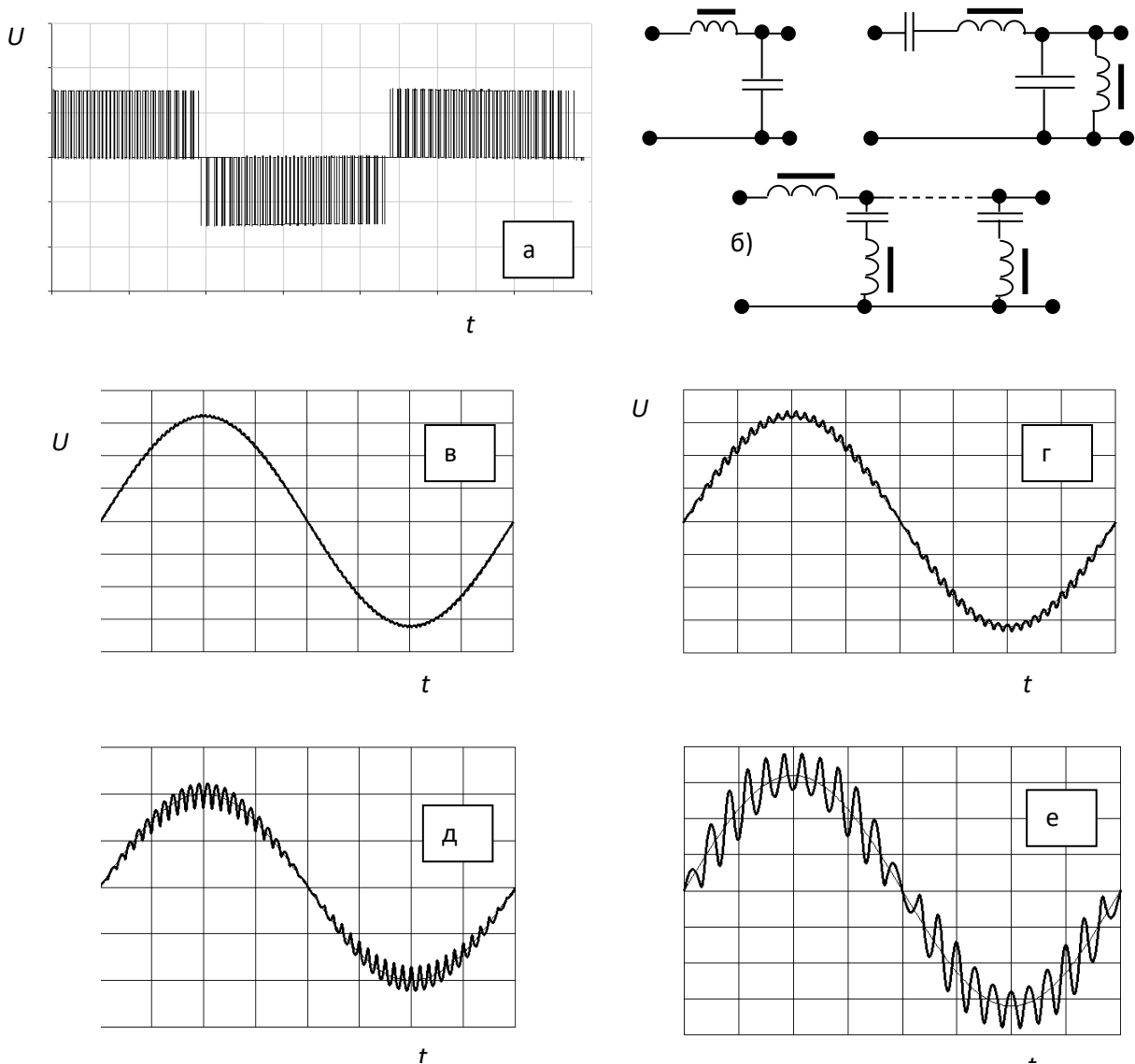


Рис. 3. Форма выходного напряжения однофазного АИН в режиме ШИМ -а, выходные фильтры -б и форма выходного напряжения после фильтрации при различной частоте пилообразного сигнала - в-е.

Трёхфазные автономные инверторы выполняются либо в виде трех однофазных, объединенных в одну схему посредством выходных трансформаторов (рис.4), либо двух однофазных, объединенных трансформаторами по схеме Скотта (рис.5), в которой выходные напряжения двух инверторов сдвинуты на 90 эл. град, либо на основе мостовой бестрансформаторной схемы (рис.6).

Согласно рис.6 трехфазный мостовой инвертор состоит из трех одинаковых стоек, включающих в себя по два транзистора и два обратных диода. Транзисторы каждой стойки управляются от схемы управления через импульсные усилители 1-6 парафазными сигналами, таким образом, что когда один (например, верхний) транзистор открыт, другой (нижний) – закрыт, т.е. как и в случае однофазного мостового преобразователя. Работа стоек во времени сдвинута на 120°. Таким образом, система управления формирует трехфазную систему напряжений управления транзисторными ключами инвертора.

Если проследить по диаграммам работы, представленным на рис. 6 последовательность включения и выключения соответствующих транзисторов, то можно увидеть, что фазное напряжение  $U_{\phi}$  имеет прямоугольно-ступенчатую форму. В такой форме присутствуют все

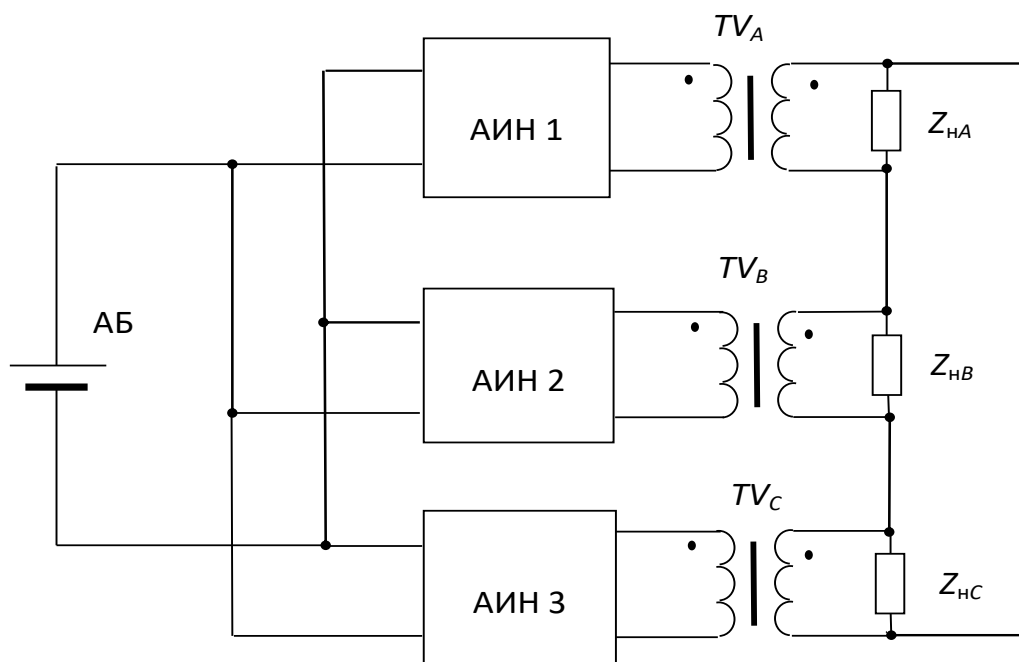


Рис.4. Сема трехфазного автономного инвертора напряжения на основе трех однофазных

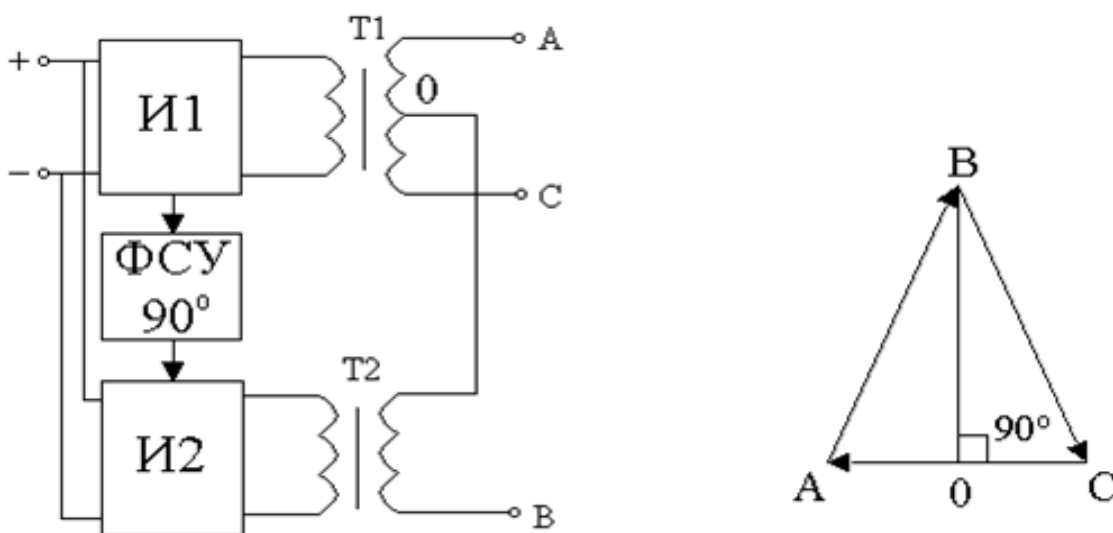


Рис.5. Трехфазный инвертор по схеме Скотта

нечетные гармоники кроме третьей. Линейное напряжение  $U_{AB}$  имеет нулевую паузу. Степень отклонения выходного напряжения от синусоидальной формы оценивается коэффициентом нелинейных искажений. Коэффициент нелинейных искажений сигнала (КНИ,  $K_n$ ,  $THD$ ,  $THDf$ ) – величина, выражающая степень нелинейных искажений сигнала, равна отношению среднеквадратичного значения всех высших гармоник сигнала к напряжению первой гармоники:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{\infty} Y_h^2}{Y_1}}$$

При активной нагрузке форма фазного тока  $I_\phi$  повторяет форму выходного фазного напряжения  $U_\phi$ . При активно-индуктивной нагрузке  $\cos\varphi < 1$  ( $\varphi = \omega t$ ), фазный ток отстает от напряжения и в работу вступают обратные диоды  $VD1-V D6$ .

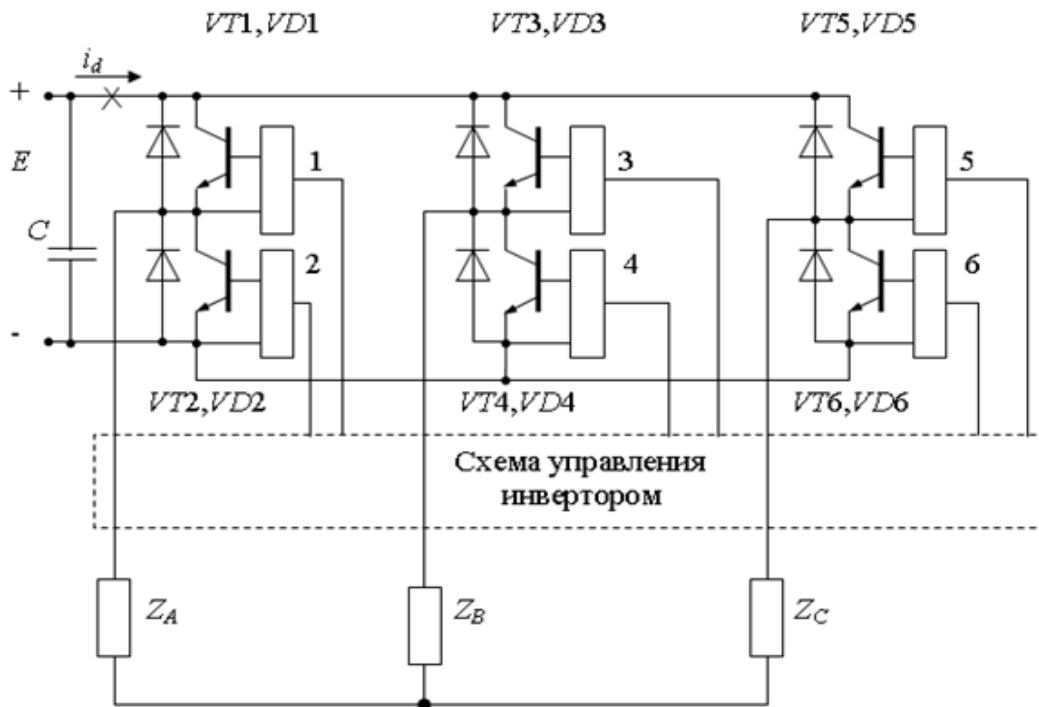


Рис.6. Трехфазный мостовой инвертор напряжения

Рассмотрение работы инвертора начнем с момента времени  $t_i$ , когда ток и напряжение в фазе  $A$  максимальны (рис.7). В этот момент открыты транзисторы  $VT1$ ,  $VT4$  и  $VT6$ . После значения текущего угла  $\varphi = \omega t = 2\pi/3$  вместо транзистора  $VT4$  включается транзистор  $VT3$  и фаза  $B$  оказывается подключенной к «плюсу» источника питания. Однако ток в фазе  $B$  резко изменить направление ввиду запасенной электромагнитной энергии не может и некоторое время протекает через обратный диод  $VD3$ , замыкаясь через фазу  $A$ . Таким образом нагрузка фаз  $A$  и  $B$  оказывается на время протекания реактивного тока закороченной. После спада этого реактивного тока до нуля ток в фазе  $B$  меняет направление на противоположное и протекает уже через транзистор  $VT3$ . В момент значения текущего угла  $\omega t = \pi$  транзистор  $VT1$  выключается, а транзистор  $VT2$  включается. В этом случае реактивный ток фазы  $A$  продолжает протекать через обратный диод  $VD2$  и транзистор  $VT6$ , так что теперь нагрузка фаз  $A$  и  $C$  на время оказывается закороченной. После спада реактивного тока фазы  $A$  ток начинает протекать в противоположном направлении уже через открывшийся транзистор  $VT2$  и т.д.. Таким образом, возврата реактивной энергии в источник постоянного тока нет, а поскольку энергопотребление меняется каждую шестую часть периода выходного напряжения, то ток в цепи источника питания имеет характерную форму с огибающей, которая повторяет форму фазного тока на интервале  $\pi/3 - 2\pi/3$ . Возврат реактивной энергии нагрузки в цепь постоянного тока в трехфазном инверторе напряжения отсутствует лишь тогда, когда коэффициент мощности нагрузки  $0,528 < \cos \varphi < 1$ . При  $\cos \varphi < 0,528$  в работу вступает компенсирующий конденсатор  $C$ .

В условиях реализации ШИМ каждая стойка АИН работает по закону модуляции (рис.8) аналогично однофазному инвертору. Отношение амплитуды опорного сигнала синусоиды  $U_{on}$  к несущей амплитуде пилообразного высокочастотного сигнала  $U_{\Pi}$  называется глубиной модуляции  $M$  ( $M = U_{on}/U_{\Pi} = 1 \div 0$ ) и чем меньше  $M$ , тем меньше выходное напряжение АИН. В случае  $M \gg 1$  ШИМ «вырождается» и выходное фазное напряжение АИН приближается к прямоугольно-ступенчатой форме – базовому режиму работы АИН. Действующее значение фазного напряжения будет равно:

$$U_{\phi} = \frac{\sqrt{2}}{3} EM .$$

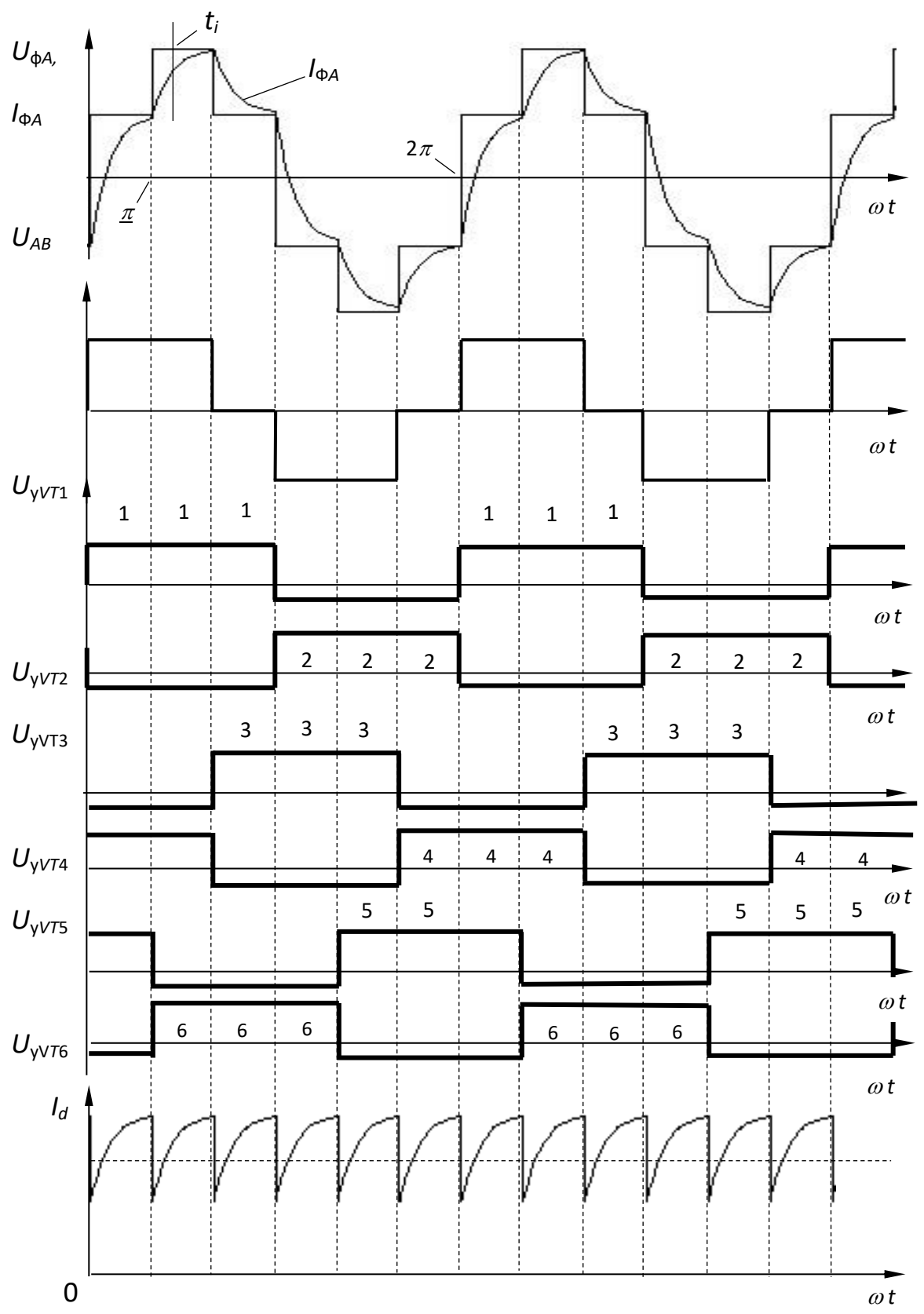


Рис.7. Диаграммы работы трехфазного мостового инвертора напряжения при  $\cos\varphi > 0,528$

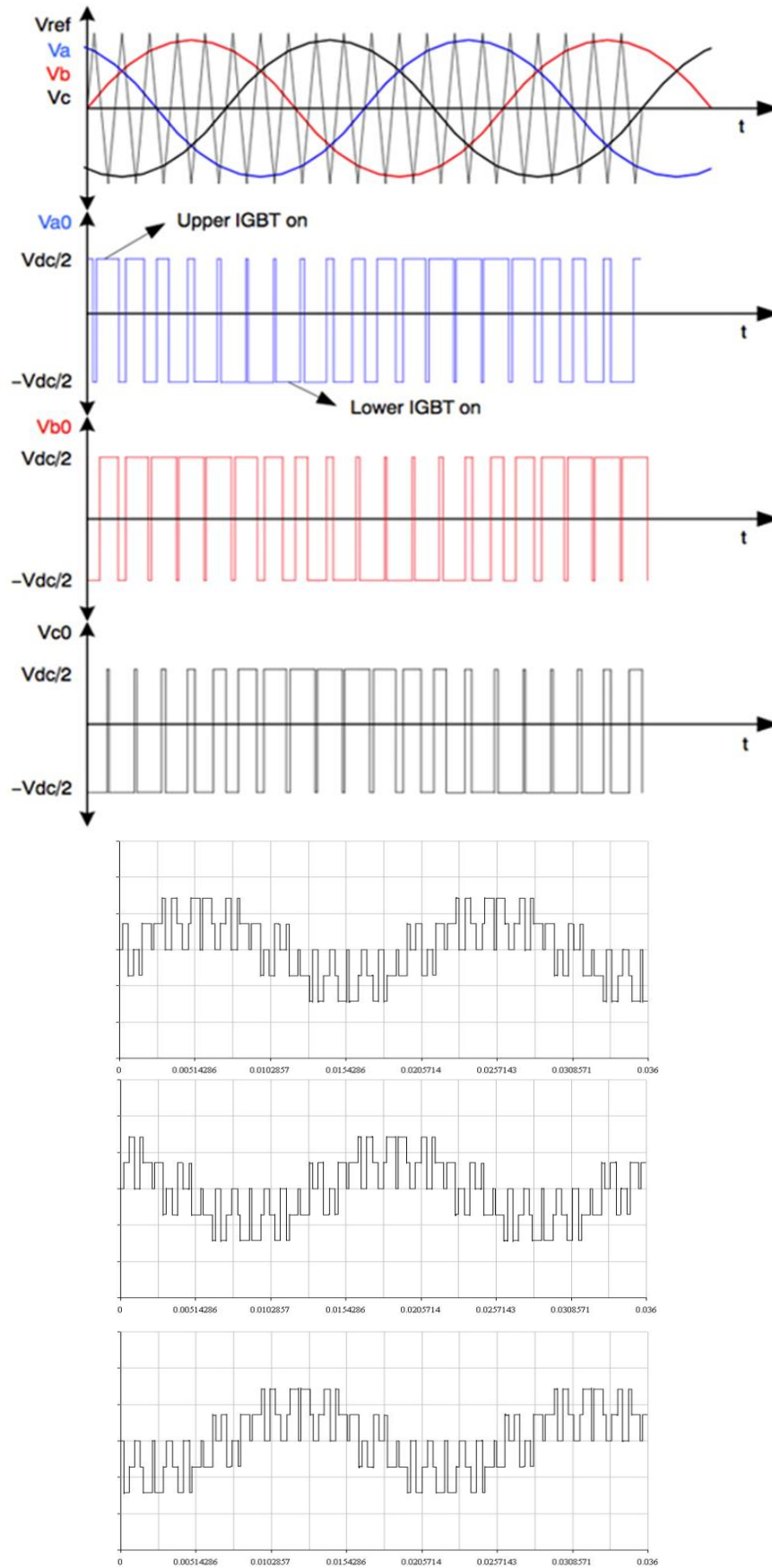


Рис.8. Реализация ШИМ для трехфазного мостового АИН  
 (вверху – управляющие напряжения, внизу – форма  
 выходного фазного напряжения АИН)

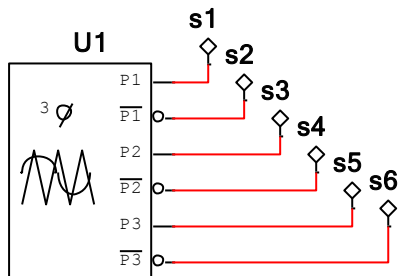


### 3. Описание виртуальной лабораторной установки

Виртуальная лабораторная установка для исследований, предусмотренных содержанием работы, показана на рис. 9 и выполняется в среде имитационного моделирования *Multisim 12*.

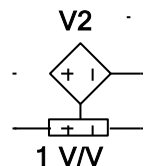
Схема содержит:

- 1) источник постоянного тока 270 В с компенсирующим конденсатором С4;
- 2) автономный трехфазный инвертор напряжения на шести идеальных ключах (аналог транзисторов) и обратных диодов;
- 3) схемы управления на ШИМ-контроллере U1 с выходными узлами s1 – s6;



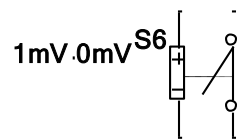
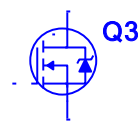
ШИМ-контроллер реализует формирование шести парафазных ШИМ-сигналов (P1 – P3) для управления транзисторными стойками инвертора, представленных в описании выше (см. рис.2 и рис.8;

- 4) выходного трехфазного L-C-фильтра (C1-3 ... L1-3);
- 5) активной нагрузки R1-R3 50 Ом;
- 6) измерительных приборов (осциллографа XSC1, частотомера XFC1 и измерителя коэффициента нелинейных искажений XDA2; мультиметра-вольтметра переменного напряжения XMM1);
- 7) согласующего преобразователя V2, необходимого для гальванической развязки и корректных измерений.



### 5. Последовательность операций при исследовании выпрямительной установки.

1. Собрать схему преобразователя в соответствии с рис.9, используя вместо «классических» транзисторов их аналог управляемого ключа. Для управляющих цепей транзистора и исключения лишних связей (соединений) с блоком ШИМ-контроллера U1 использовать узлы из меню «Place – Connectors – On-page connector».
2. Кликнув по значку ШИМ-контроллера U1 установить в поле значения:
  - основной частоты 400 Гц;
  - несущей частоты ШИМ 16000 Гц;
  - выходное напряжение 10 В;
  - время переключения 1 ns;
  - глубину модуляции M =1. В опытах глубина модуляции меняется (от 0,1 до 10).



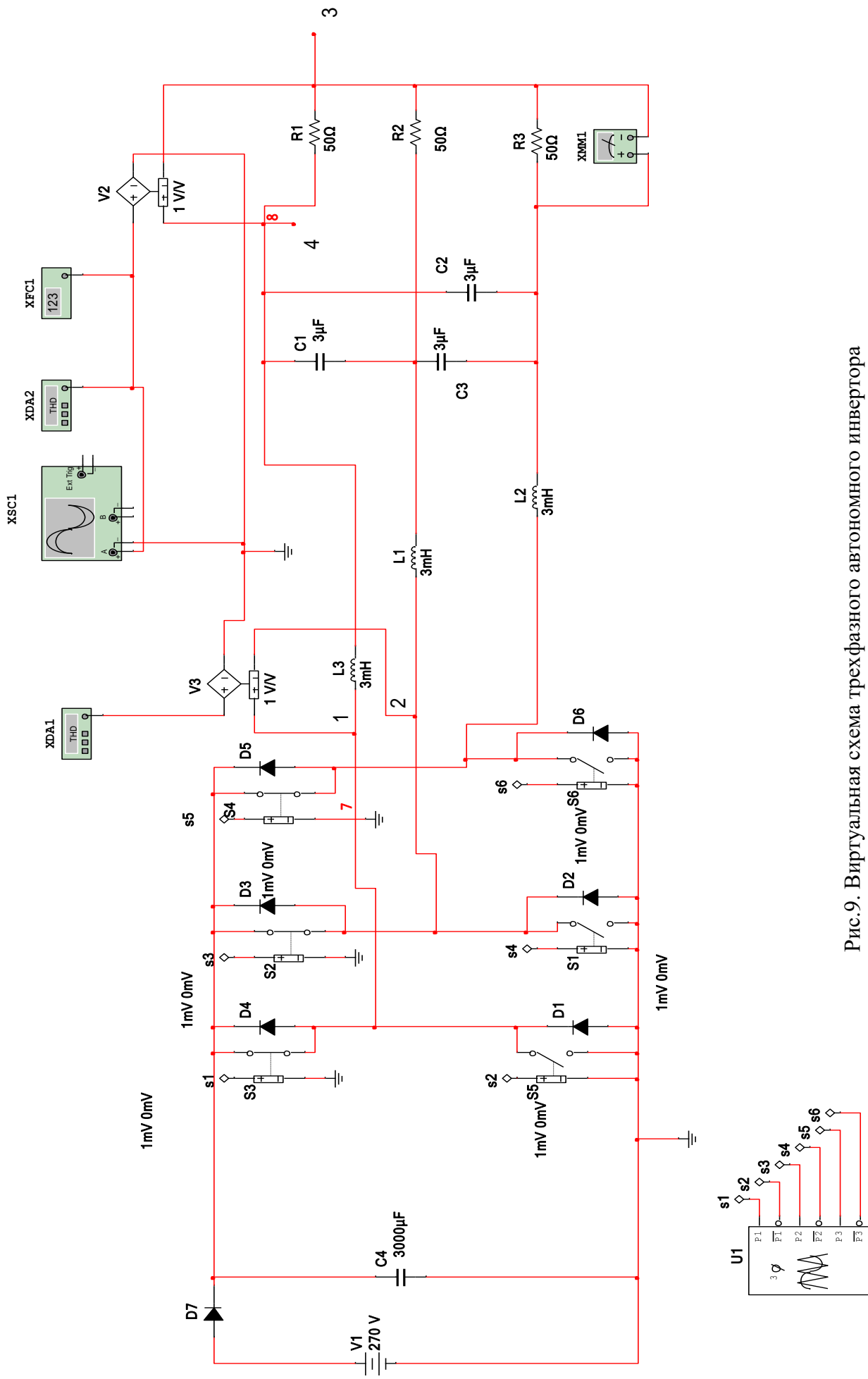


Рис.9. Виртуальная схема трехфазного автономного инвертора напряжения

3. Включив схему, снять осциллограммы:
- линейного (точки 1 и 2) и фазного (точки 1 и 3) напряжений инвертора, а также фазного напряжения нагрузки (точки 4 и 3) при различных глубинах модуляции. При этом фиксировать коэффициент нелинейных искажений КНИ по прибору ХДА2 и выходное напряжение по прибору ХММ1. Данные занести в таблицу 1.
4. Снять вид линейного напряжения инвертора (точки 1 и 2) и фазного напряжения нагрузки (точки 4 и 3) при  $M=1$  и различных несущих частотах 16000 Гц; 10000 Гц; 4000 Гц; 2000 Гц.
5. После проведения экспериментов построить зависимости:
- КНИ  $U_{\phi н}$  (точки 3 и 4, нагрузка)  $= f(M)$ ;
  - $U_{\phi}$  (точки 3 и 4, нагрузка)  $= f(M)$ ;
  - КНИ  $U_{\phi инв.}$  (точки 1 и 3, выход инвертора, фазное напряжение)  $= f(M)$ .

Таблица 1

Глубина модуляции M	Напряжение на нагрузке $U_{\phi}$ , В	КНИ $U_{\phi н}$ (точки 3 и 4, нагрузка)	КНИ $U_{\phi инв.}$ (точки 1 и 3, выход инвертора, фазное напряжение)
0,1			
0,3			
0,5			
1			
1,5			
3			
10			
100			