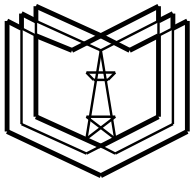

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» (ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА

Задание на курсовой проект

с методическими указаниями по направлению подготовки

11.03.04 Электроника и наноэлектроника

Казань 2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ АВТОНОМНОГО ИНВЕРТОРА НАПРЯЖЕНИЯ И ЕГО МОДЕЛИРОВАНИЕ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ NI MULTISIM

В курсовом проекте производится расчет однофазного автономного инвертора напряжения, предназначенного для преобразования постоянного напряжения в переменное. Целью работы является развитие навыков расчета преобразовательных устройств и анализа происходящих в них электромагнитных процессов. Все это послужит базой для проектирования более сложных выпрямительно-инверторных преобразователей электрической энергии, которые будут рассматриваться в дисциплине «Энергетическая электроника».

Теоретический материал, который необходимо изучить перед выполнением расчетов в основном излагается в [1 – 9]. Перечень подлежащих изучению вопросов приведен в конце методических указаний.

Рекомендуемая литература

1. Маругин А. П. Силовая электроника: конспект лекций/ А. П. Маругин; Конспект лекций. Уральский государственный горный университет - Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2013. - 246с.

2. Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА: Справочник. Минск: Беларусь, 1994. - 593с.

3. Автономные инверторы: [сайт]. URL: https://studref.com/441055/tehnika/avtonomnye_invertory (дата обращения: 12.06.2023)

4. Техническая документация на конденсатор CL11 [Электронный ресурс] // URL: https://static.chipdip.ru/lib/694/DOC013694937.pdf (дата обращения: 12.06.2023)

5. Техническая документация на конденсатор СТ-81 [Электронный ресурс] // URL: https://static.chipdip.ru/lib/495/DOC013495589.pdf (дата обращения: 12.06.2023)

6. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учебник. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. - Ч. 2 - 197 с.

7. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчинский, А. А. Кваснюк.-М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 321с.

8. Томашеский, Д.Н. Автономные инверторы / Д.Н. Томашеский. – Екатеринбург : Уральского университета, 2019. – 124 с.

9. NI_Multisim [Электронный ресурс] // Википедия – свободная энциклопедия: [сайт]. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/NI_Multisim (дата обращения: 12.06.2023)

Оформление курсового проекта

На первом листе расчетной записки напишите заголовок, отражающий содержание проекта, и приведите перечисленные ниже исходные данные:

1. Полная мощность нагрузки по первой гармонике $S_{(1)н}$ = 500 В·А;

2. Действующее значение напряжения первой гармоники на нагрузке $U_{(1)н}$ = 90 В;

3. Коэффициент мощности нагрузки по первой гармонике cos φ_1 = 0,8;

4. Частота первой гармоники выходного напряжения инвертора f_1 = 400 Гц;

5. Источником питания служит сетевой выпрямитель, выполненный по мостовой схеме с накопительным конденсатором на выходе. С учётом падения напряжения на элементах выпрямителя U_d = 500 В.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Параметр	Вариант									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$S_{(1)н}$ В·А	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590
$U_{(1)н}$ В	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135
cos φ_1	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
f_1 Гц	400	405	410	415	420	425	430	435	440	445
U_d В	500	510	520	530	540	550	560	570	580	590

Расчеты выполняются в последовательности, приведенной в методических указаниях. На каждом этапе расчета указывают его порядковый номер и наименование рассчитываемой величины. Затем записывают расчетную формулу или, если требуется, делают ее вывод. В формулах расшифровывают только те символы и числовые коэффициенты, которые не были объяснены на предыдущих этапах расчета или в исходных данных. После этого в формулу подставляют численные значения переменных и, опуская промежуточные вычисления, приводят результат расчета.

Все результаты расчета выполняют до трех-четырех значащих цифр. При выполнении расчетов на калькуляторах должны быть произведены соответствующие округления.

Все таблицы и рисунки должны быть пронумерованы. Размещаются рисунки и таблицы сразу после ссылки на них в тексте работы или на следующей странице, если они выполняются на отдельных листах.

1. Принцип действия однофазного инвертора напряжения и основные расчетные соотношения

Рассмотрим принцип работы и метод расчета параметров однофазного мостового инвертора напряжения на тиристорах. Этот вид инвертора используется для преобразования постоянного напряжения в переменное. Для этого используются четыре тиристора, которые переключаются с помощью управляющих сигналов. В результате получается синусоидальное напряжение.

Метод расчета параметров включает в себя определение значений сопротивлений и ёмкостей. Это позволяет настроить инвертор на работу с нужными параметрами и получить желаемый выходной сигнал. Схема инвертора приведена на рисунке 2.1.

Для питания инвертора, который используется для преобразования постоянного напряжения в переменное, используется выпрямитель, который может быть подключен непосредственно к сети переменного тока или через трансформатор.

Рабочие тиристоры (*VS1* и *VS4*, *VS3* и *VS2*) отпираются попарно с относительным фазовым сдвигом, равным 180 электрическим градусам, управляющим напряжением $U_{y1,4}$ или $U_{y3,2}$.

Отпирающие импульсы вырабатываются системой управления инвертором, которая будет рассмотрена в следующей главе. Коммутирующий конденсатор C_2, токоограничивающие дроссели L_1 и L_2, а также возвратные секции W''_1 первичной обмотки выходного трансформатора выполняют функцию принудительного запирания выходящей из работы пары тиристоров.

Диоды *VD1....VD4* образуют обратный выпрямительный мост, который нужен для возврата реактивной энергии из цепи нагрузки в источник питания. В первом полупериоде в интервале $0 < \sigma < \pi$ открыты тиристоры *VS1* и *VS4*, при этом ток источника питания замыкается по контуру: $+ U_d \rightarrow L_1 \rightarrow$ первичная обмотка выходного трансформатора $\rightarrow L_2 \rightarrow - U_d$.

Напряжение питания, за вычетом падения напряжения на двух открытых тиристорах, прикладывается к первичной обмотке выходного трансформатора представлен рисунке 1.1.

Коммутирующий конденсатор заряжен до напряжения U_1 с полярностью, указанной на рисунке без скобок. Напряжение на нагрузке определяется коэффициентом трансформации выходного трансформатора.

$$U_{\text{н}} = \frac{W_2}{W_1' + 2W''} U_{\text{н}} . \qquad (1.1)$$

Через интервал времени $t = \pi$ отпирающие импульсы подаются на вторую пару тиристоров (*VS3* и *VS2*). При этом работавшие ранее тиристоры *VS1* и *VS4* автоматически запираются и выходят из работы. Процесс их принудительного выключения происходит следующим образом. После отпирания тиристоров *VS3* и *VS2*, происходит процесс отключения подачи напряжения на тиристоры *VS1* и *VS4* и зарядки конденсатора *C2* в обратной полярности. Это приводит к быстрому спаду тока через эти тиристоры до минимального значения, что и приводит к их закрытию. В результате ток перестает течь через эти тиристоры.

После закрытия тиристоров работающей группы коммутационный конденсатор C_2 начинает перезаряжаться по контуру: $+ U_d \rightarrow L_1 \rightarrow VS3 \rightarrow C_2 \rightarrow VS2 \rightarrow - U_d$. Диоды обратного моста *VD1*....*VD4* при этом закрыты. В процессе перезаряда отрицательное напряжение на тиристорах *VS1* и *VS4* уменьшается. К концу интервала коммутации конденсатор C_2 оказывается заряженным до напряжения $-U_d$ с полярностью, указанной на рисунке 1.1 в скобках.

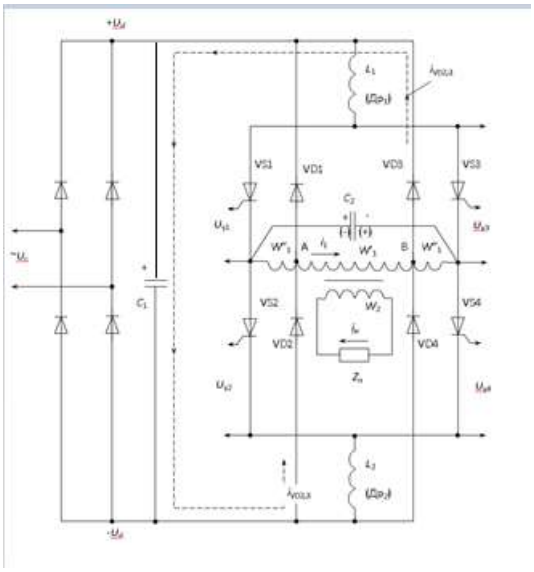

Рис. 1.1. Принципиальная схема инвертора

Когда тиристоры *VS1* и *VS4* выключаются, на их анодах возникает положительное напряжение. Для того, чтобы избежать повреждения тиристоров, время, в течение которого на них действует обратное напряжение, должно быть больше времени, необходимого для восстановления их запирающих свойств.

Если время, в течение которого на тиристорах действует обратное напряжение, меньше времени, необходимого для их полного закрытия, то при появлении положительного напряжение на анодах этих тиристоров они снова откроются. Это приведет к тому, что все четыре тиристора будут в состоянии проводимости, что приведет к сбою в нормальном процессе инвертирования и вызовет короткое замыкание источника питания инвертора. Поэтому необходимо обеспечить правильное время отключения тиристоров, чтобы избежать данного нежелательного эффекта.

С целью уменьшения скорости перезаряда конденсатора C_1, а также для снижения скорости нарастания тока через тиристоры, последовательно с конденсатором включены коммутирующие дроссели L_1 и L_2. Их параметры и конструкция выбираются так, чтобы перезаряд конденсатора носил колебательный характер, и в течение части периода собственных колебаний контура отключающихся тиристорах поддерживалось отрицательное напряжение.

После переключения тиристоров, сопровождающегося изменением напряжения на обмотках, ток первичной обмотки i_1 из-за индуктивного характера нагрузки сохраняет своё прежнее направление, замыкаясь сначала через коммутирующий конденсатор и участвуя тем самым в его перезарядке. Когда в процессе колебательного перезаряда напряжение в точке «В» станет положительным и, более того, по абсолютной величине больше U_d, а напряжение в точке «А» станет более отрицательным, чем «минус» источника, откроются диоды *VD3* и *VD2*, что вызовет прекращение роста напряжения конденсатора C_2.

Если к моменту окончания перезаряда конденсатора C_2 реактивный ток нагрузки ещё не снизился до нуля (что имеет место при малых значениях $\cos\varphi$), то в интервале $\pi < t < \pi + \sigma$ он продолжает протекать в прежнем направлении, замыкаясь по контуру: первичная обмотка трансформатора → источник питания → *VD2*. При этом энергия, запасённая в индуктивности нагрузки, возвращается в источник питания.

Если в качестве источника питания используется выпрямитель с односторонней проводимостью, то для инвертора необходим накопительный конденсатор *C1*, который обеспечивает протекание импульсных реактивных токов в схеме. Данный конденсатор пропускает ток только в одном направлении и позволяет его накапливать, что необходимо для гарантированного питания инвертора. Под действием противо-ЭДС источника питания реактивный ток первичной обмотки выходного трансформатора в момент $t = \sigma$ становится равным нулю и, изменяя своё направление, переходит в цепь тиристоров *VS3* и *VS2*. При этом от источника питания вновь начинает потребляться энергия. В момент времени $t = 2\pi$ вновь включаются тиристоры *VS1* и *VS4*, и реактивный ток нагрузки в интервале периода коммутации $2\pi < t < 2\pi + \sigma$ протекает через диоды. Схема инвертора, реализованная на идеальных элементах, оказывается неработоспособной. Это объясняется тем, что в течение интервала коммутации к моменту отпирания обратных диодов *VD3* и *VD2* запас электромагнитной энергии в дросселях L_1 и L_2 несколько

возрастает. Для нормальной работы схемы избыточную энергию необходимо либо рассеять в активных сопротивления образовавшихся контуров разряда индуктивностей ($L_1 \rightarrow VS3 \rightarrow VD3 \rightarrow L_1$ и $L_2 \rightarrow VD2 \rightarrow VS2 \rightarrow L_2$), либо возвращать в источник питания. Более определенный и надёжный – второй способ.

В противном случае при коммутации ток в индуктивностях L_1 и L_2 будет возрастать, что неизбежно приведёт к уменьшению времени, в течение которого на отключающихся тиристорах действует обратное напряжение. Следствием этого уменьшения будет «опрокидывание» инвертора. Для возврата избыточной энергии из контуров коммутации в источник питания и повышения КПД инвертора диоды обратного выпрямителя подключены к отводам первичной обмотки выходного трансформатора. В результате при разряде противо-ЭДС дросселя преодолевает ЭДС возвратной секции W_1'', равную $(W_1''/W_1')\cdot U_1$, что сопровождается рекуперацией энергии в источник питания. Более подробно анализ электромагнитных процессов в силовой части и контурах коммутации приведён в [1,2]. Мгновенное значение тока нагрузки, приведённое к первичной обмотке выходного трансформатора (без учёта коммутационных процессов), в интервале $0 < t < \pi$ описывается выражением:

$$i_1(t) = i'_{\text{н}}(t) = \frac{U_d}{R'_{\text{н}}}\left(1 - \frac{2\cdot e^{-k\omega t}}{1+a^3}\right), \qquad (1.2)$$

где $R'_{\text{н}} = R_{\text{н}} / n^2$ – приведённое к первичной обмотке сопротивление нагрузки;

$k = R'_{н} / \omega \cdot L'_{\text{н}}$ – параметр нагрузки;

$L'_{\text{н}} = L_{\text{н}} / n^2$ – приведённая индуктивность нагрузки;

$\sigma = \omega\ t$ – временной угол;

$a = e^{-\frac{k\cdot\pi}{3}}$.

Напряжение на первичной обмотке трансформатора по форме близко к прямоугольному и приближённо может быть представлено в виде гармонического ряда.

$$U_1 = \frac{2 \cdot U_d}{\pi} \sum_{q=1}^{\infty} \frac{\sin(q \cdot \omega)}{q} \left[1 - (-1)^q\right] \qquad (1.3)$$

Достоинством схемы является то, что выходное напряжение слабо зависит от величины и характера нагрузки инвертора. Инвертор имеет жёсткую внешнюю характеристику, устойчив при перегрузках и в режиме малых нагрузок.

Следующим этапом проведём расчёт однофазного инвертора напряжения.

2 Расчет автономного инвертора напряжения

Приведен пример расчета инвертора напряжения по данным:

1. Полная мощность нагрузки по первой гармонике $S_{(1)н}$ = 500 В·А.

2. Действующее значение напряжения первой гармоники на нагрузке $U_{(1)н}$ = 90 В

3. Коэффициент мощности нагрузки по первой гармонике cos φ_1 = 0,8.

4. Частота первой гармоники выходного напряжения инвертора f_1 = 400 Гц.

5. Источником питания служит сетевой выпрямитель, выполненный по мостовой схеме с накопительным конденсатором на выходе. С учётом падения напряжения на элементах выпрямителя U_d = 500 В.

Расчёт инвертора необходимо выполнять после изучения принципиальной схемы, представленной на рисунке 2.1 в следующем порядке:

1. Полное сопротивление нагрузки на частоте основной гармоники

$$Z_{н} = \frac{U_{(1)н}^{\ 2}}{S_{(1)н}} = \frac{90^2}{500} = 16{,}2 \text{ Ом}.$$

2. Активная составляющая сопротивления нагрузки

$$R_{н} = Z_{н} \cdot \cos \varphi_{(l)} = 16{,}2 \cdot 0{,}8 = 12{,}96 \text{ Ом}.$$

3. Индуктивное сопротивление нагрузки на основной частоте

$$X_{н} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{н} = Z_{н} \cdot \sin \varphi_{(1)} = 12{,}96 \cdot 0{,}6 = 7{,}777 \text{ Ом}.$$

4. Действующее значение напряжения, приложенного к первичной обмотке выходного трансформатора,

$$U_{(1)1} = \frac{2\sqrt{2} \cdot U_d}{\pi} = \frac{2\sqrt{2} \cdot 500}{3{,}14} = 450{,}4 \text{ В}.$$

5. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$n = \frac{W_2}{W_1' + 2W_1''} = \frac{U_{(1)н}}{U_{(1)1}} = \frac{90}{450{,}4} = 0{,}2.$$

6. Активное сопротивление нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора,

$$R_{н}' = \frac{R_{н}}{n^2} = \frac{12{,}96}{0{,}2^2} = 324 \text{ Ом}.$$

7. Индуктивное сопротивление нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора,

$$X'_{\text{н}} = \frac{X_{\text{н}}}{n^2} = \frac{7{,}776}{0{,}2^2} = 194{,}4 \text{ Ом}.$$

8. Параметр нагрузки

$$k = \frac{R'_{\text{н}}}{X'_{\text{н}}} = \frac{R_{\text{н}}}{X_{\text{н}}} = \frac{12{,}96}{7{,}776} = 1{,}67$$

.

9. Базисный ток

$$I_0 = \frac{U_d}{R'_{\text{н}}} = \frac{500}{324} = 1{,}54 \text{ А}.$$

10. Максимальное значение тока нагрузки, приведённое к первичной обмотке трансформатора,

$$I'_{\text{н}\,max} = I'_{\text{н}0} = I_0 \frac{1-a^3}{1+a^3} = 1{,}54 \frac{1-0{,}174^3}{1+0{,}174^3} = 1{,}524 \text{ А}.$$

11. Среднее значение тока, потребляемое от источника питания,

$$I_d = I_0 \left(1 + \frac{2(a^3-1)}{k\pi(a^3+1)}\right) = 1{,}54 \left(1 + \frac{2 \cdot (0{,}174^3-1)}{1{,}67 \cdot 3{,}14 \cdot (0{,}174^3+1)}\right) = 0{,}959 \text{ А}.$$

Полученное значение I_d, а также величина U_d используются при расчёте выпрямителя, питающего инвертор.

12. Угол и время проводимости обратного диода

$$\sigma = 2\pi f t_{\text{д}} = \frac{1}{k} \cdot \ln \frac{2}{a^3+1} = \frac{1}{1{,}67} \cdot \ln \frac{2}{0{,}174^3+1} = 0{,}4119;$$

$$t_{\text{д}} = \frac{\sigma}{2\pi f} = \frac{0{,}4119}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 400} = 163{,}9 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 163{,}9 \text{ мкс}.$$

13. Среднее значение тока через тиристор

$$I_{0\text{т}} = \frac{I_0}{2\pi}\left(\pi - \sigma\frac{1-a^3}{k(a^3+1)}\right) = \frac{1{,}54}{2\cdot 3{,}14}\left(3{,}14 - 0{,}4119\frac{1-0{,}174^3}{1{,}67\cdot(1+0{,}174^3)}\right) = 1{,}1\text{ А}.$$

14. Среднее значение тока через обратный диод

$$I_{0\text{д}} = \frac{I_0}{2\pi}\left(\frac{1-a^3}{k(a^3+1)} - \sigma\right) = \frac{1{,}54}{2\cdot 3{,}14}\left(\frac{1-0{,}174^3}{1{,}67\cdot(0{,}174^3+1)} - 0{,}4119\right) = 0{,}05\text{ А}.$$

15. Эффективное значение тока через тиристор

$$I_{\text{ЭФ.Т}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\sigma}^{\pi} i_1{}^2(v)dv} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{\sigma}^{\pi} I_0{}^2(1-\frac{2e^{-kv}}{1+a^3})^2 dv} =$$

$$= \frac{I_0}{\sqrt{2}}\cdot\sqrt{1+\frac{2(a^3-1)}{k\pi(a^3+1)} - \frac{\sigma}{\pi} - \frac{4(e^{-k\sigma}-1)}{k\pi(a^3+1)} + \frac{2(e^{-2k\sigma}-1)}{k\pi(a^3+1)}} = \frac{1{,}54}{\sqrt{2}}\cdot$$

$$\cdot\sqrt{1+\frac{2(0{,}174^3-1)}{1{,}67\cdot 3{,}14\cdot(1+0{,}174^3)} - \frac{0{,}4119}{3{,}14} - \frac{4(e^{-1{,}67\cdot 0{,}4119}-1)}{1{,}67\cdot 3{,}14\cdot(1+0{,}174^3)} + \frac{2(e^{-2\cdot 1{,}67\cdot 0{,}4119}-1)}{1{,}67\cdot 3{,}14\cdot(1+0{,}174^3)^2}} = 0{,}817\text{ А}.$$

16. Эффективное значение тока через диод

$$I_{\text{ЭФ.Д}} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\sigma} i_1{}^2(v)dv} = \sqrt{\frac{1}{2\pi}\int_{0}^{\sigma} I_0{}^2(1-\frac{2\cdot e^{-kv}}{1+a^3})^2 dv} =$$

$$= \frac{I_0}{\sqrt{2}}\cdot\sqrt{\frac{\sigma}{\pi} + \frac{4(e^{-k\sigma}-1)}{k\pi(1+a^3)} - \frac{2(e^{-2k\sigma}-1)}{k\pi(1+a^3)^2}} =$$

$$= \frac{1{,}54}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\frac{0{,}4119}{3{,}14} + \frac{4(e^{-1{,}67\cdot 0{,}4119} - 1)}{1{,}34 \cdot 3{,}14 \cdot (1 + 0{,}174^3)} - \frac{2(e^{-2\cdot 1.67\cdot 0{,}4119} - 1)}{1{,}67 \cdot 3{,}14 \cdot (1 + 0{,}174^3)^2}} = 0{,}209 \text{ А}.$$

17. Максимальное обратное напряжение на тиристорах и диодах

$$U_{\text{обр}.max} = U_d = 500 \text{ В}.$$

На основании данных расчёта из справочника [1,2] выбираем:

Тиристор типа ТН-10-10 со следующими параметрами:

- допустимый средний ток $I_{a\ \text{доп}} = 10$ А,
- допустимое обратное напряжение $U_{\text{обр.доп}} = 1000$ В,
- отпирающий ток управления $I_{\text{у}} = 0{,}8$ А,
- отпирающее напряжение управления $U_{\text{у}} = 2$ В,
- критическая скорость нарастания прямого тока $\frac{dI_a}{dt} = 100 \ \frac{\text{А}}{\text{с}}$,
- критическая скорость нарастания прямого напряжения: $U_{\text{доп}} = 100 \ \frac{\text{В}}{\text{мкс}}$,
- время выключения $t_e = 20$ мкс;
- допустимая частота выпрямителя $f_{max} = 1{,}2$ кГц.

Диоды обратного выпрямителя типа КД 202 Л со следующими параметрами:

- $I_{a\ \text{доп}} = 10$ А,
- $U_{\text{обр.доп}} = 1000$ В,
- допустимая частота выпрямителя $f_{max} = 1{,}2$ кГц.

18. Коэффициент формы тока через тиристор

$$K_{\text{ФТ}} = \frac{I_{\text{Э.Ф.Т}}}{I_{0\text{Т}}} = \frac{0{,}817}{1{,}1} = 0{,}74.$$

19. Мощность статических потерь

$$P_{\text{т}} = U_0 I_{0\text{т}} + K_{\text{фт}}^2 I_{0\text{т}}^2 R_{\text{д}} = 2{,}33 \cdot 1{,}1 + 0{,}74^2 \cdot 1{,}1^2 \cdot 0{,}0157 = 2{,}58 \text{ Вт},$$

где U_0 – пороговое напряжение, U_0 = 2,33 В; $R_{\text{д}}$ – динамическое сопротивление тиристора в открытом состоянии, определяемое по его статической вольтамперной характеристике.

Для выбранного тиристора по характеристике находим U_0 = 2,33 В, $R_{\text{д}}$ = 0,0157 Ом.

20. Коэффициент формы тока через обратный диод

$$K_{\text{ФД}} = \frac{I_{\text{Эф.д}}}{I_{0\text{д}}} = \frac{0{,}209}{0{,}05} = 4{,}18.$$

21. Мощность статических потерь в диоде

$$P_{\text{д}} = U_0 I_{0\text{д}} + K_{\text{ФД}}^2 I_{0\text{д}}^2 R_{\text{д}} = 2{,}33 \cdot 0{,}05 + 4{,}18^2 \cdot 0{,}05^2 \cdot 0{,}043 = 0{,}118 \text{ Вт}.$$

Для выбранного диода U_0 = 0,78 В, динамическое сопротивление диода $R_{\text{д}}$ = 0,043 Ом. Значение мощности потерь в тиристоре и диоде используются для расчёта площади теплоотводящего радиатора.

22. Действующее значение напряжения на первичной обмотке выходного трансформатора

$$U_1 = U_d = 500 \text{ В}.$$

23. Действующее значение напряжения на нагрузке

$$U_{\text{н}} = U_1 n = 500 \cdot 0{,}2 = 100 \text{ В}.$$

24. Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_1 = I_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{2}{k\pi} + \frac{a^3 - 1}{a^3 + 1}} = 1{,}54 \cdot \sqrt{1 + \frac{2}{1{,}67 \cdot 3{,}14} \cdot \frac{0{,}174^3 - 1}{0{,}174^3 + 1}} = 0{,}96 \text{ А}.$$

25. Действующее значение тока в нагрузке

$$I_2 = \frac{I_1}{n} = \frac{0{,}96}{0{,}2} = 4{,}8 \text{ А}.$$

26. Расчётная мощность первичной обмотки трансформатора

$$S_1 = U_1 \cdot I_1 = 500 \cdot 0{,}96 = 480 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

27. Расчётная мощность вторичной обмотки трансформатора

$$S_2 = U_{(1)\text{н}} \cdot I_2 = 90 \cdot 4{,}8 = 432 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

28. Типовая мощность трансформатора

$$S_\text{Т} = \frac{S_1 + S_2}{2} = \frac{480 + 432}{2} = 456 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

29. Определяем параметры коммутирующих элементов исходя из условия минимума энергии, накопленной в контуре коммутации [11]:

$$C_2 = 2{,}55 \frac{I'_{\text{н}0} t_\text{с}}{U_d} = \frac{2{,}55 \cdot 1{,}524 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{500} = 0{,}02 \text{ мкФ};$$

$$L_1 = L_2 = 0{,}64 \frac{U_d t_\text{с}}{I'_{\text{н}0}} = \frac{0{,}64 \cdot 500 \cdot 25 \cdot 10^{-6}}{1{,}524} = 5{,}24 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} = 5{,}24 \text{ мкГн},$$

где $t_\text{с} = (1{,}2...2) \cdot t_\text{в}$. Принимаем $t_\text{с} = 25$ мкс.

30. Максимальное напряжение на коммутирующем конденсаторе в интервале возврата энергии из контура коммутации

$$U_{C_2\,max} = U_d \cdot (1 + K_{\text{вз}}) = 500 \cdot (1 + 0{,}1) = 550\ \text{В},$$

где, $K_{\text{вз}}$ – возвратный коэффициент.

В соответствии с рекомендациями, приведёнными в [1], $K_{\text{вз}}$ выбирают в пределах 0,1 ... 0,2. Примем $K_{\text{вз}} = 0{,}1$.

31. Амплитуда первой гармоники напряжения на конденсаторе

$$U_{(1)C_1\,max} = \frac{4U_d}{\pi} = \frac{4 \cdot 500}{3{,}14} = 636\ \text{В}.$$

В качестве коммутирующего конденсатора используем керамические конденсаторы типа СТ-81, для которых в соответствии с [5] допустимая амплитуда переменной составляющей на частоте 1000 Гц составляет 25 % от рабочего напряжения. Следовательно, рабочее напряжение конденсатора должно быть.

$$U_{C_1\,\text{раб}} = \frac{U_{(1)C_1\,max} \cdot 100\,\%}{25\,\%} = 636 \cdot 4 = 2544\ \text{В}.$$

Для получения нужной емкости и рабочего напряжения конденсаторы выбранного типа можно включить параллельно и последовательно. Включаем последовательно 3 конденсатора по 0,1 мкФ на рабочее напряжение $U_{\text{раб}} = 1000$ В.

32. Постоянная составляющая токов в дросселях L_1 и L_2

$$I_{L_0} \cong 2I_{0\text{Т}} \cong 2 \cdot 1{,}1 = 2{,}2\ \text{А}.$$

33. Скорость нарастания прямого напряжения на тиристоре

$$\frac{dU_{\text{Т}}}{dt} = 1{,}2\frac{U_d}{t_{\text{с}}} = 1{,}2\frac{500}{25\cdot 10^{-6}} = 24\ \frac{\text{В}}{\text{мкс}}.$$

34. Скорость нарастания прямого тока при отпирании тиристора

$$\frac{dI_{\text{Т}}}{dt_{t=0}} = \frac{U_d}{2L_1} = \frac{500}{2\cdot 390\cdot 10^{-6}} = 0{,}477\ \frac{\text{А}}{\text{мкс}}.$$

35. Постоянная времени цепи нагрузки

$$T_{\text{н}} = \frac{L_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} = \frac{X_{\text{н}}}{2\pi f R_{\text{н}}} = \frac{7{,}776}{2\cdot 3{,}14\cdot 400\cdot 12{,}96} = 0{,}23\cdot 10^{-3}\ \text{с}.$$

36. Напряжение на конденсаторе

$$U_{C_1} = U_d = 500\ \text{В}.$$

37. Частота основной гармоники пульсаций на конденсаторе, обусловленных работой инвертора

$$f_{C_1} = 2f = 2\cdot 400 = 800\ \text{Гц}.$$

В качестве накопительного конденсатора выбираем конденсатор типа CL11 с рабочим напряжением 630 В. В соответствии с ТУ на данный конденсатор допустимая амплитуда переменной составляющей на частоте 800 Гц составляет 5 % от рабочего напряжения [4].

$$U_{\text{п.доп}} = 0{,}05\ \cdot\ 850 = 42{,}5\ \text{В}.$$

38. Емкость накопительного конденсатора

$$C_1 = I_0 \cdot \frac{T_{\text{н}}}{U_{\text{п.доп}}} \left(\frac{1-a^3}{1+a^3} - \ln \frac{2}{1+a^3} \right) =$$

$$= 13 \cdot \frac{0{,}23 \cdot 10^{-3}}{42{,}5} \left(\frac{1-0{,}174^3}{1+0{,}174^3} - \ln \frac{2}{1+0{,}174^3} \right) = 2{,}5 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Принимаем емкость конденсатора C_1 =2,5 мкФ.

.

3 Моделирование автономного инвертора напряжения в программной среде NI *Multisim*

Программа *Multisum* содержит библиотеку более 45000 электронных компонентов, но реальных компонентов для вышеприведенного расчета подобрать не получилось. Поэтому моделирование автономного инвертора напряжения проводилось с измененными номиналами компонентов, сохранив при этом принципиальную схему проекта.

Первым этапом моделирования схемы инвертора, является сборка схемы подключения тиристора, которая представлена на рисунке 3.1

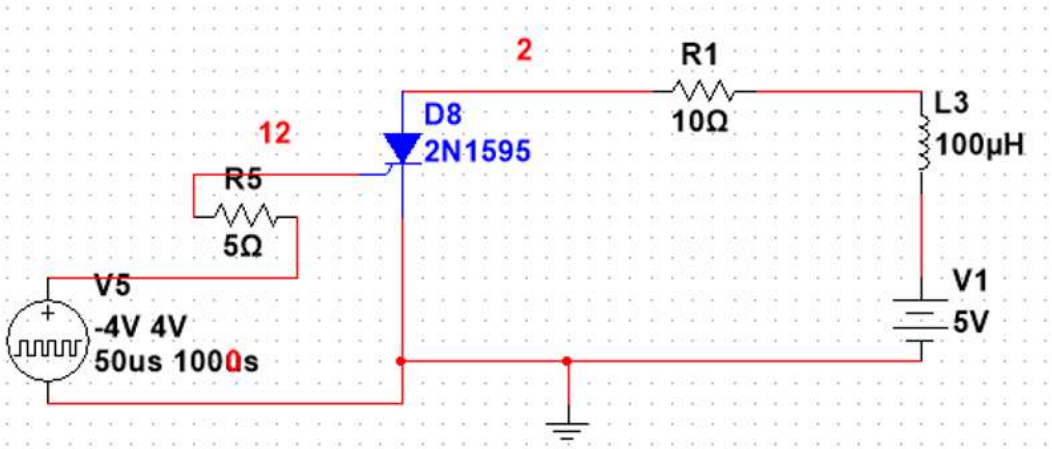

Рис. 3.1. Схема подключения тиристора

Устанавливаем напряжение у постоянного источника питания *V1* 5В, также ставим элементы нагрузки сопротивление *R1* 10 Ом и катушку индуктивности *L3* 100 мкГн.

На рисунке 3.2 показаны параметры импульсного источника питания V5, устанавливаем напряжение -4 В и 4 В, значение периода (*Period*) ставим 100 мкс, ширину импульс (*Pulse width*) 50 мкс.

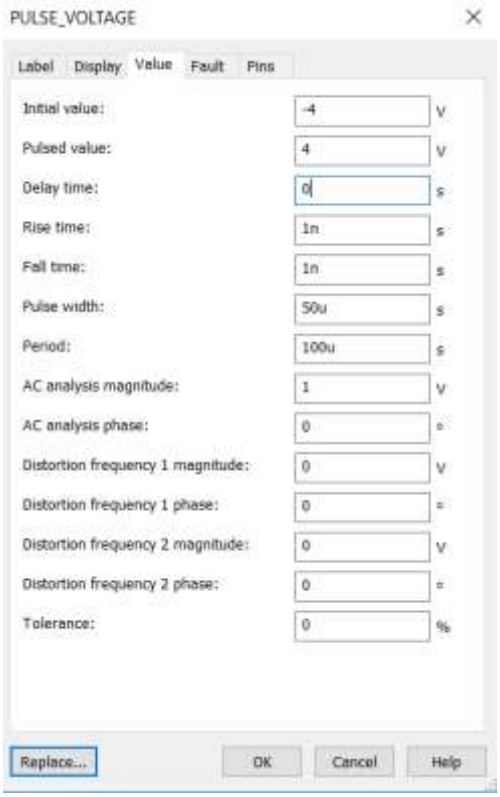

Рис. 3.2. Параметры импульсного источника питания

В схеме инвертора напряжения использовались тиристоры типа *2N1595*. Резистор *R5* необходим для нормальной работы тиристора.

На втором этапе собирается упрощённая схема однофазного инвертора напряжения, которая представлена на рисунке 3.3.

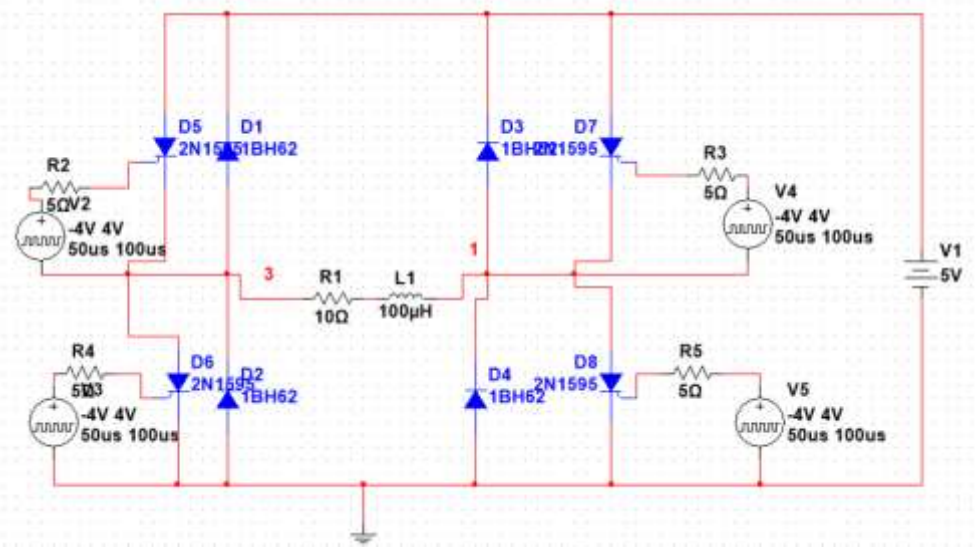

Рис. 3.3. Упрощённая схема однофазного инвертора напряжения

В качестве нагрузки используются резистор *R1* на 10 Ом, катушка индуктивности *L1* 100 мкГн и источник постоянного напряжения *V1* на 5 В. Также используются 4 тиристора типа *2N1595* и 4 диода типа *1BH62*. Импульсные источники питания *V2* и *V5* с характеристиками, представленными на рисунке 3.2. Параметры источников *V3* и *V4* устанавливаются с те же характеристики, только добавляется в поле Задержка (*Delay time*) значение, равное половине периода. В данном случаем это значение равно 50 мкс. Характеристики источников *V3* и *V4* показаны на рисунке 3.4.

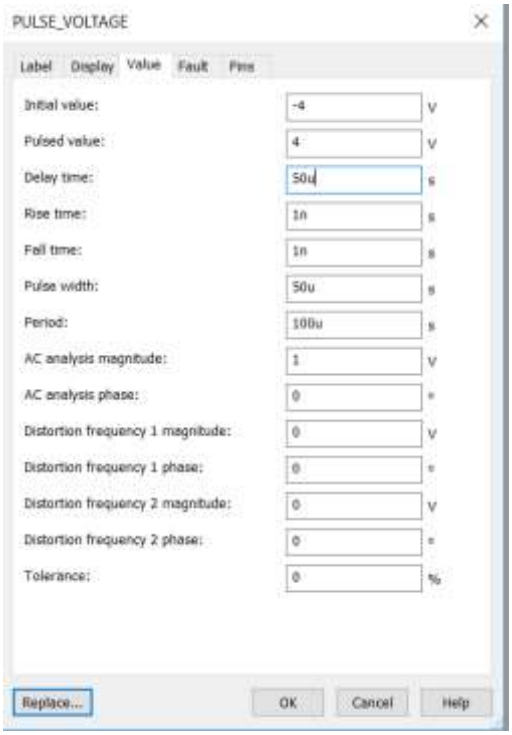

Рис. 3.4. Характеристики источников питания *V3* и *V4*

Далее запускается опция *Transient Analysis* и находим разность потенциалов на нагрузке между точками на схеме 3 и 1 соответственно (рис. 3.3). Также анализируется ток в активной нагрузке, к примеру, в резисторе *R1*. Ток в нагрузке является переменным и несинусоидальным сигналом. Получаем график зависимости тока и напряжения, показанный на рисунке 3.5.

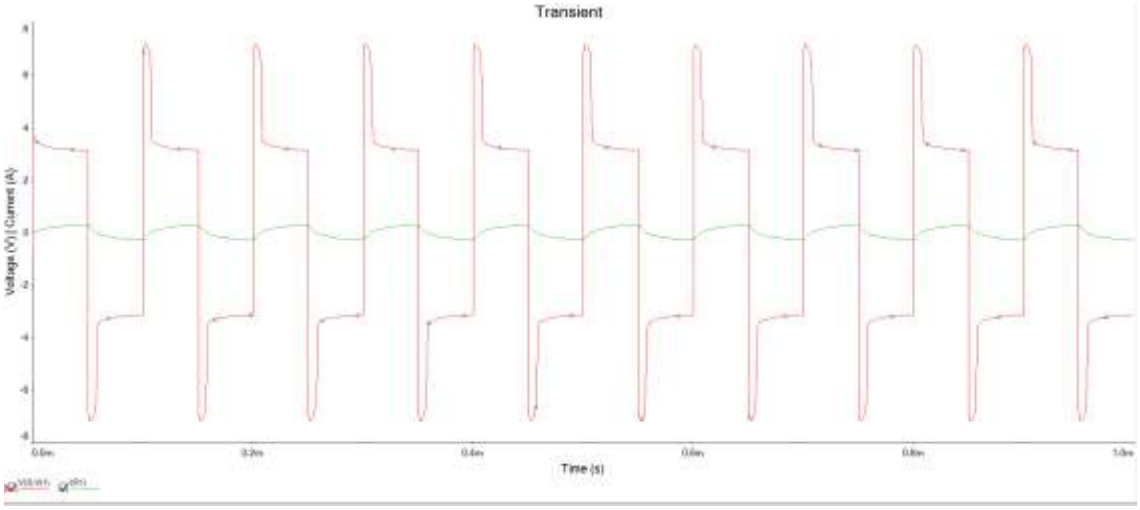

Рис. 3.5. График зависимости тока и напряжения упрощённой схемы

На четвёртом этапе в нагрузку подключаем трансформатор *T1*. Схема показана на рисунке 3.6.

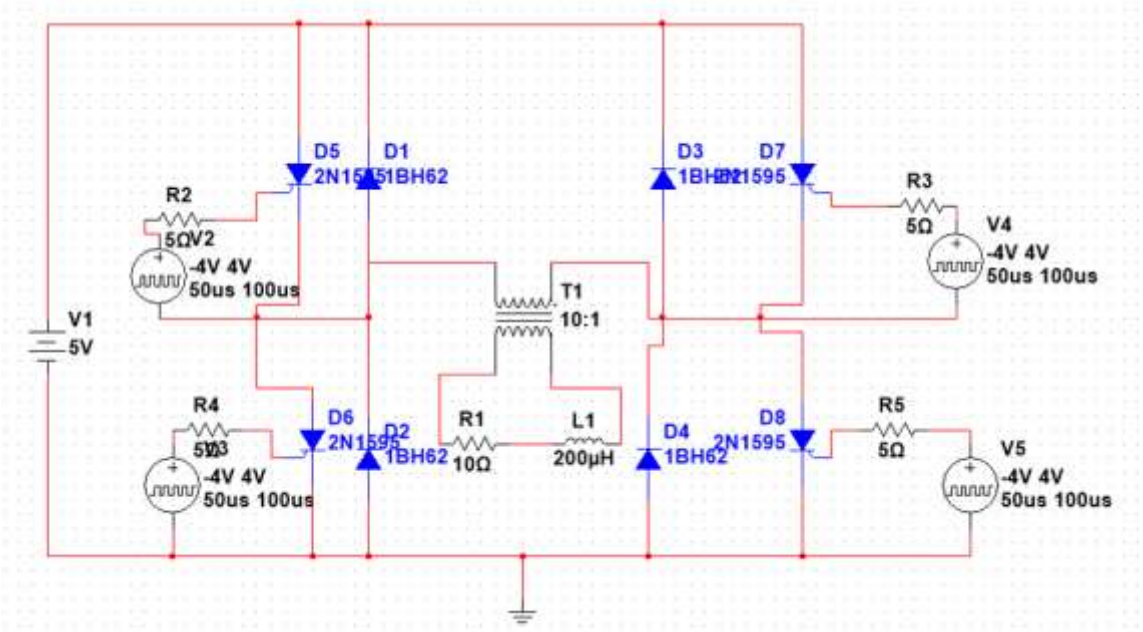

Рис. 3.6. Схема инвертора напряжения с трансформатором

Графики зависимостей тока и напряжения показаны на рисунке 3.7.

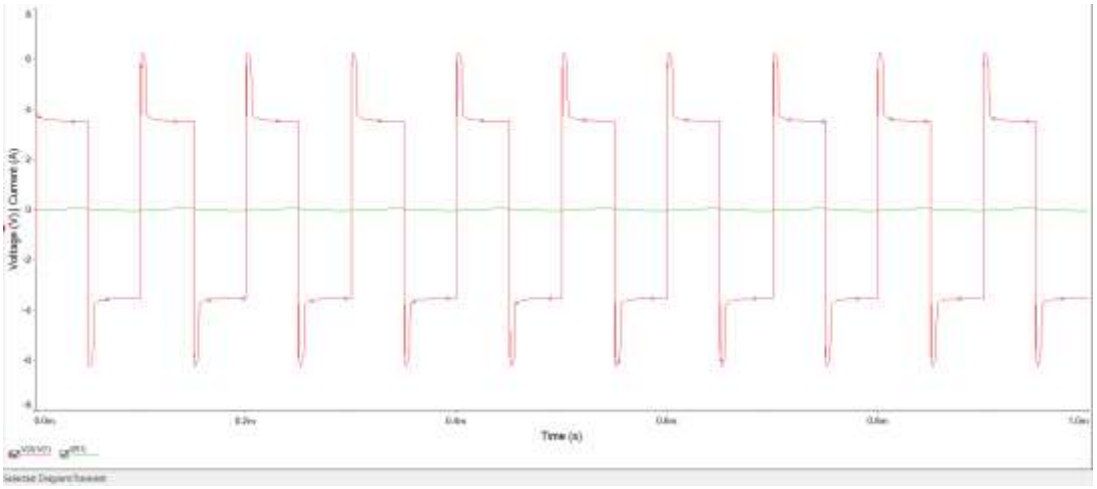

Рис. 3.7. Графики зависимостей тока и напряжения схемы инвертора напряжения с трансформатором

По графикам видно, что скачок напряжения уменьшился, но также уменьшилась амплитуда тока, поэтому для лучшего понимания схемы и лучшего графика тока уменьшим сопротивление в нагрузке до 2 Ом. Новые графики зависимостей показаны на рисунке 3.8.

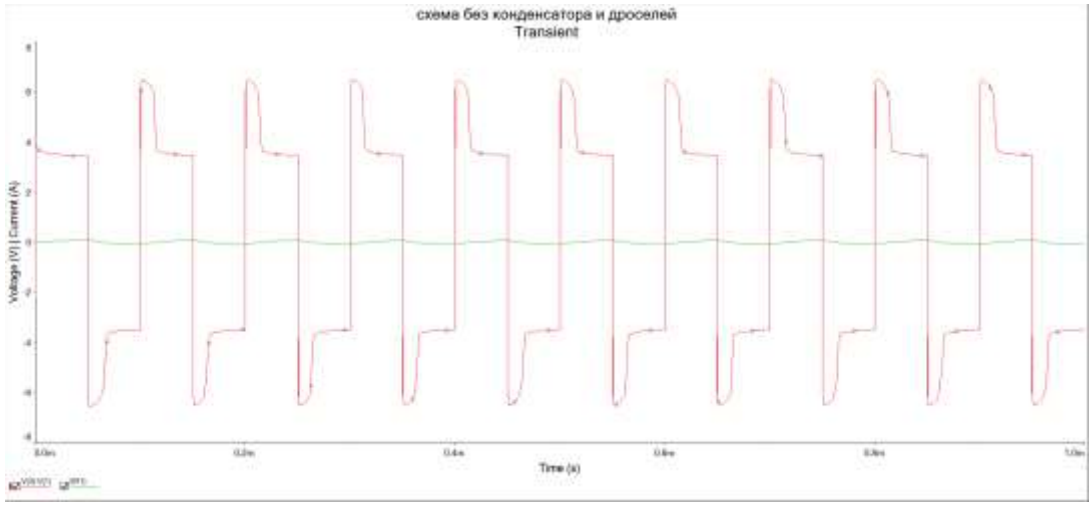

Рис. 3.8. Графики зависимостей тока и напряжения схемы инвертора напряжения с трансформатором

По графику видно увеличение амплитуды тока, которая стремится к синусоиде, но также увеличилась область скачка напряжения на тиристорах, поэтому также изменим значение катушки индуктивности до 10 мкГн.

Графики после изменения индуктивности представлены на рисунке 3.9.

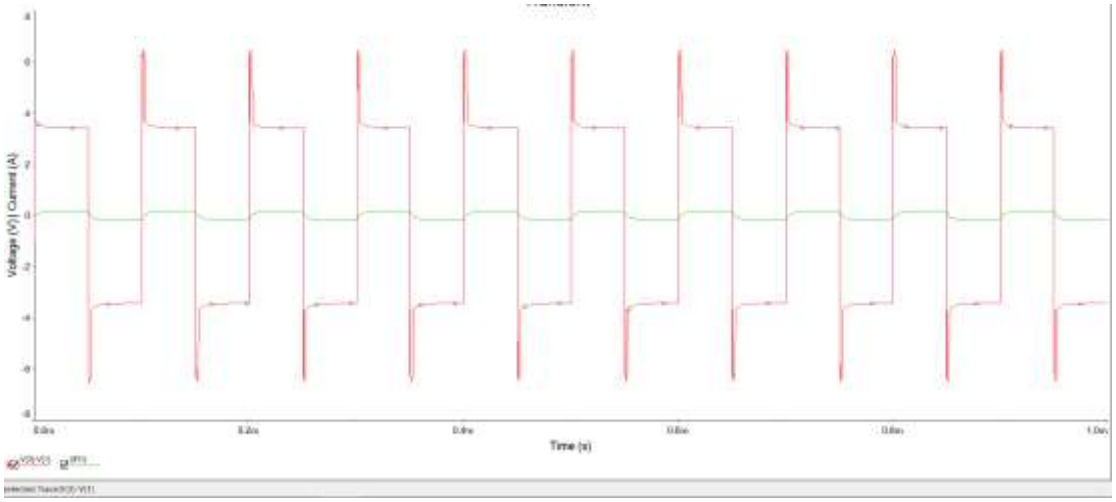

Рис. 3.9. Графики зависимостей тока и напряжения схемы инвертора напряжения с трансформатором

После изменения значения индуктивности катушки область скачка напряжения уменьшилась, а амплитуда тока увеличилась.

На рисунке 3.10 показан гармонический состав прямой выходного напряжения.

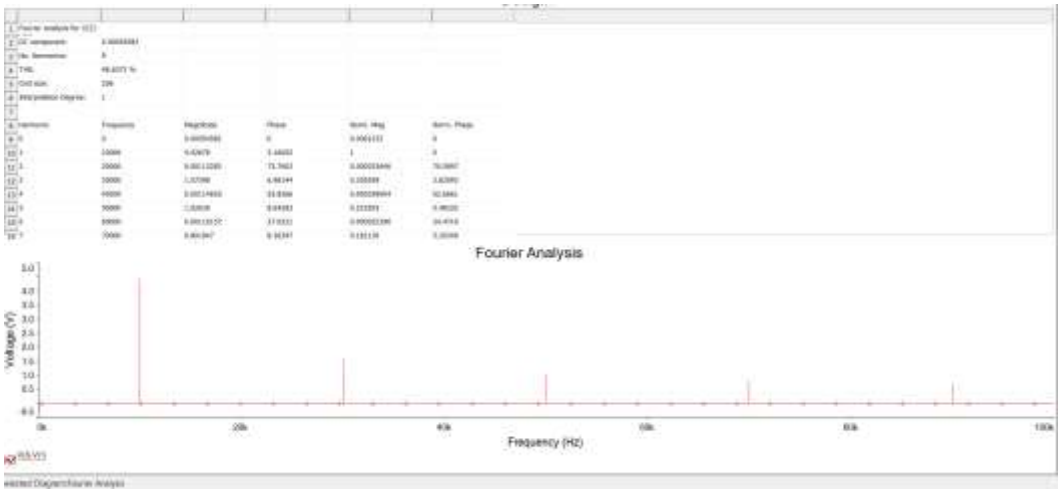

Рис. 3.10. Гармонический состав прямой выходного напряжения для схемы с трансформатором

Отношение первой гармоники кривой напряжения к третьей примерно равно 3.

На пятом этапе, параллельно трансформатору подключается конденсатор *C1* на 1 мкФ. Схема показана на рисунке 3.11.

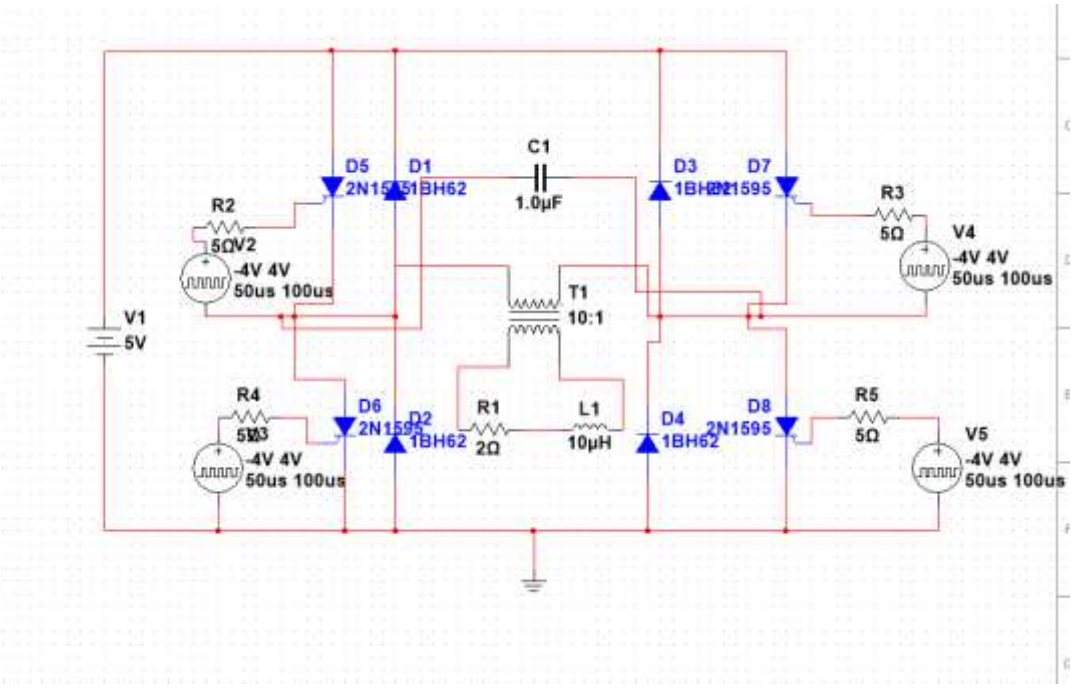

Рис. 3.11. Схема инвертора напряжения с трансформатором и параллельно включённым конденсатором

Графики зависитей тока и напряжения в нагрузке представлены на рисунке 3.12.

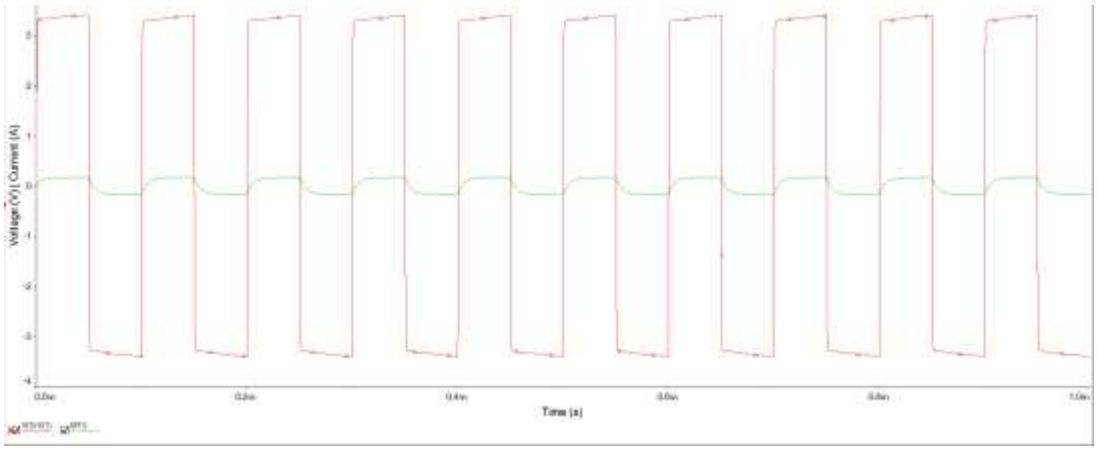

Рис. 3.12. Графики зависимостей тока и напряжения схемы инвертора напряжения с трансформатором и параллельно включённым конденсатором

График напряжения на нагрузке принял прямоугольную форму.

На рисунке 3.13 показан гармонический состав выходного напряжения инвертора.

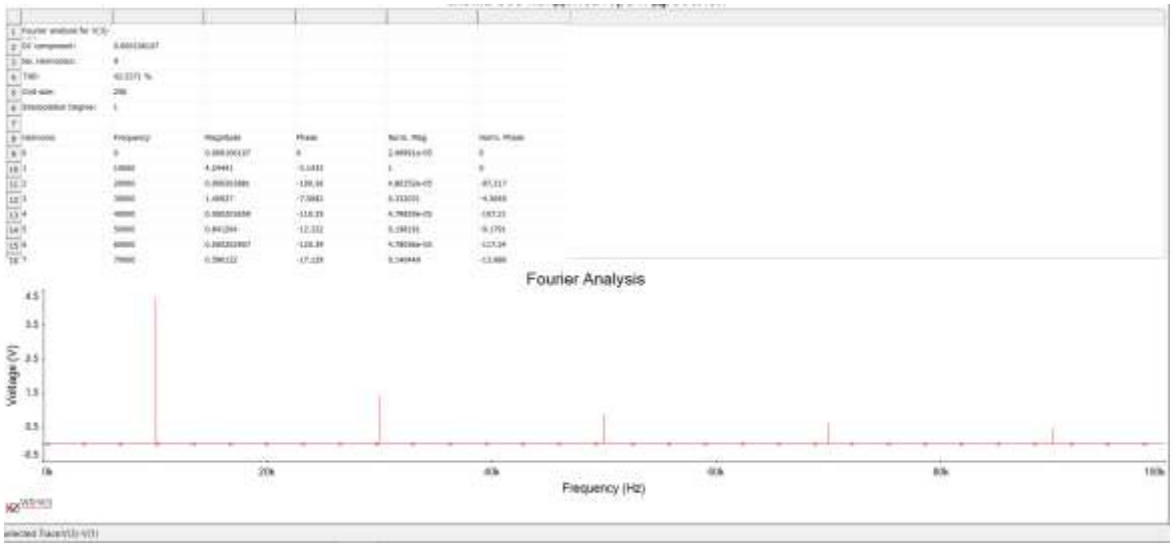

Рис. 3.13. Гармонический состав прямой выходного напряжения для схемы с трансформатором и параллельно включённым конденсатором

Отношение первой гармоники кривой напряжения к третьей примерно равно 3.

Шестым этапом добавляются к схеме из пятого пункта катушки индуктивности *L2* и *L3* номиналом по 200 мкГн. Итоговая схема проиллюстрирована на рисунке 3.14.

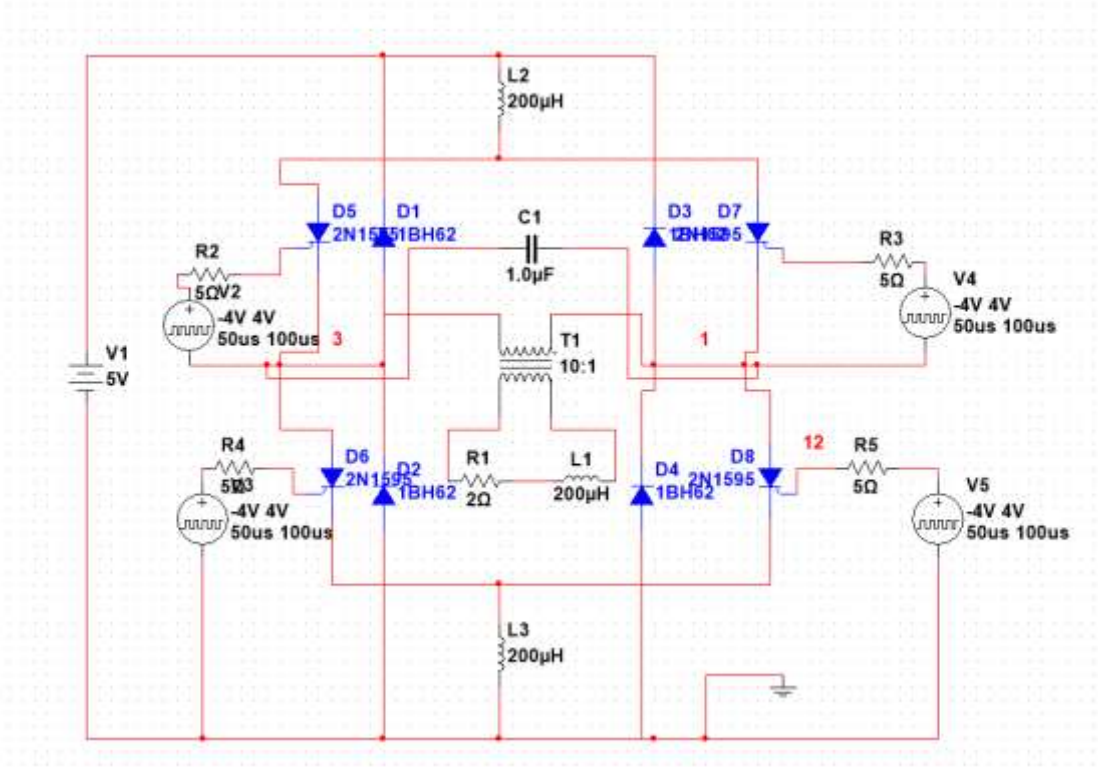

Рис. 3.14. Итоговая схема автономного инвертора напряжения

Далее на рисунке 3.15 представлены графики зависимостей напряжения и тока в нагрузке.

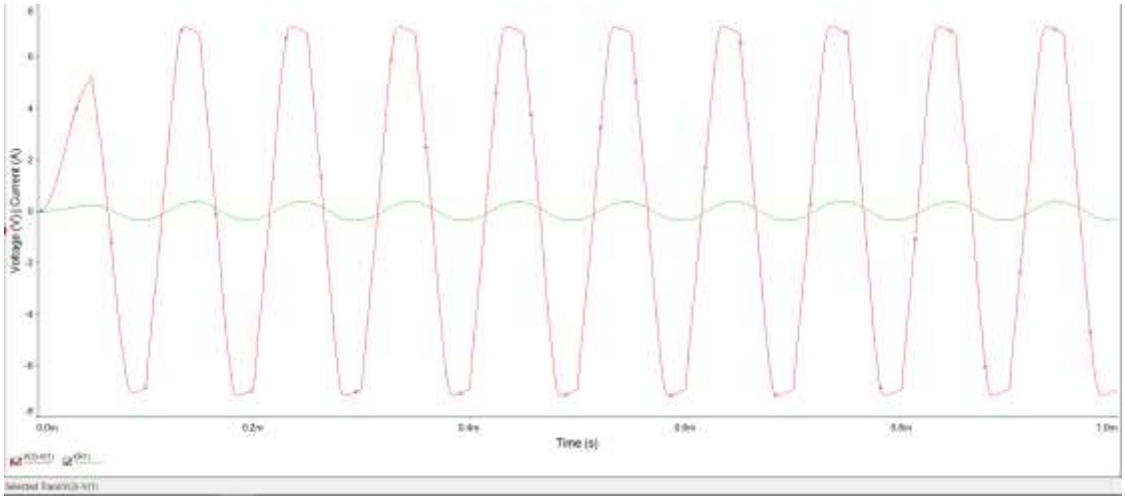

Рис. 3.15. Графики напряжения и тока в нагрузке итоговой схемы

На рисунке 3.16 приведен график гармонического состава выходного напряжения инвертора.

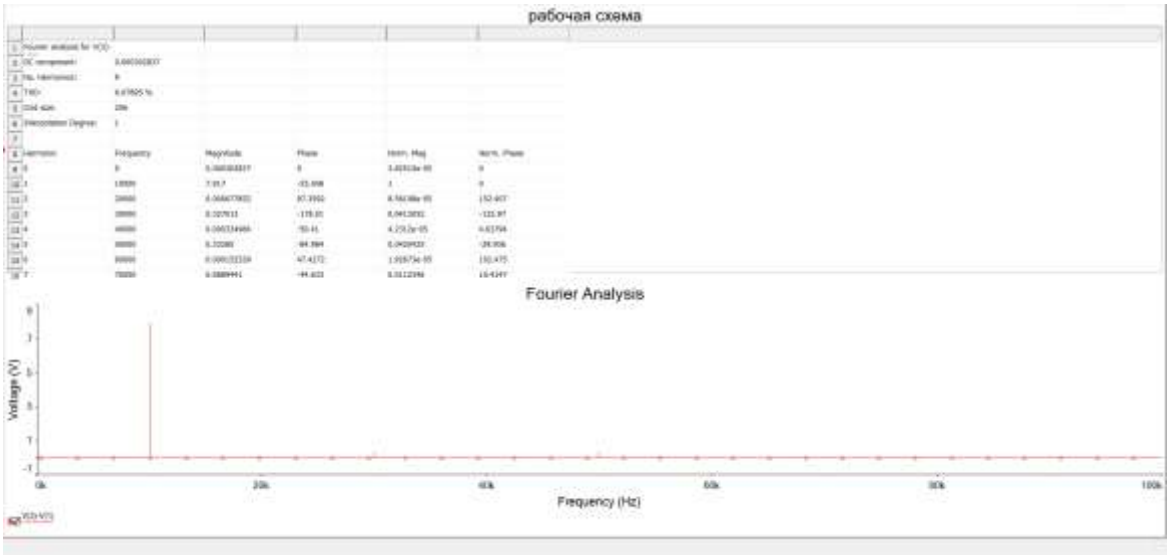

Рис. 3.16. Гармонический состав выходного напряжения итоговой схемы

Данное схемотехническое решение позволило приблизить форму выходного напряжения инвертора к синусоидальной, что доказывается улучшением соотношения основной гармоники к третьей в 20 раз (рис. 3.16).

Вопросы для подготовки к выполнению и защите курсового проекта

1. Какие требования предъявляются к переключающим элементам автономных инверторов?
2. Для чего служат обратные диоды в схемах автономных инверторах напряжения (АИН)?
3. При каких условиях и как осуществляется энергообмен между нагрузкой и источником питания?
4. При каком условии при расчете токов ключевых элементов АИН можно использовать метод основной гармоники?
5. Каким коэффициентом оценивается качество кривой выходного напряжения АИН?