

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования**

**«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО
ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ В
ПОГРАММНОЙ СРЕДЕ *NI Multisim 14.0***

**Методические указания к
лабораторной работе**

Казань 2024

УДК 621.314(075.8)

ББК 31.264.5я73

К 83

К 83

Исследование автономного инвертора напряжения в программной среде *NI Multisim 14.0*: учебное пособие / сост.: В.И.Кротов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2024. – 30 с.

Методические указания к лабораторной работе знакомит студентов с автономным инвертором напряжения. В ней изучаются физические принципы построения инверторов напряжения, принцип действия, теоретический расчет, особенности моделирования в программной среде *NI Multisim 14* и гармонический анализ выходного сигнала инвертора.

УДК 621. 314(075.8)

ББК 31.264.5я73

Исследование автономного инвертора напряжения в программной среде *NI Multisim 14.0*

Введение

В настоящее время возрастает необходимость многократного преобразования электроэнергии с целью получения таких ее параметров, которые требуются нагрузке и которые, как правило, отличаются от параметров промышленной сети. Для этого применяются полупроводниковые преобразователи одного вида электрической энергии в другой.

Целью данной лабораторной работы является изучение устройств, преобразующих электроэнергию постоянного тока в энергию переменного тока, которые называются автономными инверторами (АИ). Они нашли широкое применение в электроприводе, в системах генерирования электроэнергии, в транспорте, возобновляемой энергетике и т.д.

Так как вентили в инверторах (транзисторы, тиристоры) работают в ключевом режиме, то, естественно, выходное напряжение имеет прямоугольную форму. Но для многих устройств требуется синусоидальное напряжение, поэтому инвертор должен уметь формировать с помощью фильтров выходное напряжение синусоидальной формы.

Наибольшее распространение среди инверторов получили автономные инверторы напряжения (АИН). Их отличительными свойствами являются жесткость внешней характеристики, независимость выходного напряжения от значения и характера нагрузки, возможность работать в режиме холостого хода. Иными словами, АИН по отношению к нагрузке ведет себя как источник ЭДС, т.е. выходное сопротивление инвертора близко к нулю.

Целью освоения дисциплины «Энергетическая электроника» является: изучение схемотехники и методов расчета силовых преобразовательных устройств для использования в их проектировании.

В результате освоения дисциплины «Энергетическая электроника» обучающийся должен:

знать: порядок расчета процессов, протекающих в электронных компонентах, цепях и устройствах; основы математических приемов обработки и представления экспериментальных данных при измерении характеристик устройств. Основы сбора, необходимой для расчетов устройств информации о параметрах электронных компонентов: систему параметров и их обозначений, включая принятые в зарубежной практике; порядок работы со справочной литературой и сайтами производителей электронных компонентов и устройств (в том числе знакомство с меню сайтов, заметками

по применению). Средства автоматизации проектирования для расчета узлов и устройств;

уметь: решать задачи анализа и расчета электронных компонентов, цепей и устройств; использовать математические приемы обработки и представления экспериментальных данных при измерении характеристик устройств. Работать с необходимой для расчетов устройств информацией о параметрах электронных компонентов: пользоваться справочной литературой и сетью Интернет для поиска информации о параметрах и характеристиках компонентов; выбирать компоненты по главным и критическим параметрам и характеристикам; сравнивать компоненты, выбирая оптимальные по совокупности качеств. Производить расчет и проектирование узлов и устройств с использованием средств автоматизации проектирования;

владеть: методами анализа и расчета узлов и устройств, методами математических приемов обработки и представления экспериментальных данных при измерении характеристик устройств. Навыками использования справочной литературы и сети Интернет для поиска необходимой для расчетов устройств информации; современными программными средствами моделирования базовых устройств и процессов их работы; строить модели узлов и устройств, осуществлять их моделирование. Навыками расчета и проектирования узлов и устройств в соответствии с техническим заданием с использованием средств автоматизации проектирования.

Принципы построения схем автономных инверторов

Автономные инверторы (АИ) – устройства, преобразующие постоянный ток в переменный с помощью электронных ключей и работающие на автономную нагрузку или сеть, в которой нет других источников электроэнергии. В этом главное отличие автономных инверторов от ведомых, в которых также выполняется преобразование постоянного тока в переменный, но работающих на сеть переменного тока.

Коммутация ключей в АИ реализуется с применением полностью управляемых вентилях или устройств искусственной коммутации. Коммутирующими устройствами чаще всего выступают запираемые тиристоры, а также *MOSFET*- и *IGBT*-транзисторы.

В АИ частота выходного напряжения задается частотой управления, а величина напряжения – характером и величиной нагрузки, и его схемой.

Все многообразие существующих схем автономных инверторов можно разделить:

- 1) на автономные инверторы напряжения (АИН);

- 2) автономные инверторы тока (АИТ);
- 3) автономные резонансные инверторы (АРИ).

По виду схем включения коммутаторов различают полумостовые, мостовые, со средней точкой трансформатора и другие схемы АИ.

По способу коммутации электронных вентилях различают АИ с индивидуальной, пофазной, групповой, общей; естественной и принудительной; параллельной и последовательной коммутацией и др.

По типу используемых электронных вентилях различают АИ с полууправляемыми вентилям и с полностью управляемыми вентилями (двухоперационный тиристор (ДОТ), *IGBT*, *MOSFET* и др.).

В АИН форма и значение напряжения на нагрузке практически не зависит от значения и характера нагрузки. АИН выступает как источник ЭДС и его выходное сопротивление стремится к нулю. Выходное напряжение на выходе АИН прямоугольной формы. Нагрузка может быть активной или активно-индуктивной.

АИТ для нагрузки выступает как источник тока, т.е. выходное сопротивление инвертора весьма велико. При этом значение и форма напряжения определяется характером нагрузки. Нагрузка может быть только активной или активно-емкостной, т.к. при активно-индуктивной нагрузке ток не может мгновенно изменить направление.

В АРИ нагрузка служит составной частью колебательного контура. В этом случае ток нагрузки близок к синусоидальной форме, а его значение практически не зависит от нагрузки, но зависит от параметров реактивных элементов колебательного контура и напряжения источника питания. Форма напряжения на выходе определяется нагрузкой.

При реализации автономных инверторов электронные ключи выступают связующим звеном, при котором на выходе АИ создается разнополярная импульсная форма напряжения или тока. Принципы получения из источника постоянного напряжения знакопеременного приведены на рисунке 1. Видно, что при поочередной попарной коммутации ключей K_1, K_3 и K_2, K_4 (рис. 1 а) и поочередной коммутации K_1, K_2 (рис. 1 б, в) к нагрузке R_n подводится напряжение источника питания E_d , но с разной полярностью. В схеме на рисунке 1 б источник питания разделен ($E_d/2$) и к нагрузке прикладывается напряжение либо $+E_d/2$, либо минус $E_d/2$, в зависимости от того, какой ключ замкнут в данный момент времени. В схеме (рис. 1 в) к нагрузке прикладывается напряжение $\pm E_d$ с учетом коэффициента трансформации трансформатора.

АИН питается от источника ЭДС, который наряду с малым внутренним сопротивлением должен проводить ток в обоих направлениях.

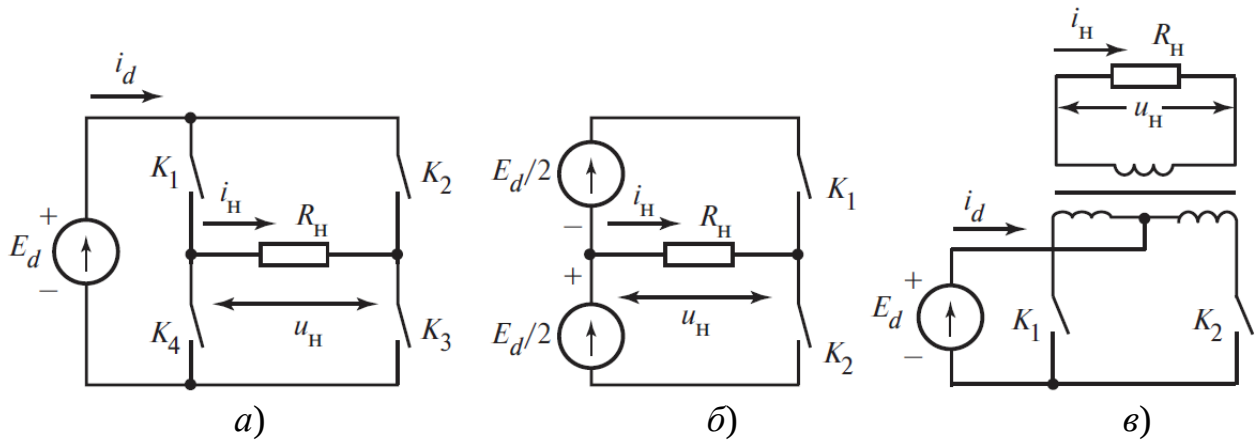


Рис. 1. Принципы получения знакопеременного напряжения на нагрузке

Эти условия для источника постоянного напряжения достигаются, если выход источника (вход АИН) зашунтировать большой емкостью, так как сопротивление большой емкости будет весьма мало. К тому же конденсатор защищает полупроводниковые элементы от перенапряжений, возникающих между источником питания и блоком коммутаторов. Наличие емкостного элемента на входе является отличительной особенностью АИН (рис. 2а).

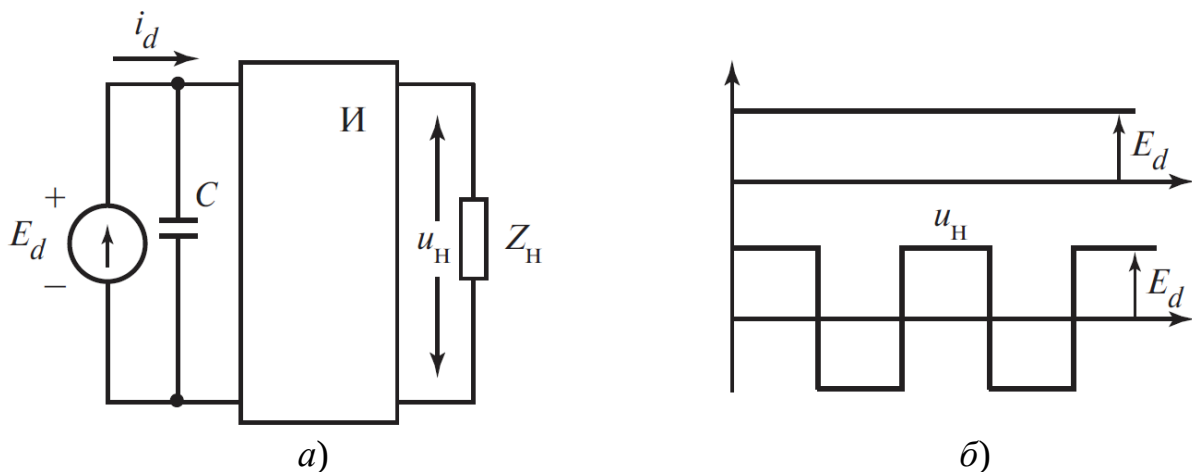


Рис. 2 Автономный инвертор напряжения и диаграммы напряжений

Напряжение на нагрузке определяется источником ЭДС E_d , имеет форму прямоугольных импульсов и не зависит от значения и характера нагрузки Z_H , потому что в любой момент времени нагрузка через коммутаторы инверторного блока И подключена к источнику ЭДС (рис. 2б).

В АИТ на выходе источника ЭДС (входе АИТ), чтобы ввести его в режим источника тока подключается достаточно большая индуктивность

(рис. 3а). Индуктивность имеет большое сопротивление $X_L = \omega L$ для переменной составляющей тока источника питания.

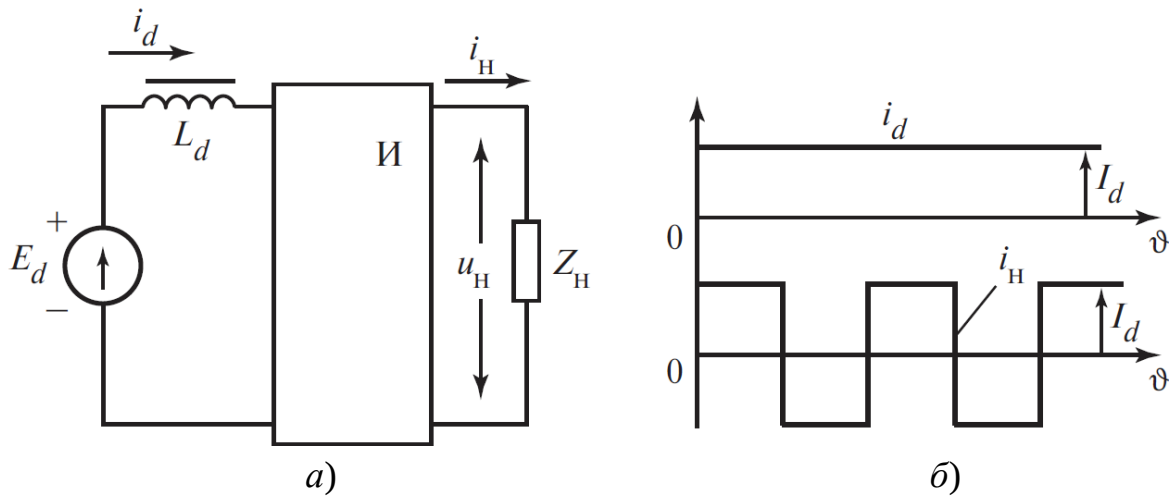


Рис. 3 Автономный инвертор тока и диаграммы токов

Коммутаторы инверторного блока И управляют током и изменяют его направление. Ток на нагрузке имеет форму прямоугольных разнополярных импульсов (рис. 3б). При активно-индуктивной нагрузке при изменении направления тока энергия, накопленная в индуктивности нагрузки, переходит в энергию конденсатора, включенного параллельно нагрузке. Таким образом, индуктивность на входе АИ и параллельно нагрузке подключенный конденсатор является отличительной особенностью АИТ.

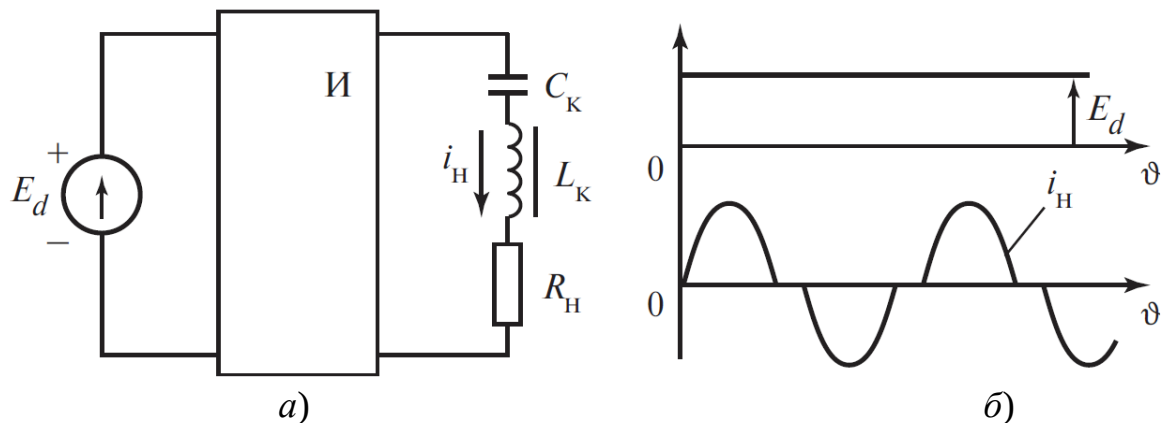


Рис. 4 Автономный резонансный инвертор и диаграмма источника ЭДС и тока на нагрузке

В АРИ конденсатор резонансного контура подключается параллельно или последовательно с нагрузкой (рис. 4а). Ток на входе и выходе

коммутирующей группы инвертора является прерывистым и его форма на полупериоде близка к синусоидальной (рис. 4б).

Автономный инвертор напряжения

В автономных инверторах напряжения ключи должны проводить в обоих направлениях. Ключи в прямом направлении должны быть управляемыми. В качестве управляемых ключей могут быть использованы биполярные или полевые транзисторы, однооперационные или двухоперационные тиристоры, *IGBT*-транзисторы.

Чтобы ключи проводили в обоих направлениях, их шунтируют диодами, подключая их во встречном направлении. Примеры шунтированных ключей приведены на рисунке 5.

Принципиальная схема однофазного мостового АИН приведена на рисунке 6. В качестве коммутирующих элементов использованы *IGBT*-транзисторы *VT1–VT4*, шунтированные обратными диодами *VD1–VD4*. Временные диаграммы токов и напряжений приведены на рисунке 7. Видно, что в зависимости от того, какой из элементов (*VT1* или *VD1*, *VT2* или *VD2*) левого плеча моста находится в проводящем состоянии, к точке а прикладывается либо положительный, либо отрицательный потенциал источника питания. Так же и к точке б прикладывается либо положительный, либо отрицательный потенциал источника, смотря какой из элементов (*VT3* или *VD3*, *VT4* или *VD4*) правого плеча моста проводит в данный момент.

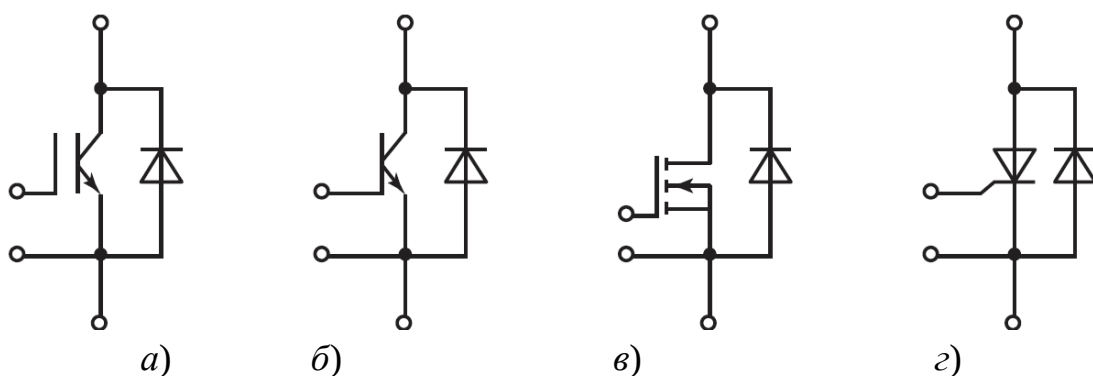


Рис. 5 Ключи с шунтирующими диодами

При периодической коммутации диагонально расположенных ключей к нагрузке будет прикладываться напряжение разной полярности. Действующее значение такого напряжения на нагрузке:

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E_d^2 d\vartheta} = E_d.$$

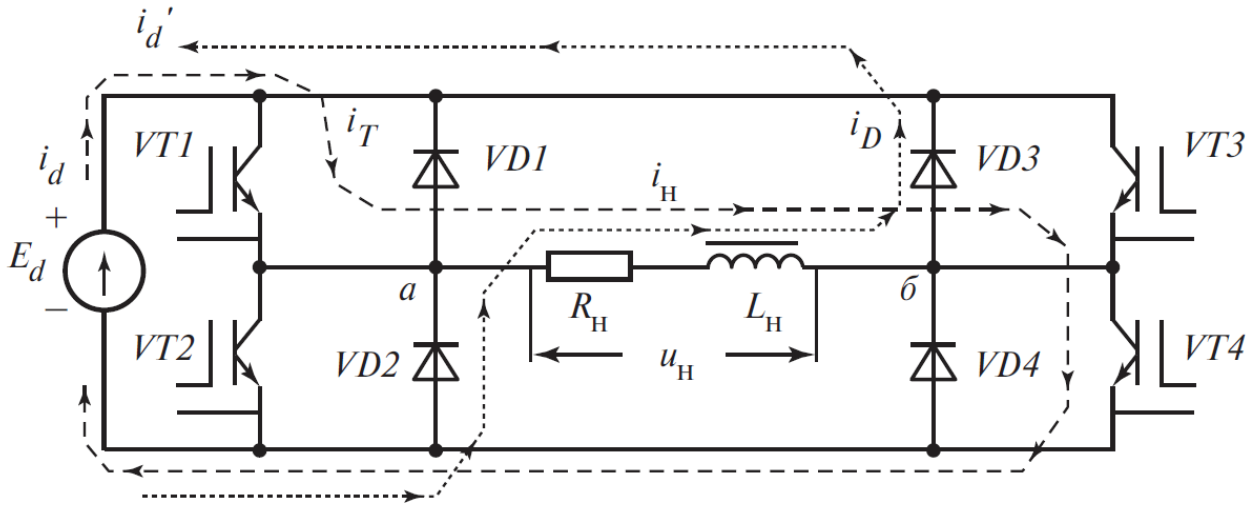


Рис. 6 Однофазный мостовой транзисторный АИН

При активно-индуктивной нагрузке ток нагрузки находится из уравнения Кирхгофа для замкнутого контура в дифференциальном виде:

$$\omega L_H \frac{di_H}{d\vartheta} + i_H R_H = \pm E_d, \quad (1)$$

где знак «+» будет при положительном потенциале на нагрузке на интервале от 0 до π . В противном случае правая часть отрицательная.

Решение дифференциального уравнения (1) в общем виде содержит принужденную $i_{пр}$ и свободную $i_{св}$ составляющие тока нагрузки и на участке от 0 до π имеет вид:

$$i_H = i_{пр} + i_{св} = \frac{E_d}{R_H} + A e^{-\vartheta/(\omega\tau)}, \quad (2)$$

где $\omega = 2\pi f_H$; f_H – частота выходного напряжения на нагрузке инвертора; $\tau = L_H / R_H$.

Постоянная интегрирования A определяется из условия непрерывности тока нагрузки и повторяемости его формы на каждом периоде в установившемся режиме. Ток в конце каждого полупериода равен по абсолютному значению току в начале полупериода, но противоположен по знаку (рис.7а). Тогда при $\vartheta = 0$, $i_H = -I_{H \max}$, а при $\vartheta = \pi$, $i_H = +I_{H \max}$.

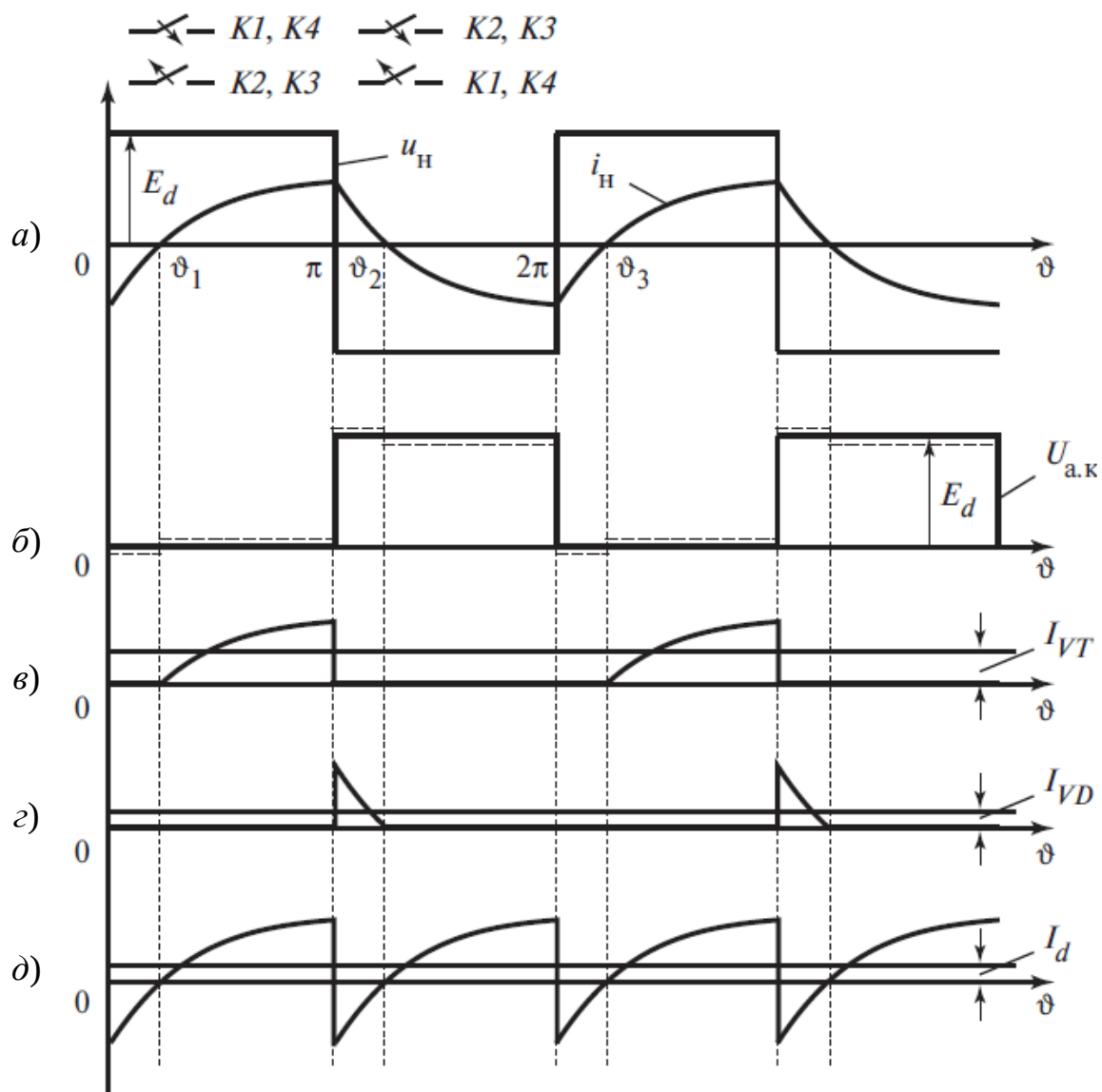


Рис.7 Временные диаграммы токов и напряжений однофазного мостового транзисторного АИН

Подставив начальные условия в уравнение (2) получим:

$$-I_{H \max} = \frac{E_d}{R_H} + A, \quad +I_{H \max} = \frac{E_d}{R_H} + Ae^{-\pi/(\omega\tau)},$$

откуда

$$A = -\frac{E_d}{R_H(1 + e^{-\pi/(\omega\tau)})}.$$

Тогда окончательно временная (угловая) зависимость тока нагрузки примет вид

$$i_H = \pm \frac{E_d}{R_H} \left(1 - \frac{2e^{-\vartheta/(\omega\tau)}}{1 + e^{-\pi/(\omega\tau)}} \right). \quad (1.6)$$

Знак плюс соответствует интервалу от нуля до π , в котором напряжение на нагрузке положительное.

Рассмотрим процессы, возникающие при коммутации транзисторов VT1-VT4 в схеме, приведенной на рисунке 6. На интервале от ϑ_1 до π (рис. 7а) в проводящем состоянии находятся транзисторы VT1 и VT4. Ток при этом протекает от плюса источника E_d , транзистор VT1, активно-индуктивную нагрузку, транзистор VT4 к минусу источника питания (рис. 6, штриховая линия). Угловая диаграмма тока одного из транзисторов приведена на рисунке 7б. В точке π система управления подает сигналы на открытие транзисторов VT2, VT3, а транзисторы VT1 и VT4 закрываются. Но транзисторы VT2 и VT3 не могут открыться, так как при индуктивном характере нагрузки ток не может скачком поменять значение и направление. Ток через нагрузку за счет ЭДС-самоиндукции индуктивности продолжает течь в том же направлении и это создает условия для открытия диодов VD2 и VD3. При этом ток через источник питания течет уже в обратном направлении (см. рис. 6, пунктирная линия). Полярность напряжения на нагрузке сразу меняется, т.к. точка а через диод VD2 подключается уже к плюсу источника, а точка б через VD3 подключается к плюсу источника питания.

В интервале от π до ϑ_2 энергия, накопленная в индуктивности нагрузки на предыдущем интервале, возвращается в источник питания. Ток нагрузки спадает до нуля. Угловая диаграмма одного из диодов приведена на рисунке 7г. В момент времени, соответствующем точке ϑ_2 , ток нагрузки изменяет свое направление, и открываются транзисторы VT2 и VT3. При этом полярность напряжения на нагрузке остается неизменной. Когда система управления подает сигнал на закрытие транзисторов VT2, VT3, они закрываются, но опять-таки ток мгновенно не может изменить свое направление, и индуктивность нагрузки создаст условия для отпираания диодов VD1 и VD4, что приведет к изменению полярности напряжения на нагрузке. Далее процессы повторяются.

С учетом диаграммы (рис. 76) среднее значение тока, протекающего через транзисторы:

$$I_{VT} = \frac{1}{2\pi} \int_{\vartheta_1}^{\pi} i_H d\vartheta.$$

Среднее значение тока, протекающего через один из обратных диодов, определяем, используя угловую диаграмму (рис. 72)

$$I_{VD} = \frac{1}{2\pi} \int_{\pi}^{\vartheta_2} i_H d\vartheta.$$

На транзисторе и его шунтирующем диоде падает небольшое напряжение, когда эти элементы находятся в проводящем состоянии. На транзисторе падает некоторое отличное от нуля положительное напряжение, а на его диоде некоторое отличное от нуля отрицательное напряжение. Это иллюстрирует диаграмма на рисунке 76 (пунктирная линия). Если бы эти элементы были идеальными, то падение напряжения на них равнялось бы нулю. Когда транзистор закрыт, то к напряжению источника E_d прибавляется напряжение открытого другого диода этого плеча или вычитается напряжение другого транзистора этого же плеча, который находится в открытом состоянии.

На этапе проводимости обратных диодов ток в источнике протекает в обратном направлении, происходит рекуперация энергии или иными словами – возвращение энергии, накопленной в катушке индуктивности в источник питания. Форма тока источника питания показана на рисунке 7д.

Если инвертор питается от управляемого выпрямителя, то на входе инвертора после выпрямителя обязательно должна быть подключена емкость (конденсатор). Если конденсатора не будет, то диоды выпрямителя на этапе рекуперации не пропустят ток в обратном направлении. Среднее значение тока источника питания определяется из диаграммы (рис. 7д):

$$I_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_H d\vartheta.$$

На практике на выходе АИН часто используются фильтры, которые приближают форму выходного напряжения, а значит, и выходного тока к

синусоидальной. В этом случае токи силовых ключей, обратных диодов и источника питания состоят из отрезков синусоид. Поэтому, как правило, расчет токов при выборе ключевых элементов можно проводить, используя метод основной гармоники, т.е. считать, что от инвертора потребляется синусоидальный ток. Это существенно облегчает расчет схемы.

Выходная характеристика АИН (рис. 8) достаточно «жесткая», т.е. напряжение на нагрузке очень слабо зависит от значения тока нагрузки.



Рис. 8 Выходная характеристика АИН

Небольшой спад характеристики определяется активным сопротивлением монтажных проводов и падением напряжения на открытом ключевом элементе инвертора.

Порядок выполнения лабораторной работы

Для реализации данной лабораторной понадобится программа Multisim (версия значения не имеет). В данной работе используем NI *Multisim* 14.0

В первую очередь необходимо создать схему. Для этого нажимаем правую кнопку мыши в любое место поля, нажимаем **Установить компонент (Place component)** или комбинацией клавиш *Ctrl* + *W* (рис. 1) и выбираем необходимые компоненты.

Данными действиями вызывается библиотека компонентов. Во вкладке Раздел (Group) выбираем Sources, а во вкладке Семейство (Family) выбираем POWER SOURCES, находим DC POWER и ставим на схему, нажимая ОК или Enter (рис.2). На панели появится элемент источника. По заданию требуется 12 В на источник, так что установим данное значение. Двойным щелчком по требуемому элементу вызываем меню «Свойства» (Properties), изменяем значение на 12 В как показано на рисунке (рис. 3). Готово, источник настроен.

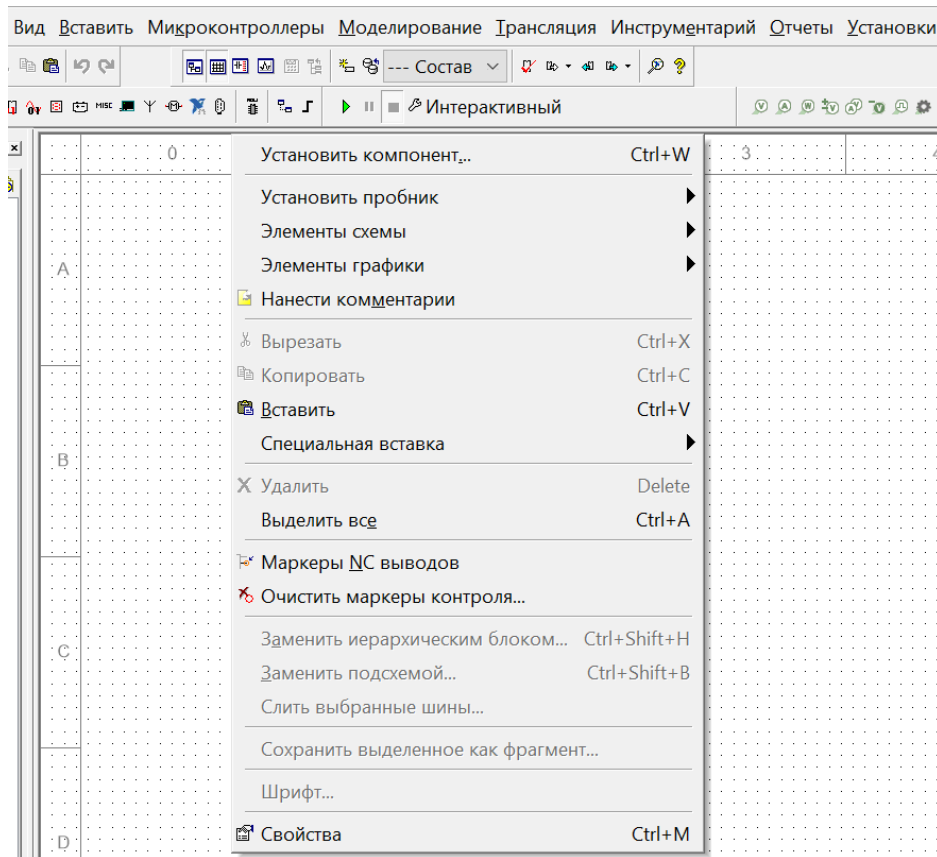


Рис. 1 Вызов библиотеки компонентов

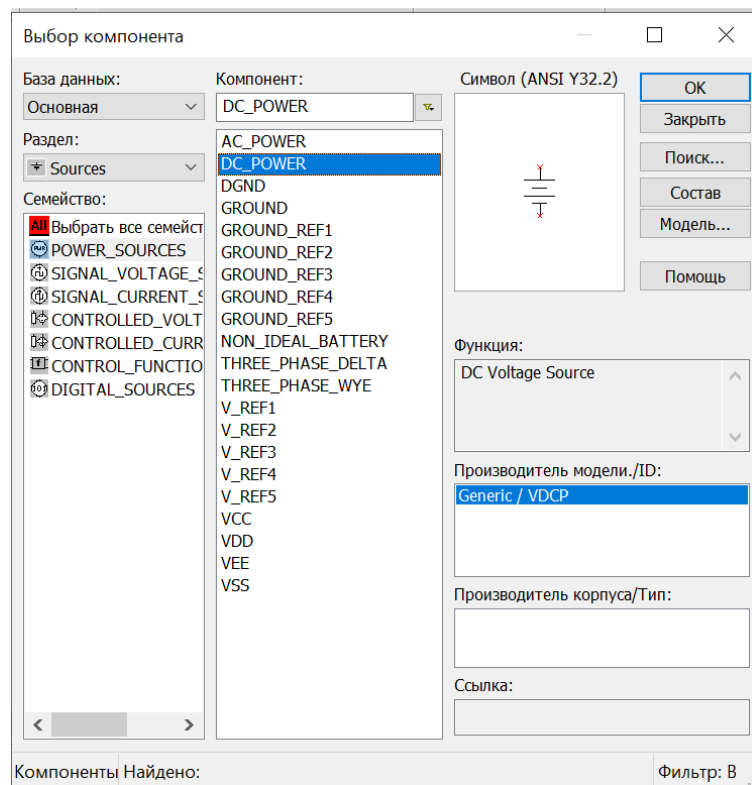


Рис. 2 Выбор источника питания

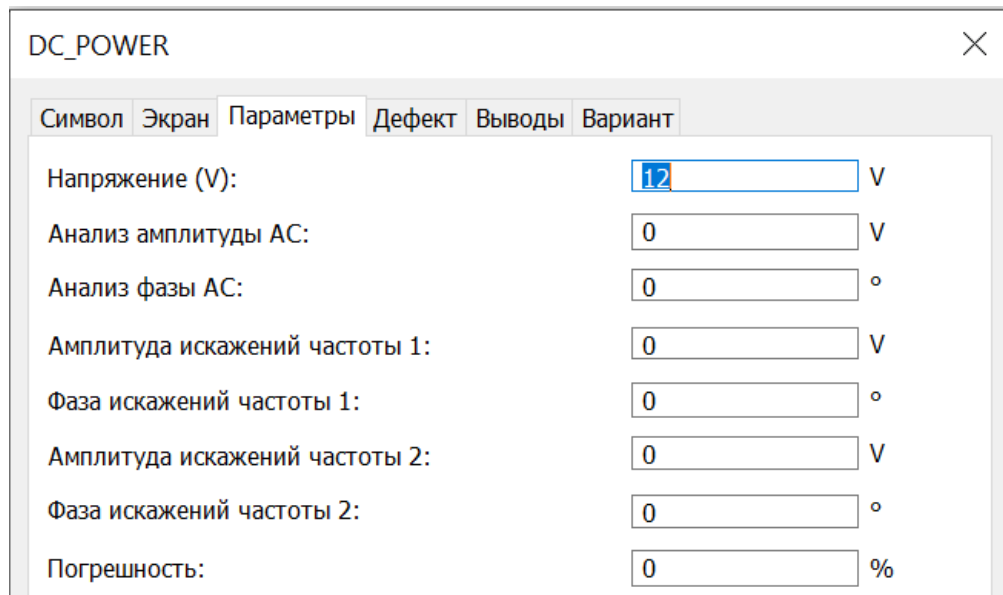


Рис. 3 – Установка в поле Voltage (V) значение в 12В

После установки источника питания, следует поставить импульсный источник напряжения (или PULSE VOLTAGE в библиотеке компонентов). Прodelываем те же действия, как и при установке источника питания, но во вкладке Семейство (Family) выбираем SIGNAL VOLTAGE SOURCES, далее находим PULSE VOLTAGE и ставим на схему четыре экземпляра (рис. 4)

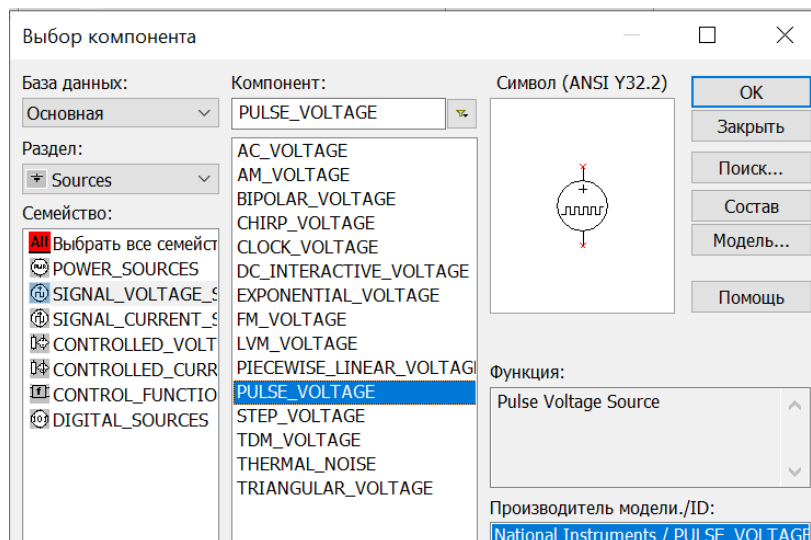
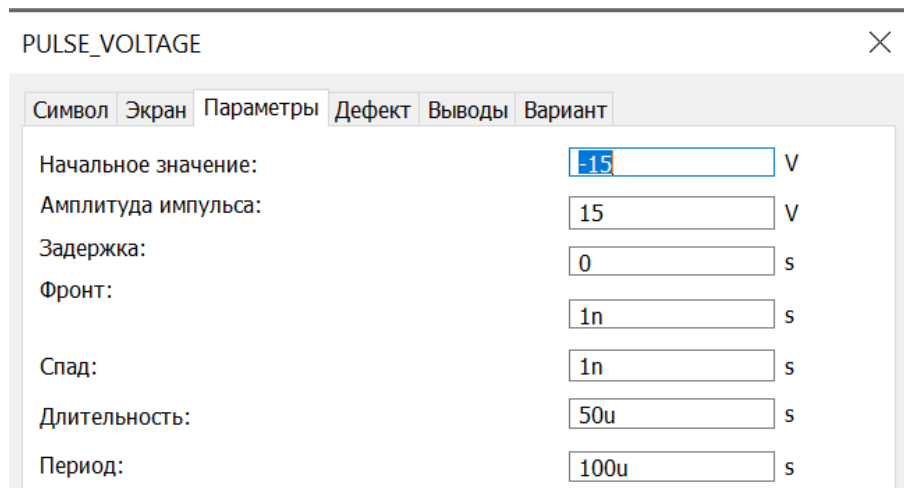


Рис. 4 Импульсный источник питания (ИИП)

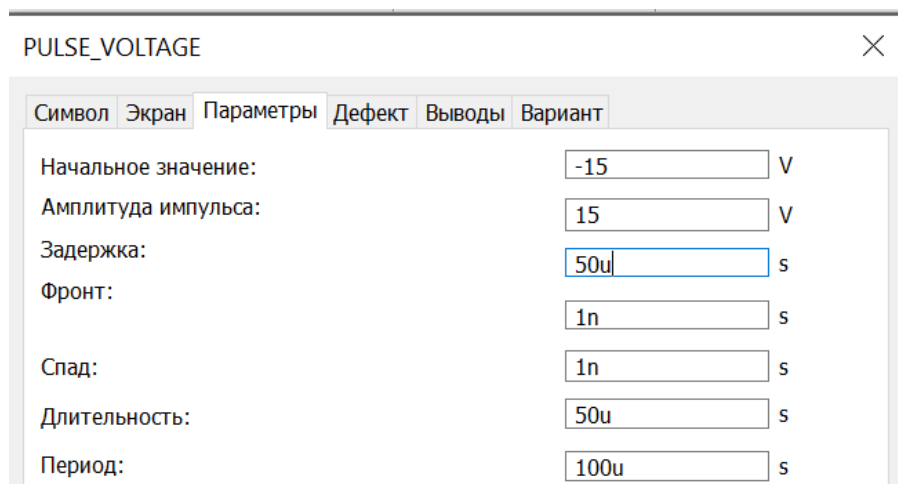
После установки элементов переходим к свойствам импульсного источника, аналогично предыдущему компоненту и устанавливаем следующие значения: у источников V2 и V5 устанавливаем амплитуды

импульсов -15 В и 15 В, значение периода (Period) ставим 100 мкс, ширину импульс Длительность (Pulse width) 50 мкс. В английской версии Multisim для установки значений порядка *мк* нужно заменить на *u*, то есть вместе 100 мкс пишем 100 us. Свойства показаны на рисунке 5а.

Для источников V3 и V4 устанавливаем те же значения, только добавляем в поле Задержка (Delay time) значения, равное половине периода. В данном случае это значение будет равняться 50 мкс (рис. 5б).



а)



б)

Рис. 5 Установка значений ИИП: а) для V2, V5; б) для V3, V4

Следующим шагом будет установка ключей. В данной лабораторной работе это транзисторы 2N7269. Вызываем библиотеку компонентов, во вкладке Раздел (Group) выбираем Transistors. Чтобы долго не искать по вкладкам в верхнем поле вводим нужную нам модель транзистора (рис. 6)

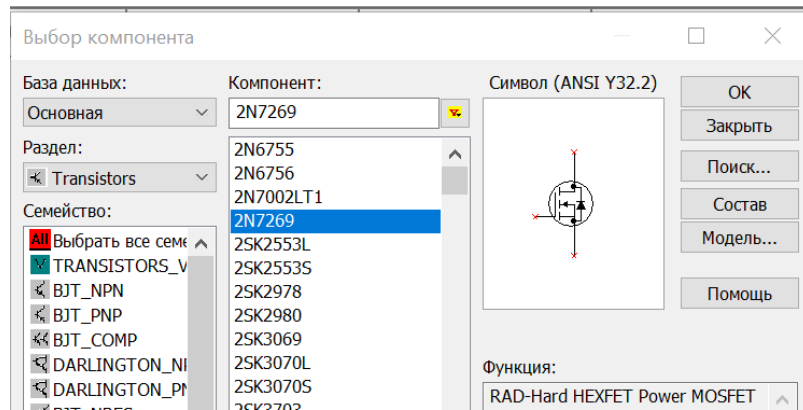


Рис. 6 Выбор транзистора 2N7269

Далее устанавливаем четыре таких транзистора, поворачиваем в нужном направлении (Правой кнопкой по транзистору и с помощью команд Развернуть (flip) и Вращение (rotate) разворачиваем как на рисунке 7).

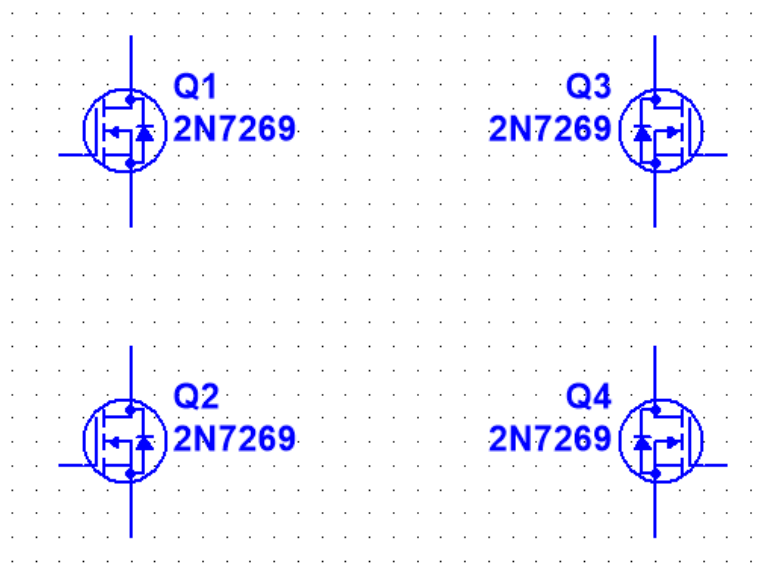
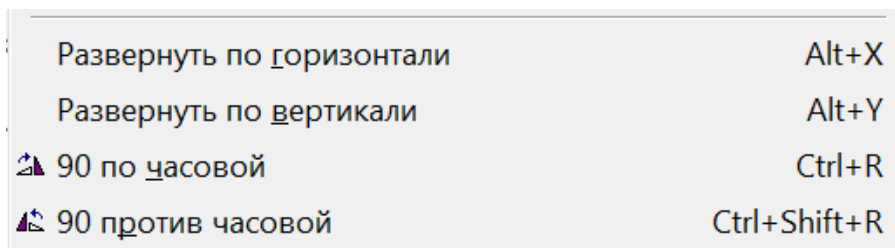


Рис.7 Установка транзисторов в правильное положение

Следующим шагом будет установка резисторов. Вызываем библиотеку и во вкладке Раздел (Group) выбираем Basic (рис.8а), далее нажимаем на

Resistor. Выбираем абсолютно любой резистор, его значение установим позже. Всего в данной работе 5 резисторов: четыре присоединяются к транзисторам, а один идёт на нагрузку.

Переходим к установке значений. Двойным нажатием ЛК выходит меню Свойства. Резисторы, присоединённые к транзисторам, имеют значение 2 Ом. Нагрузочное сопротивление устанавливаем на 10 Ом (рис. 8б)

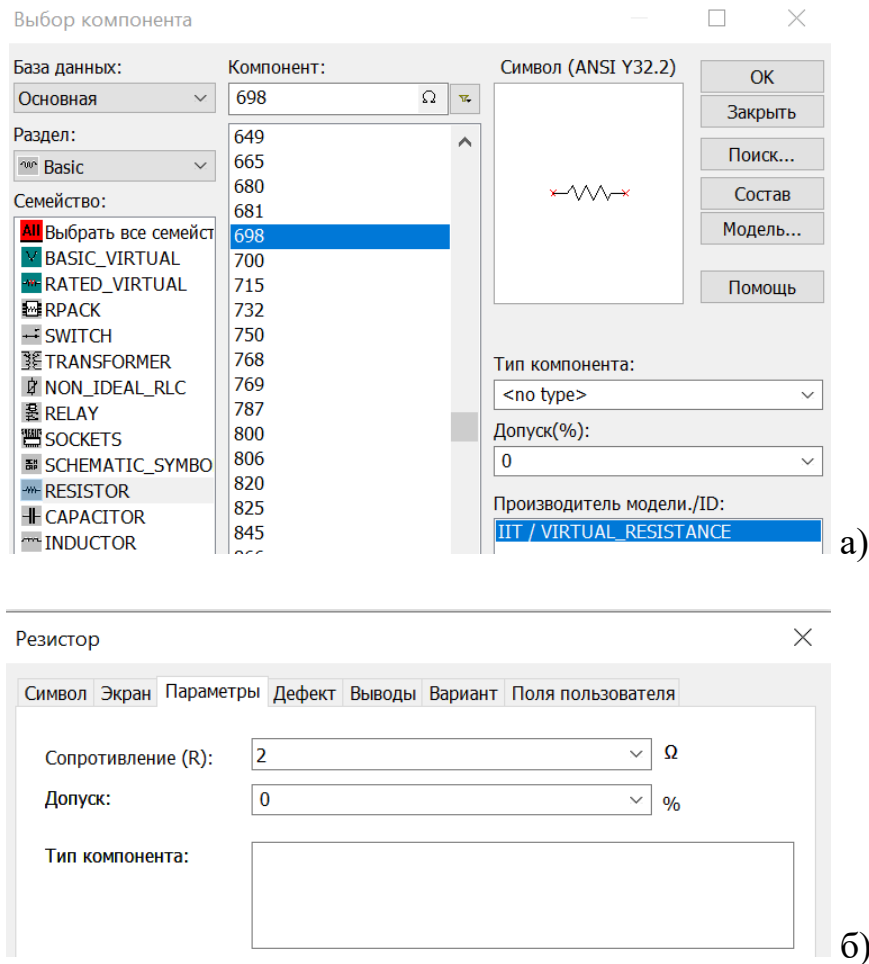


Рис. 8 Установка резисторов: а) Выбор резистора; б) установка значения

В нагрузке также должна присутствовать катушка индуктивности. В данной работе её значение равно 200 мкГн. Чтобы установить индуктивность на схему, вызываем библиотеку. Катушка находится в той же группе, где и резисторы. Выбираем Inductor и ставим на схему (рис. 9).

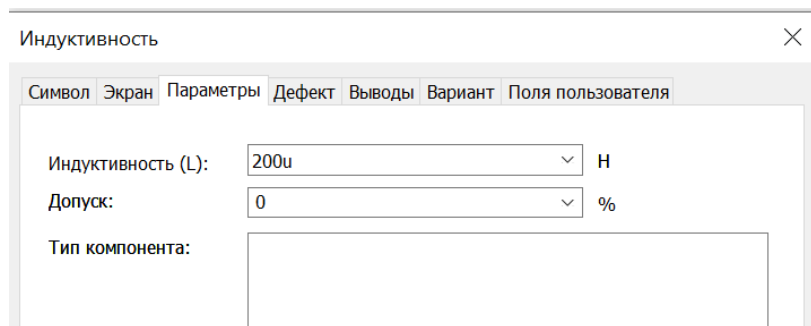
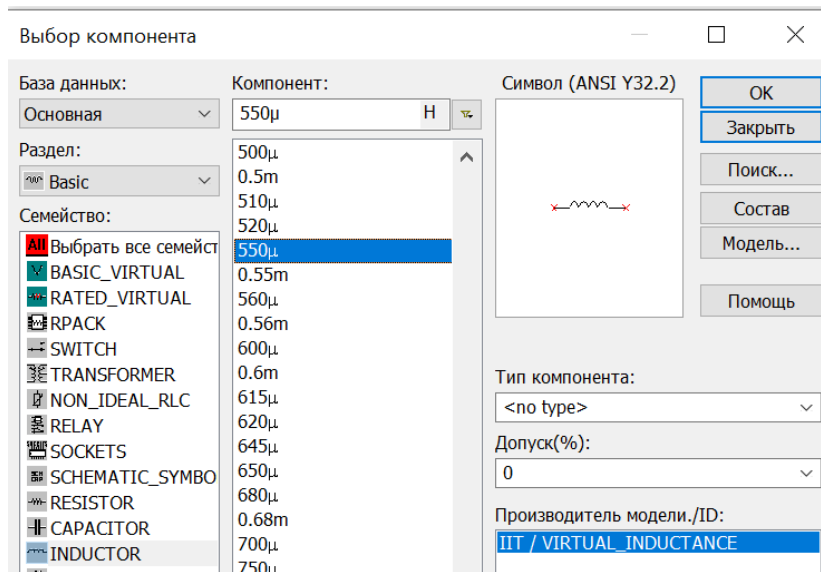


Рис. 9 Установка индуктивности

Для корректной работы схемы нужно поставить землю. Заходим во вкладку Раздел (Group), выбираем в Семействе (Family) вкладку POWER SOURCES и находим GROUND (рис. 10) и ставим в нижнюю часть схемы.

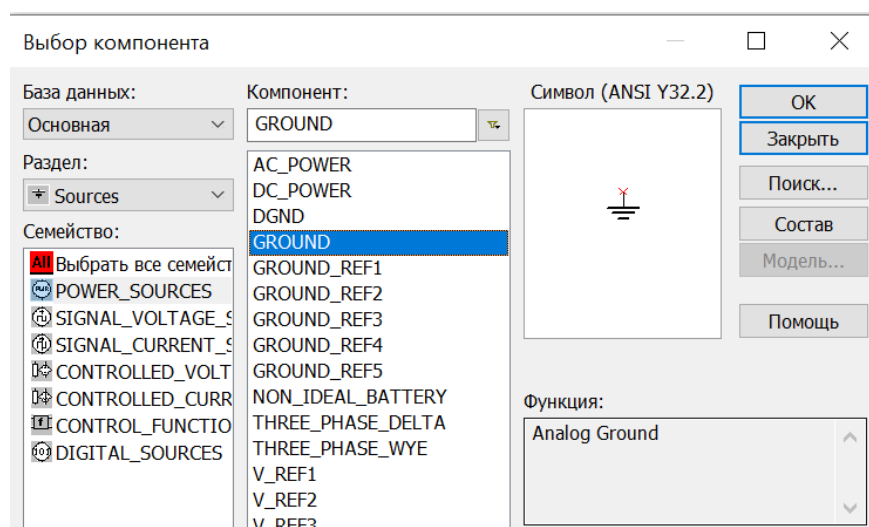


Рис. 10 Установка земли

Соединяем все элементы по схеме (рис. 11).

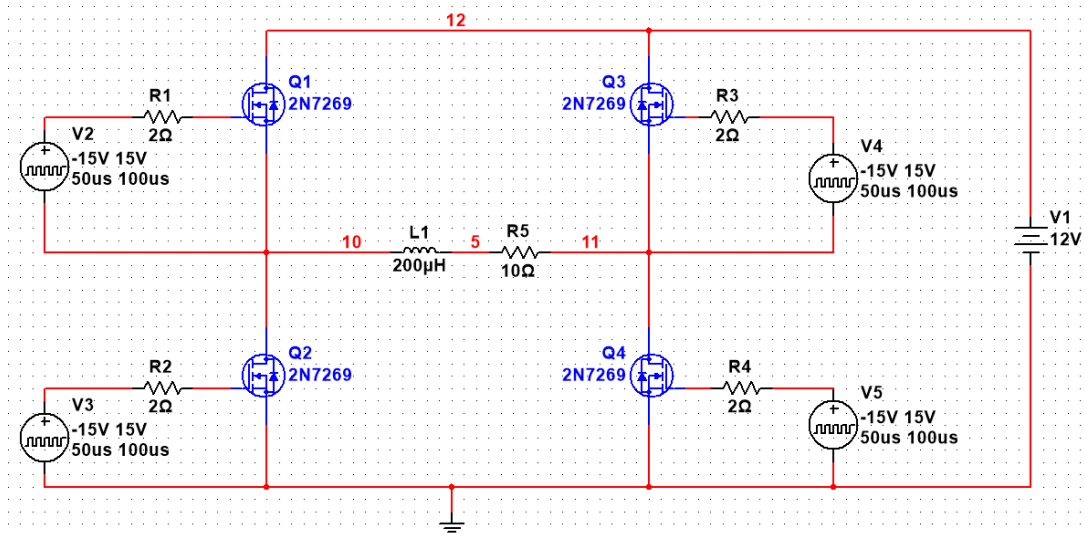


Рис. 11 Окончательный вариант сборки схемы.

Проведем анализ переходных процессов (Transient Analysis). Для начала нужно обозначить линии, подключённые к нагрузке. На рисунке 11 они обозначены как 10 и 11, но нет разницы как они обозначены. Если их не видно, то нажимаем два раза ЛК по линии и нажимаем Цепь (Show net name) (рис. 12).

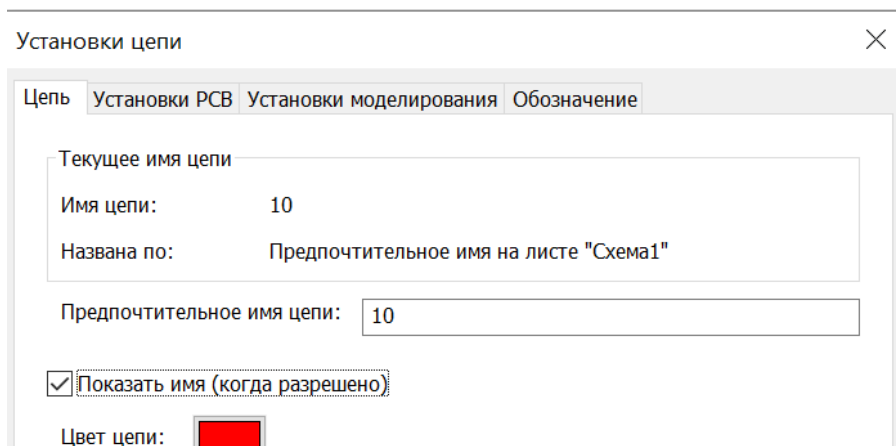


Рис. 12 Обозначение линий на схеме

Когда линии будут обозначены, переходим к следующему этапу. В верхней панели нажимаем Моделирование (Simulate) и выбираем Анализ и моделирование (Analysis and Simulation). Далее выбираем Анализ переходных процессов (Transient Analysis) и устанавливаем время Окончание (TSTOP) (End time), соответствующему минимальному значению, например, 0.001 с (рис.13).

Анализ переходных процессов

Параметры анализа | Переменные | Установки моделирования | Итоги

Начальные условия: Автоматическое определение начальных условий

Начало (TSTART): 0 Сек

Окончание (TSTOP): 0.001 Сек

☐ Длительность макс. шага (TMAX): Автоматическое определение начальной Сек

Установка короткого TMAX уменьшит погрешность, но увеличит время время моделирования.

☐ Начальный шаг (TSTEP): Автоматическое определение начальной Сек

Рис. 13 Установка времени

Так как нам нужно получить разность потенциалов между точками 10 и 11, то переходим во вкладку Переменные (Output) и нажимаем на Добавить выражение (Add expression) (рис. 14).

Анализ переходных процессов

Параметры анализа | Переменные | Установки моделирования | Итоги

Выходные переменные: Напряжение и ток

Переменные для анализа: Все переменные

I(L1)
 I(V1)
 I(V2)
 I(V3)
 I(V4)
 I(V5)
 V(1)
V(10)
 V(11)
 V(12)
 V(2)
 V(3)
 V(4)
 V(5)
 V(6)
 V(7)
 V(8)
 V(9)

> Добавить >

< Удалить <

Редактировать выражение...

Добавить выражение...

Фильтровать невыбранные...

Фильтровать выбранные...

Дополнительно

Добавить параметры...

Удалить выбранные

☒ По окончании моделирования показывать все параметры в контрольном листе

Выбрать для сохранения

Рис. 14 Переход во вкладку Переменные (Output) и определение разности потенциалов на нагрузке

Далее определим последовательность построения графиков напряжений и токов. Разность потенциалов находим во вкладке Напряжение и ток (Variables) и выбираем первую точку двойным нажатием ЛК. В данном примере это точка 10, поэтому выбираем V(10). В поле Все переменные (Expression) появится выбранное значение. Следующим шагом будет выбор нужной функции, поэтому переходим во вкладку Добавить выражение (Function) и выбираем «минус». Возвращаемся во вкладку Variables и выбираем вторую точку. В данном случае это точка 11, следовательно, выбираем V(11). В итоге получается $V(10) - V(11)$ (рис. 14). В версии NI Multisim 14.0, приведенной выше, все формируется во вкладке Добавить выражение.

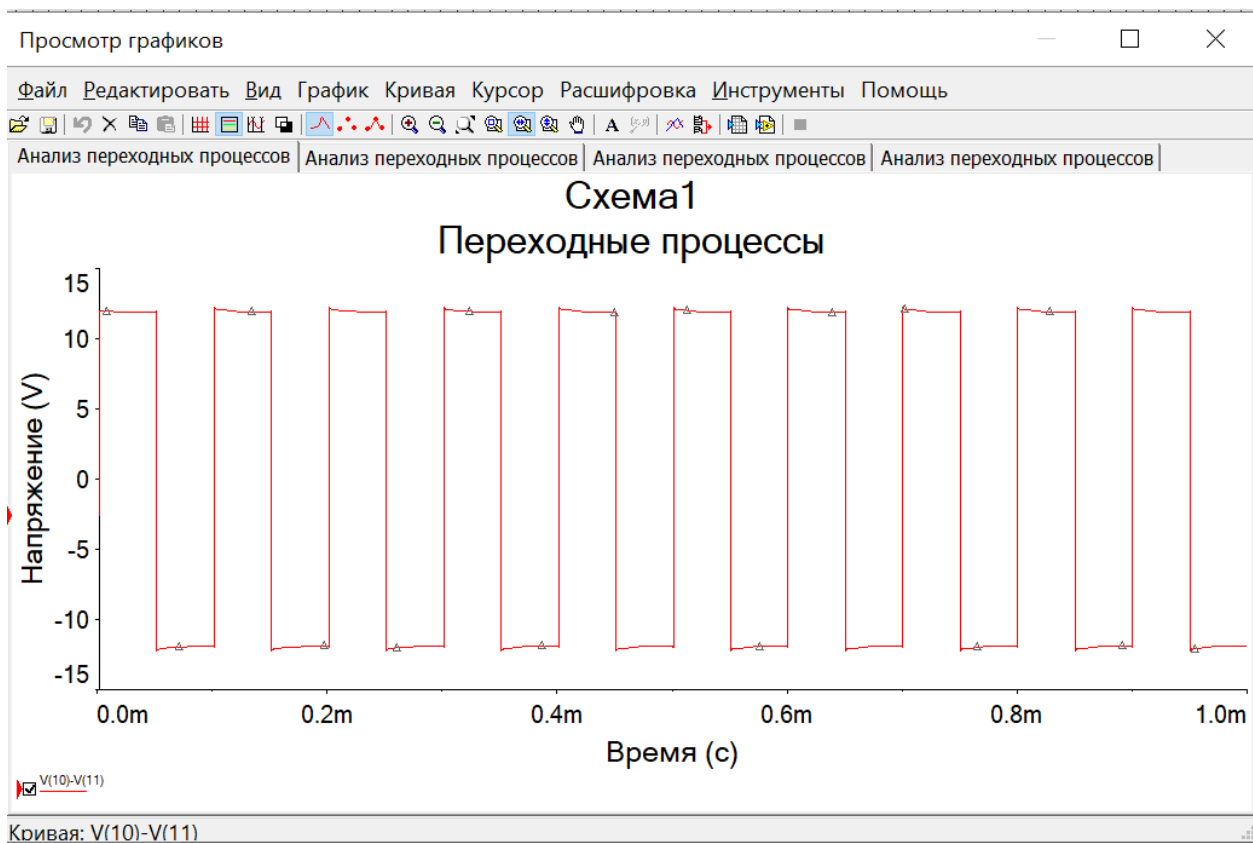


Рис. 15 Выходное (в нагрузку) напряжение инвертора

Нажимаем Пуск (Run) и получаем график, представленный на рисунке 15. Смотрим на значение напряжения на нагрузке: его верхние и нижние границы ограничены $\pm 12\text{В}$. Данное значение определяется питанием схемы, которое выбирается в самом начале.

Аналогично напряжению нужно проанализировать ток в активной нагрузке (рис. 16,17).

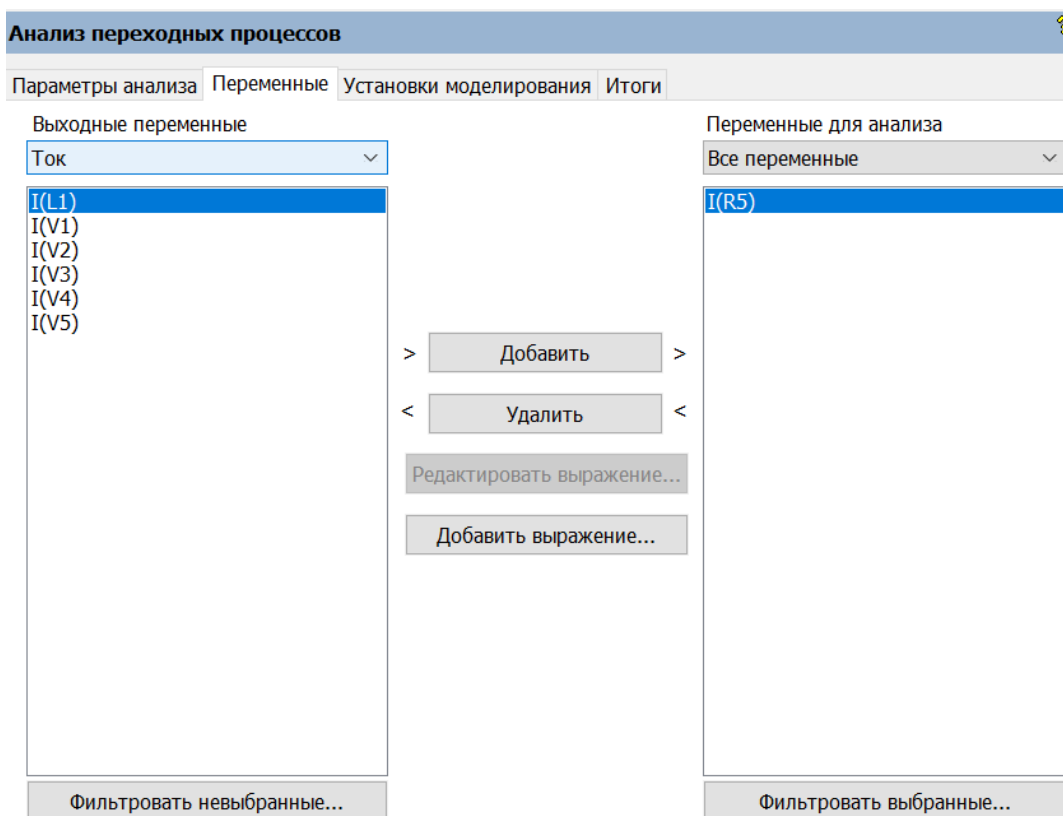


Рис. 16 Переход во вкладку Переменные (Output) и определение тока в нагрузке

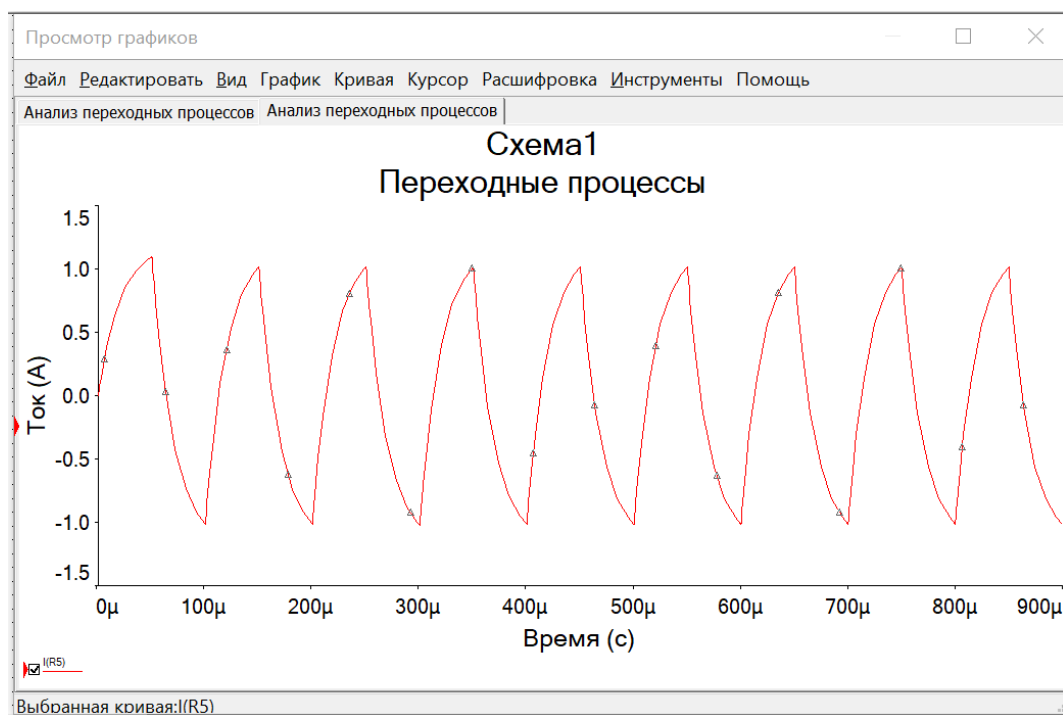


Рис. 17 Выходной (в нагрузке) ток инвертора

Для качественного объяснения и количественного измерения токов в цепях транзисторов, диодов и в шине источника питания введите дополнительно в схему на рисунке 11 сопротивления $R6$, $R7$, $R8$ (рис. 18).

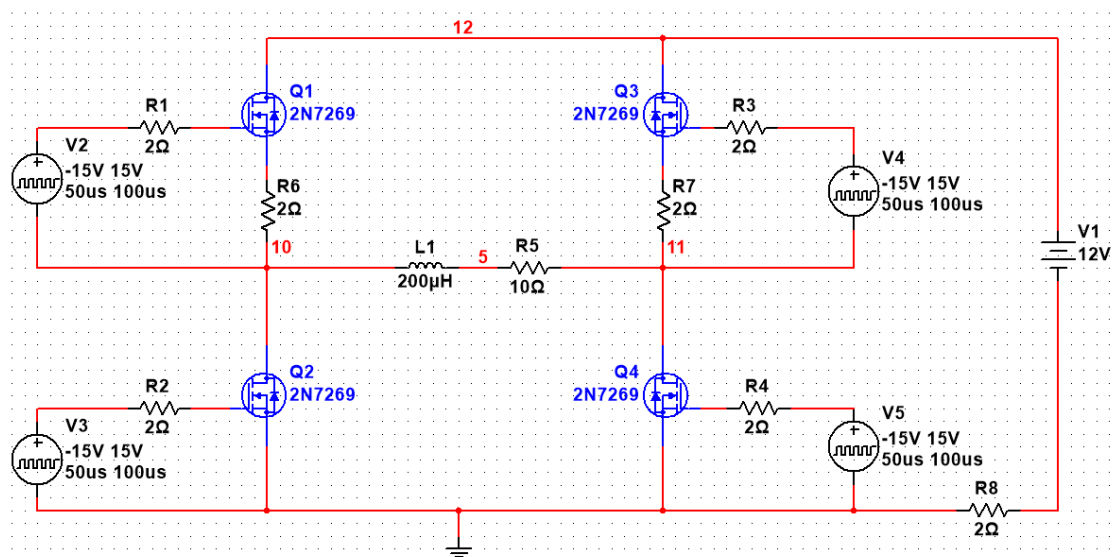


Рис. 18 Схема для определения токов

Во вкладке Переменные установите $I(R6)$ и $I(R7)$ (рис.19) и нажмите Пуск (рис. 20).

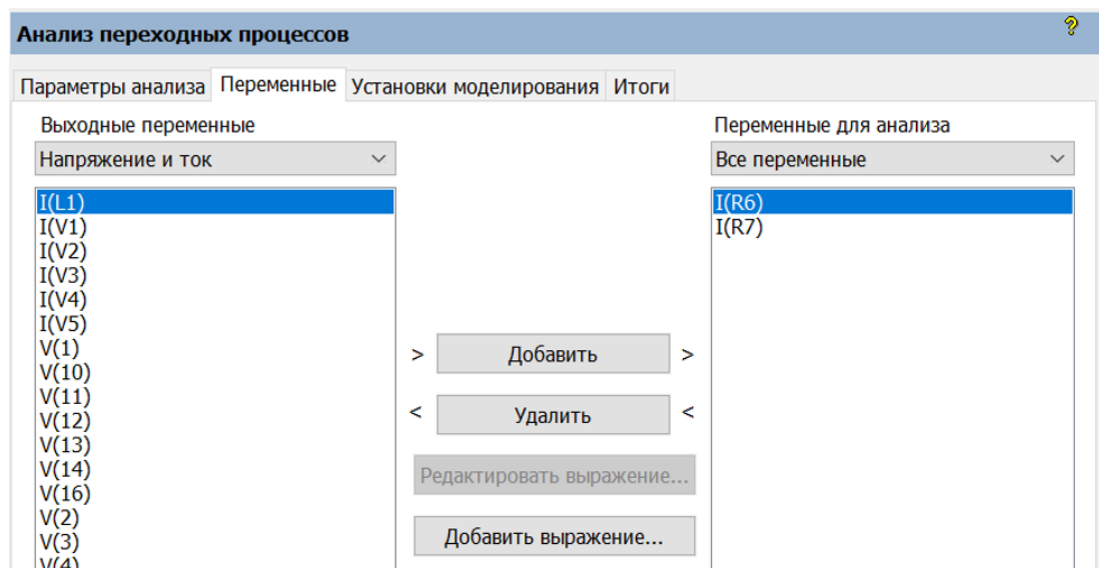


Рис. 19 Вкладка Переменные для определения токов

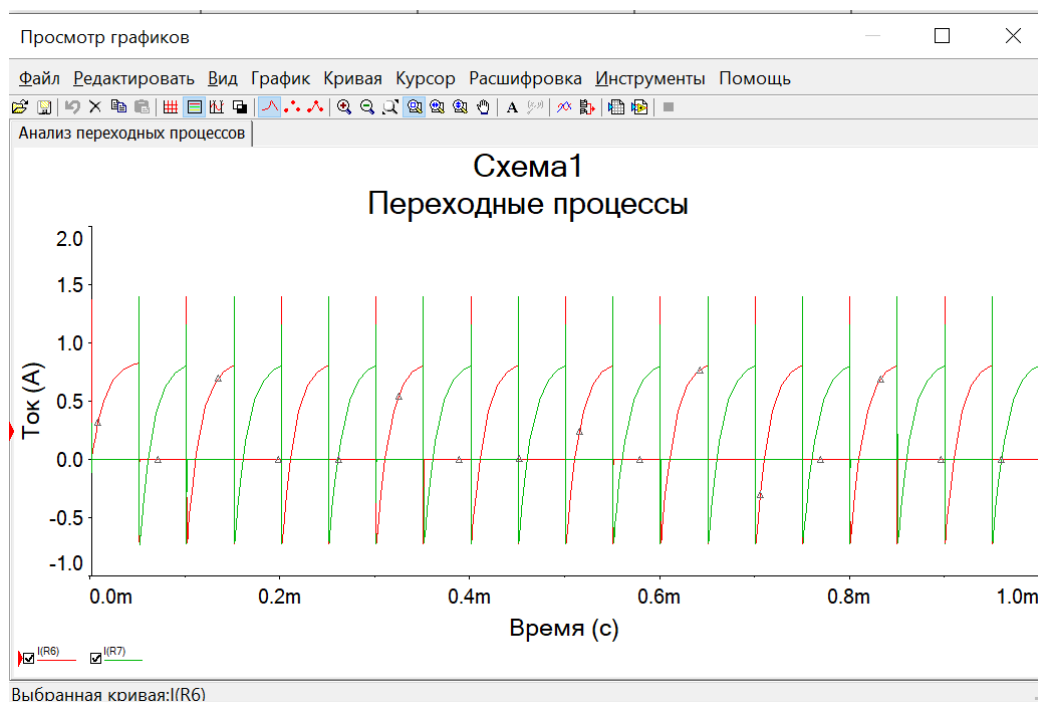


Рис. 20 Кривые токов ключа Q_1 (красная кривая) и ключа Q_2 (зеленая кривая)

Далее вернитесь во вкладку Переменные и установите $I(R8)$. Нажмите Пуск (рис. 21).

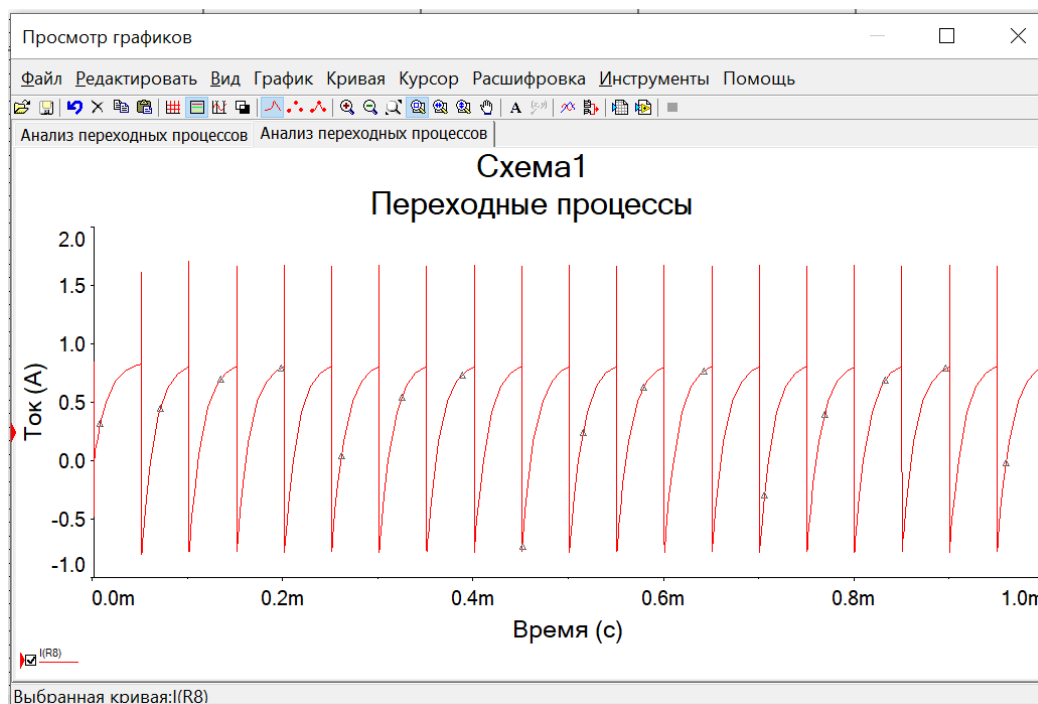


Рис. 21 Кривая тока в шине источника питания

Гармонический состав выходного сигнала инвертора (рис. 15) находится по локации: Моделирование → Анализ и моделирование → Анализ Фурье → Переменные. Так как преобразование Фурье в программе *NI Multisim* не работает с сигналом, полученным как разность потенциалов, то параллельно нагрузки подключаем трансформатор с $K_{Tr}=1$ (рис.22).

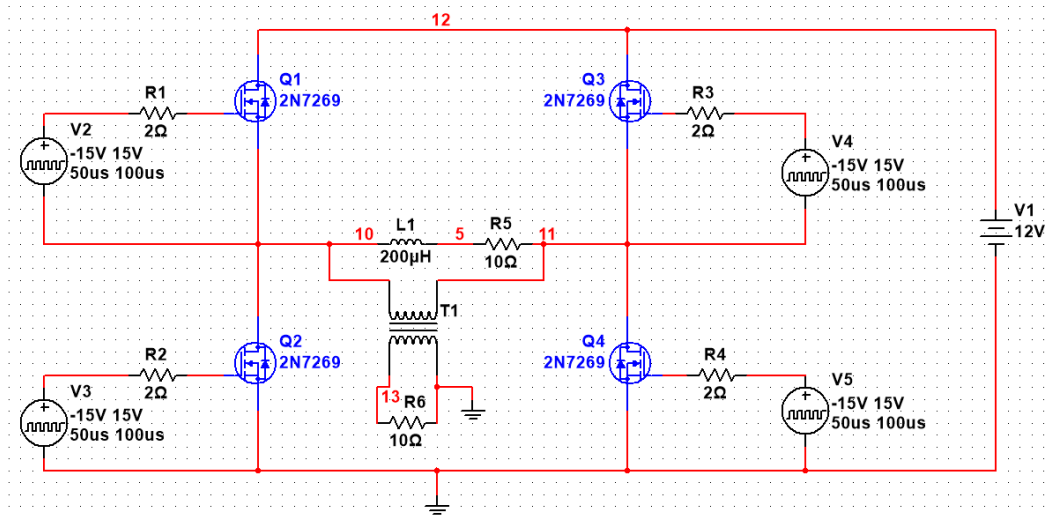


Рис. 22 Схема для Фурье-анализа выходного сигнала инвертора

Во вкладке Анализ Фурье настройки можно делать, используя кнопки Определить.

Анализ Фурье ?

Анализируемые параметры Переменные Установки моделирования Итоги

Параметры

Частота дискретизации (основная): 10000 Hz

Количество гармоник: 7

Период дискретизации (TSTOP): 9.44444e-005 сек

Результаты

☐ Отображать фазу Экран

☒ Отображать в виде гистограммы Шкала амплитуды

☐ Нормализовать график

Дополнительно

☐ Степень полиномиальности для интерполяции: 1

Частота выборок: 800000 Hz

Рис. 23 Анализируемые параметры

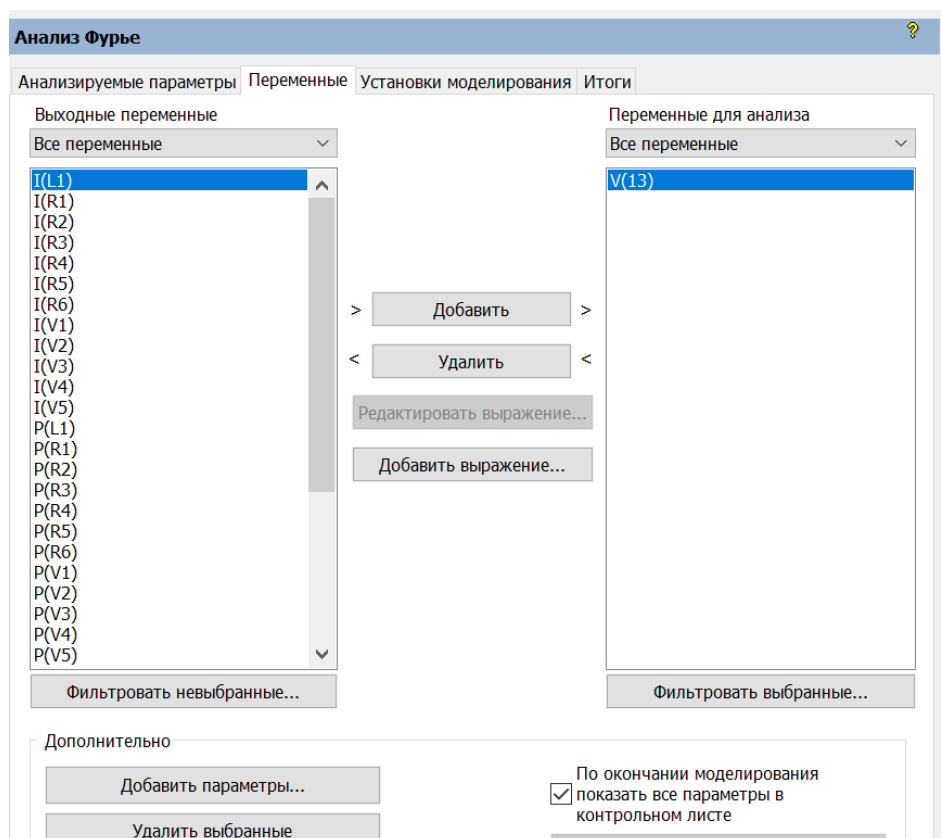


Рис. 24 Выбор переменной для Фурье -анализа

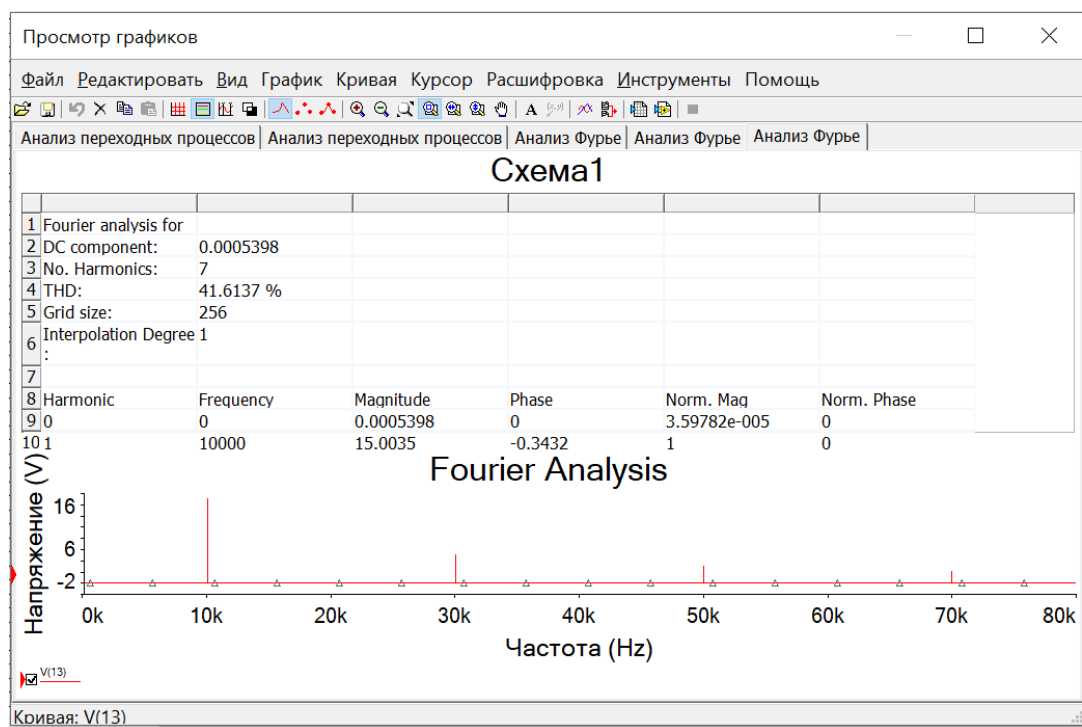


Рис. 25 Спектр выходного сигнала автономного инвертора напряжения

Лабораторное задание

1. Ознакомьтесь с теоретическими материалами по автономному инвертору напряжения.

2. Произведите моделирование схемы автономного инвертора напряжения с параметрами, предложенными преподавателем, по выше указанным рекомендациям.

3. Выбор ключей, проводящих в обоих направлениях может быть произвольным (управляемые тиристоры и диоды, транзисторы и диоды, сборки из транзисторов и диодов).

4. Вычислите средние и максимальные значения токов: нагрузки, источника питания и полупроводниковых элементов в выбранной Вами схеме, используя формулы решения уравнения (1).

5. Качественно объясните и произведите измерения полученных кривых токов в нагрузке и ключах. Сравните их с расчетными результатами.

6. Объясните качественно и количественно кривую тока в цепи источника питания.

7. Рассчитайте спектр выходного сигнала автономного инвертора используя ряд Фурье

$$U = \frac{4E}{\pi} \left(\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots \right).$$

8. Сравните расчетные амплитуды гармоник с измеренными.

Указания по оформлению отчета

Отчет о выполнении лабораторной работы каждый студент оформляет индивидуально. Отчет должен содержать:

– все использованные для настроек, исследования и измерений окна программной среды *NI Multisim*;

– результаты расчетных и экспериментальных данных.

Отчет в электронном виде прикрепляется к заданию в системе Moodle.

Вопросы для подготовки к собеседованию и контролю

1. Основной принцип работы автономного инвертора.
2. Виды автономных инверторов и их отличие друг от друга.
3. Приведите примеры получения знакопеременного напряжения на нагрузке.

4. Требование к источнику постоянного напряжения автономного инвертора.
5. Структура ключей в автономном инверторе напряжения.
6. Форма тока при активной нагрузке в автономном инверторе напряжения.
7. Форма тока при активно-индуктивной нагрузке в автономном инверторе напряжения.
8. Основные виды расчетов тока в автономном инверторе напряжения.
9. Гармонический состав кривой выходного напряжения автономного инвертора напряжения.
10. Приведите ряд Фурье для кривой выходного напряжения автономного инвертора напряжения.
11. Назовите коэффициент оценки качества выходного напряжения автономного инвертора.
12. Величина погрешности расчета инвертора методом основной гармоники от точного расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попков О.З. Основы преобразовательной техники: учеб. пособие для вузов / О.З. Попков. 3-е изд., стереот. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010. – 200 с.: ил.
2. Томашевский Д.Н. Автономные инверторы: учебное пособие / Д.Н. Томашевский. – Екатеринбург: Изд-во Урал. Ун-та, 2019. – 120 с.

Содержание

1. Введение.....	3
2. Принципы построения схем автономных инверторов.....	4
3. Автономный инвертор напряжения.....	8
4. Порядок выполнения лабораторной работы.....	13
5. Лабораторное задание.....	28
6. Указания по оформлению отчета.....	28
7. Вопросы для подготовки к собеседованию и контролю.....	28
8. Библиографический список.....	29

Кротов Владимир Иванович

Исследование автономного инвертора напряжения
в программной среде *NI Multisim 14.0*

Методические указания к лабораторной
работе

Кафедра промышленной электроники

Компьютерная верстка М.М. Надыршина

Подписано в печать . . .

Формат 60х84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.

Усл. печ. л. 1,92. Уч.-изд. л. 2,12.

Тираж 200 экз. Заказ №

Редакционно-издательский отдел КГЭУ
420066, Казань, Красносельская, 51