

Цель данной статьи – публикация основных этапов разработки и исследования характеристик модели СМ-инвертора* со стабилизацией (действующего) выходного напряжения при работе от моделей фотоэлектрических элементов.

Применение ступенчатой модуляции в преобразовании (инвертировании) постоянного напряжения в переменное позволяет уменьшить массогабаритные и энергетические характеристики инверторов.

При этом возникает необходимость в стабилизации выходного напряжения. Особенно актуальна эта задача при работе от МФЭП, напряжение которых зависит от величины выходного тока.

В связи с изложенным разработана модель СМ-инвертора с первичными источниками питания-МФЭП и нагрузкой на выходе (рис. 1).

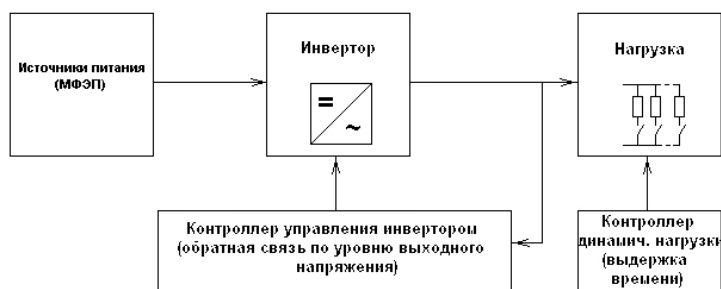


Рис. 1. Обобщенная блок-схема модели разработанного СМ-инвертора

При этом модели первичных МФЭП должны обладать ВАХ, соответствующим реальным при заданных напряжениях и мощности.

1. Выбор мощности инвертора, количества первичных источников, величины и формы выходного напряжения

Заданная мощность инвертора – 3000 Вт, заданное выходное напряжение – однофазное напряжение 220 В (при амплитудном значении напряжения 310 В).

Данный выбор связан, прежде всего, с необходимостью создания систем электроснабжения для нужд бытового и промышленного производства малой мощности (например, базовые станции сотовой связи). С другой стороны, разработка и применение ступенчатой кривой, разработка метода стабилизации выходного напряжения названной кривой, принципы схемостроения и управления могут быть использованы для систем электроснабжения как меньших, так и значительно больших мощностей и напряжений.

Выбор количества первичных источников осуществлен исходя из выводов работ [1, 2]: три первичных источника достаточно для работы инвертора с высоким качеством напряжения ($KГ < 12\%$) без применения выходного фильтра. В связи с изложенным в качестве первичных источников питания СМ-инвертора выбраны четыре МФЭП: три основных и четвертый – для стабилизации выходного напряжения (включение дополнительного источника питания предложено, в частности, в [1, 2]).

Рассмотрение подключения АКБ (или других источников питания), а также разработка блока питания собственных нужд инвертора в задачу работы не входят.

В качестве метода стабилизации выбран метод расширения ЦС кривой (ШИМ-

* ВАХ – вольтамперная характеристика, КГ – коэффициент гармоник, КИСКН – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения ($Kи$), МГХ – массогабаритные характеристики, МФЭП – модуль фотоэлектрического преобразователя, СИМ – (программная) среда имитационного моделирования, СМ – ступенчатая модуляция, СМ-инвертор – инвертор ступенчатой модуляции, ТММ – точка максимальной мощности, ФЭП – фотоэлектрический преобразователь, ЦС – центральная ступенька (полупериода выходного напряжения инвертора), ШИМ – широтно-импульсная модуляция.

стабилизация).

Выбор ступенчатых кривых выходного напряжения СМ-инвертора исходил из следующих принятых условий:

а) исследуемые кривые до начала ШИМ-стабилизации должны обладать симметрией относительно оси абсцисс [1-4]; выбор данного вида симметрии обусловлен более лучшим ее гармоническим составом [1];

б) исследуемые кривые должны удовлетворять закону распределения напряжений вида:

$$U(N) = U_0 \cdot N, \quad (1)$$

где N – номер ступеньки;

$U(N)$ – напряжение ступеньки, В; данный вид распределения напряжений выбран главным образом вследствие возможности формирования ЦС из суммы напряжений других ступенек (напряжений источников), что важно при применении ШИМ-стабилизации напряжения; для СК с $N=4$ дополнительно проведено исследование с распределением напряжения вида:

$$U(N) = U_0 \cdot 2^{N-1}; \quad (2)$$

в) исследуются кривые от $N=3$ до $N=8$.

Исследование СК проводилось для нахождения следующих зависимостей:

а) зависимость изменения действующего значения напряжения [5] от ширины ЦС ($\Delta\lambda$) при различных уровнях напряжений питающих источников МФЭП (различный процент от $U_{ном}$) и изменении количества N ;

б) зависимость изменения абсолютного значения напряжения [5] от ширины ЦС ($\Delta\lambda$) при различных уровнях напряжений питающих источников МФЭП и изменении N ;

в) зависимость изменения КИСКН ($K_{и}$) [5] напряжения от ширины ЦС ($\Delta\lambda$) при различных уровнях напряжений питающих источников МФЭП и изменении N .

Частота напряжения при этом не изменялась.

Из исследованных кривых наиболее лучшими показателями качества и возможности стабилизации выходного напряжения обладает ступенчатая кривая семи ступенек за четверть периода с учетом требований к малому количеству первичных источников питания (необходимо три источника). Данная ступенчатая кривая получила обозначение как СК7.

Исследование зависимости КИСКН СК7 от расширения ЦС при количестве аналитических промежутков периода ($n=840$) ступенчатой кривой разложения в ряды Фурье графоаналитическим методом показано на рисунке 2. Отдельно указан промежуток, в котором $K_{и} < 12\%$.

Распределение напряжений приведено в выражении 3:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_0 = 310 \text{ В} / 7 = 44,29 \text{ В}, \\ U_1 = U_0 \cdot 1 = 44,29 \text{ В}, \\ U_2 = U_0 \cdot 2 = 88,58 \text{ В}, \\ U_3 = U_0 \cdot 3 = 132,87 \text{ В}, \\ U_4 = U_0 \cdot 4 = 177,16 \text{ В}, \\ U_5 = U_0 \cdot 5 = 221,45 \text{ В}, \\ U_6 = U_0 \cdot 6 = 265,74 \text{ В}, \\ U_7 = U_0 \cdot 7 = U_1 + U_2 + U_4 = 310 \text{ В}. \end{array} \right. \quad (3)$$

В связи с полученными результатами в качестве основной кривой выходного напряжения инвертора была выбрана СК с ЦС, равной $23\pi/140$ рад. Данная кривая обозначена как СК7у (ступенчатая кривая семи ступеней уточненная) и ее график до начала расширения ЦС показан на рисунке 3, гармонический ряд (до начала расширения ЦС) на рисунке 4.

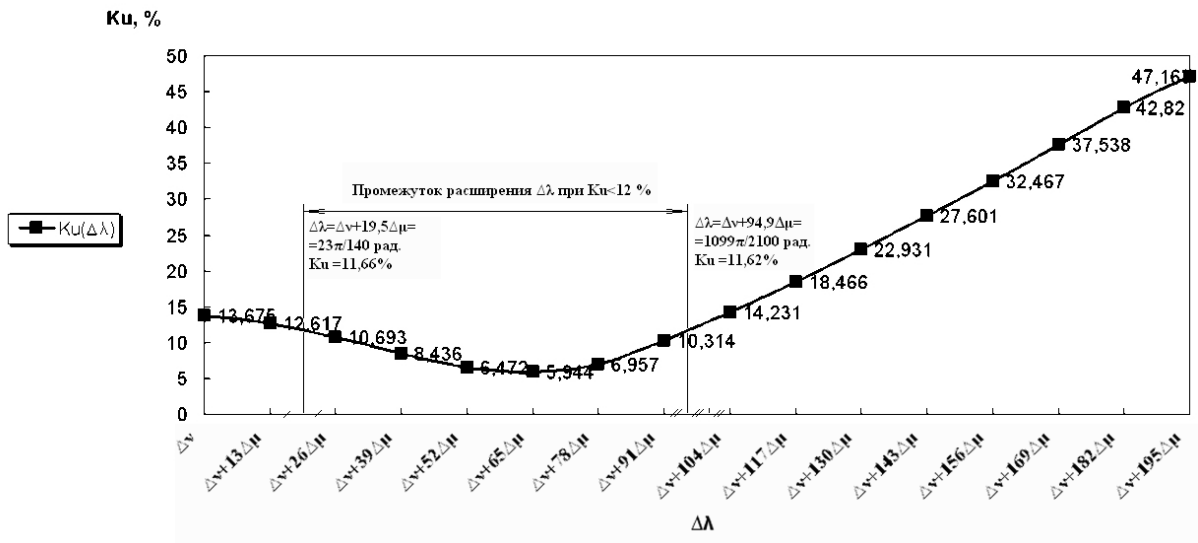


Рис. 2. Исследование зависимости $Ku(\Delta\lambda)$ СК7 при $n=840$, $\Delta\nu=\pi/14$, $\Delta\mu=\pi/210$, $k = \{1, 3, 5, 7 \dots 43\}$. Показан промежуток расширения $\Delta\lambda$ при $Ku < 12\%$

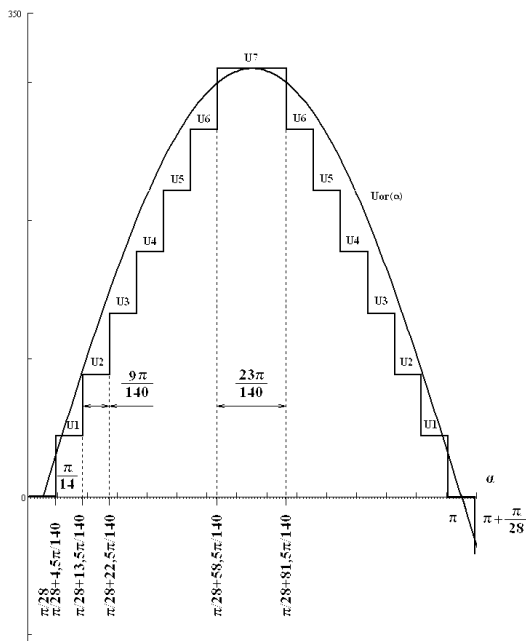


Рис. 3. Полупериод ступенчатой кривой СК7у. Одно малое деление графика соответствует $\pi/140$, большое деление – $\pi/14$. $U_{ог}(\alpha)$ – огибающая синусоидальная кривая

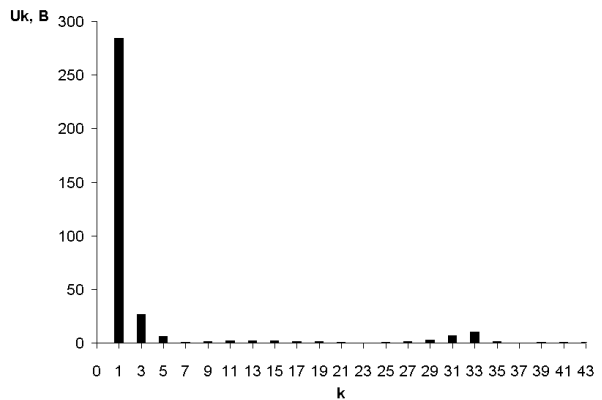


Рис. 4. Гармонический ряд СК7у

2. Выбор программной среды имитационного моделирования СМ-инвертора, МФЭП и нагрузки

Для составления модели СМ-инвертора (согласно блок-схеме рисунка 1) выбрана программная среда имитационного моделирования Proteus ISIS. Данная СИМ разработана фирмой Labcenter Electronics (Великобритания) и представляет собой систему схемотехнического моделирования, базирующуюся на основе моделей электронных компонентов принятых в PSpice (разработана на основе ядра PSpice3F5 университета Berkeley) [6, 7].

Вышеназванная СИМ выбрана по следующим причинам:

1) в отличие от существующих программных аналогов, основные из которых Electronics Workbench, Proteus ISIS, MatLAB Simulink, LTspice, Multisim, Microcap, позволяет моделировать работу контроллеров и элементов реально существующих электронных компонентов (имеет более 6000 аналоговых и цифровых моделей устройств (примитивов) [3]); удобство в моделировании и программировании контроллеров; в числе прочих моделей контроллеров имеются следующих типов: ATmega, 8051, ARM7, AVR, Motorola, PIC, MSP430, Basic Stamp;

2) программа имеет интуитивно понятный интерфейс; библиотека примитивов СИМ содержит справочные данные;

3) имеется возможность моделировать монтажные платы исходя из собранных схем; каждый примитив содержит данные собственных габаритно-размеров.

3. Разработка модели СМ-инвертора

Подходы к построению схем СМ-инверторов можно условно разделить на два: 1) совмещение модулятора и моста (рис. 5а) [1, 2, 8, 9]; 2) разделение модулятора и моста. Здесь под модулятором подразумевается блок, включающий/отключающий источники напряжения (тока) от блока моста (рис. 5б).

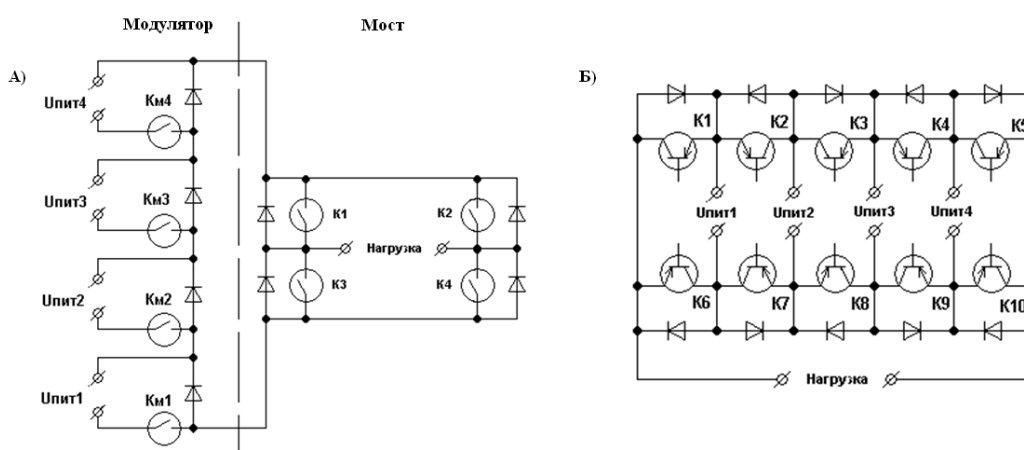


Рис. 5. Блок-схема СМ-инвертора (для четырех источников питания):

а) с разделением модулятора и моста; б) с совмещением модулятора и моста

В качестве общей схемы построения СМ-инвертора выберем схему рисунка 4а), т.к. для ее построения необходимо меньшее количество силовых ключей.

С учетом изложенного была разработана принципиальная электрическая схема и соответствующая модель СМ-инвертора в СИМ Proteus ISIS. Элементы схемы выбраны исходя из имеющейся базы примитивов СИМ и согласно условиям прохождения токов и соответствия параметров допустимых напряжений силовых ключей инвертора.

Управление силовыми ключами осуществляет контроллер (выбран микроконтроллер ATmega8) согласно разработанному алгоритму [10]. Инвертор может работать в следующих режимах: 1) без стабилизации – только формирование СК7у; б) стабилизация выходного напряжения методом ШИМ; в) стабилизация выходного напряжения методом включения четвертого источника; г) стабилизация выходного напряжения методом ШИМ и включением четвертого источника.

Принципиальные схемы модулятора и моста в СИМ Proteus ISIS приведены на рисунках 6 и 7.

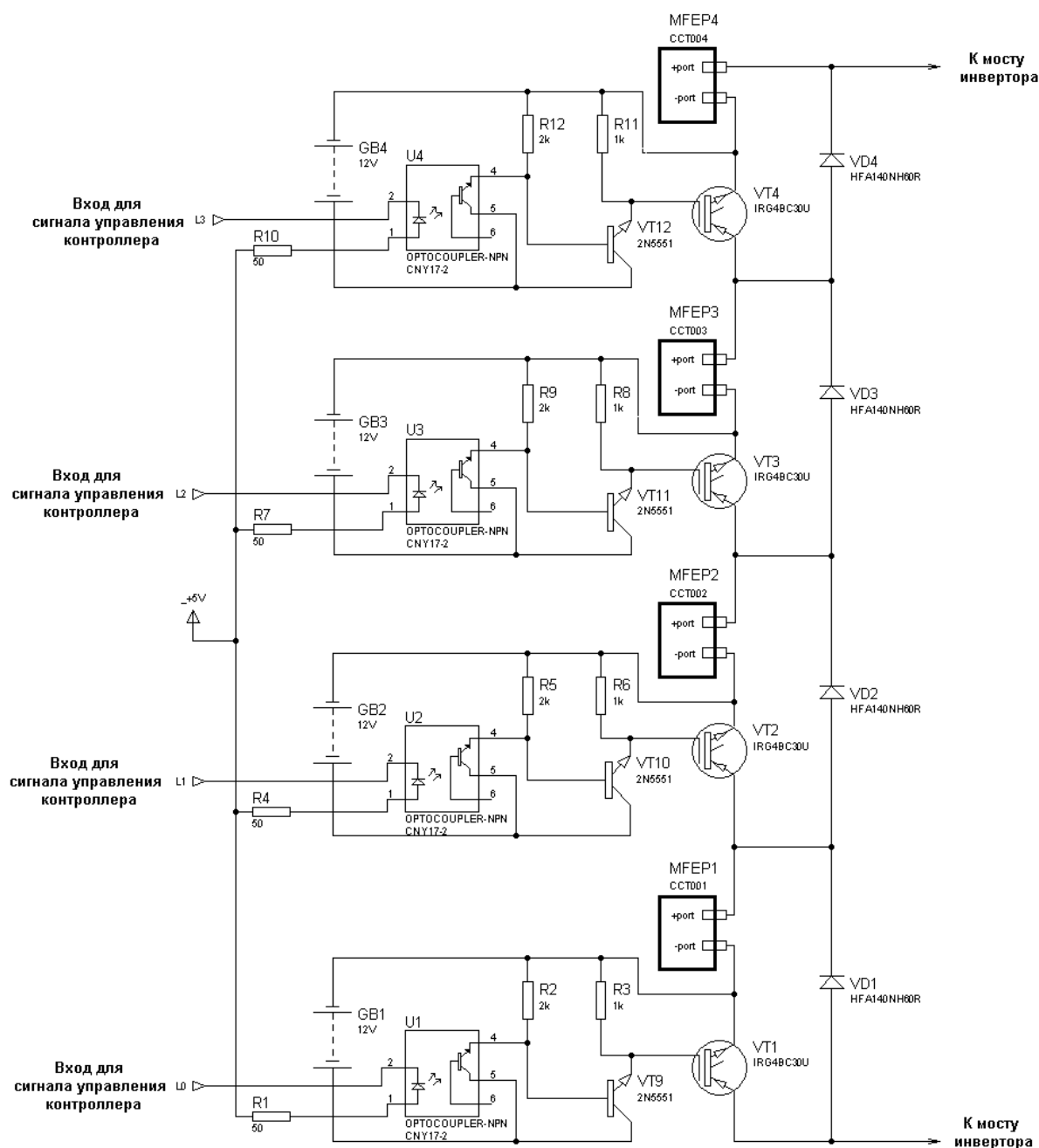


Рис. 6. Принципиальная схема модулятора с блоками МФЭП в СИМ Proteus ISIS

4. Разработка моделей МФЭП и нагрузки

Методики, позволяющей моделировать МФЭП необходимого напряжения и мощности (т.е. произвольно заданных), имеющих такие же ВАХ, как у современных образцов, при рассмотрении источников найдено не было. В СИМ Proteus ISIS модельного примитива МФЭП нет.

Разработка моделей МФЭП производилась с учетом выявленных закономерностей отношений токов коротких замыканий к номинальным токам и отношений напряжений холостого хода к номинальным напряжениям современных образцов. При этом ВАХ была заменена двумя эквивалентными прямыми (рис. 8).

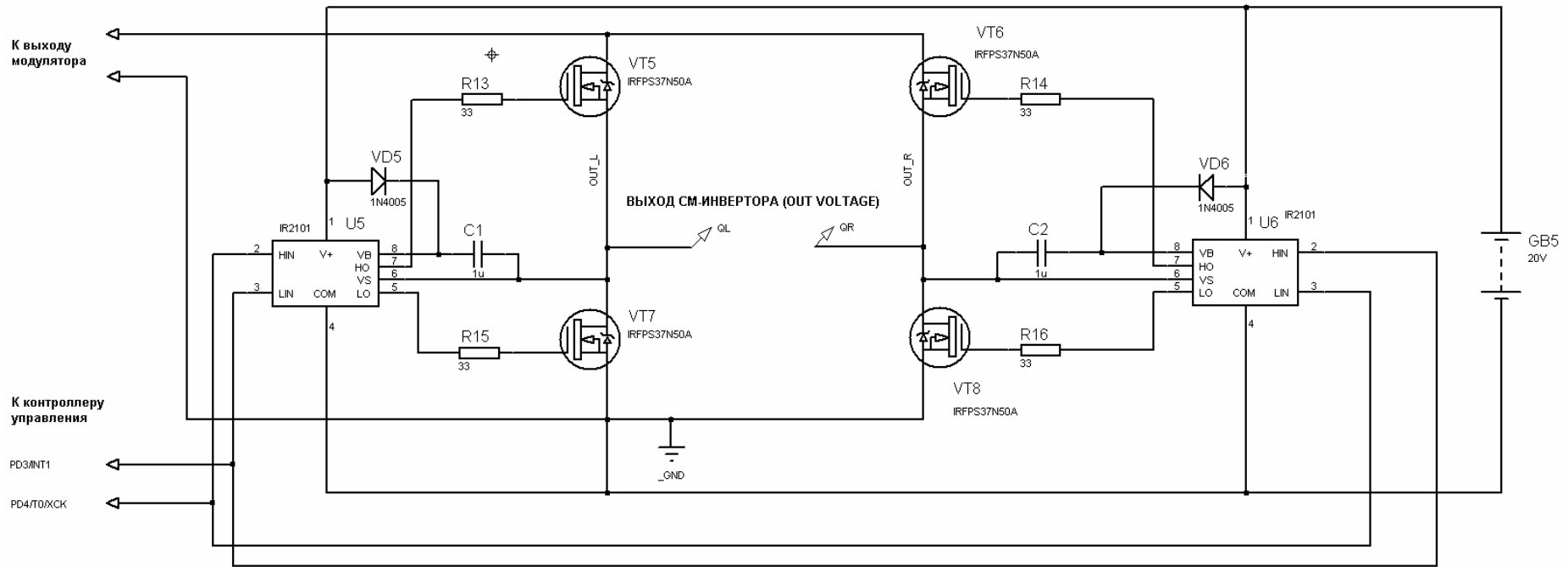


Рис. 7. Принципиальная схема моста СМ-инвертора в СИМ Proteus ISIS

