

Г.С. Мыцык, К.А. Воронцов

**СБОРНИК МЕТОДИЧЕСКИХ УКАЗАНИЙ К
ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ЭЛЕКТРОННЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ»**

Оглавление

Лабораторная работа №1. Исследование характеристик однофазного двухканального инвертора с ДШИМ напряжения в каналах (и с ОШИМ выходного напряжения) и создание на этой основе информационного базиса для его проектирования	3
Общие требования к содержанию отчета	3
Порядок проведения исследования	3
Задание для первой половины группы.....	7
Задание для второй половины группы.....	10
Лабораторная работа №2. Регулируемый по напряжению трёхфазный инвертор напряжения – ТИН-Р	14
Решаемые в работе задачи.....	14
Лабораторная работа №3. Трёхфазный инвертор напряжения с ШИМ по синусоидальному закону	19
Часть 1	19
Часть 2	20
Лабораторная работа №4. Четырёхквadrантный преобразователь.....	23
Лабораторная работа №5. Трансформаторно-выпрямительные устройства	27

Лабораторная работа №1.

Исследование характеристик однофазного двухканального инвертора с ДШИМ напряжения в каналах (и с ОШИМ выходного напряжения) и создание на этой основе информационного базиса для его проектирования

Общие требования к содержанию отчета

Отчет должен содержать:

- титульный лист;
- два листа с индивидуальным заданием;
- два листа с общими требованиями к содержанию отчета;
- результаты выполненных студентом нижеперечисленных пунктов исследования;
- резюме (аннотация) выполненной работы. Объем не более 0.5 страницы.

Результаты по отдельным пунктам обязательно нумеруются и приводятся в порядке возрастания номеров пунктов. Любой иллюстративный материал (осциллограммы, графики, схемы и т.д.) должны быть подписаны и иметь сквозную нумерацию, например (Рис. 1. Схема модели однофазного двухканального инвертора с ДШИМ напряжения в каналах и с ОШИМ выходного напряжения). На графиках должна быть указана размерность исследуемых величин.

Порядок проведения исследования

1. Определить индивидуальные значения сопротивления и индуктивности нагрузки инвертора для $\cos \varphi_{2(l)} = 1$ и $0,8$.
2. Определить индивидуальные значения индуктивностей вторичных обмоток трансформаторов НИЯ необходимые для обеспечения требуемого действующего значения первой гармоники напряжения на выходе инвертора.
3. Определенные в п.1 и 2 значения ввести в модель, затем вставить в отчет схему модели. *Дать текстовое описание схемы модели однофазного инвертора.*
4. Провести ИКМ при $\cos \varphi_{2(l)} = 1$, $\mu = 1$, $\xi = 20$ и начальных значениях параметров Г-образного фильтра. Убедиться с помощью осциллограммы напряжения на нагрузке инвертора в правильности (то есть в соответствии

проектному замыслу) определенных в п.2 значений индуктивностей вторичных обмоток трансформатора. В качестве результатов на одном листе привести следующие осциллограммы:

- 1-ая осциллограмма – напряжение на вторичной обмотке трансформатора первой нулевой инверторной ячейки – НИЯ1 и ток в ней.
- 2-ая осциллограмма – напряжение на вторичной обмотке трансформатора второй НИЯ2 и ток в ней.
- 3-я осциллограмма – суммарное напряжение на вторичных обмотках трансформаторов НИЯ1, НИЯ2, напряжение на нагрузке инвертора и ток нагрузки.

5. Провести серию экспериментов ИКМ при $\cos \varphi_{2(1)}=1$, $\mu=0,5$, $\xi=10$ варьируя значения L и C фильтра, с целью определения минимального значения произведения LC_{min} Г-образного фильтра, обеспечивающего заданное значение $K_{Г(U2)}$. Записать найденные значения – L' и C' .

6. Провести серию экспериментов ИКМ при $\cos \varphi_{2(1)}=1$, $\mu=0,5$, $\xi=10$, изменяя, как указано в первом столбце табл.№1, найденные а п.5 параметры L' и C' , и заполнить эту таблицу (**примечание - в таблицу вписываются амплитудное значение первой гармоники выходного напряжения инвертора и действующие значения токов в первичной и вторичной обмотках трансформатора любой НИЯ, произведение $L' C'$ сохраняется неизменным**).

Таблица 1

	$K_{Г(U2)}$	$U_{2(1)m}$	$I_{W1 \text{ трансф. НИЯ}}$	$I_{W2 \text{ трансф. НИЯ}}$
$2 \cdot L', C'/2$				
L', C'				
$L'/2, 2 \cdot C'$				

На основе полученных экспериментальных данных, изложить в письменной форме свои соображения, по поводу выбора наиболее рационального сочетания значений L' и C' .

7. Выполнить п.4, используя наиболее рациональное (выбранные в п.6) соотношение значений L и C фильтра.

8. Провести серию экспериментов ИКМ при оптимальных (выбранных в п.6) значениях параметров Г-образного фильтра и $\cos \varphi_{2(1)}=1$, варьируя значения

параметров μ и ξ . Построить в отдельной координатной плоскости, семейство зависимостей $K_{\Gamma(U_2)} = f(\xi)$ при $\mu = 1, 2; 1, 0; 0, 75; 0, 5$. Значения параметра $\xi = 10; 20; 30; 40$.

Эксперимент повторить и задокументировать при $\cos \varphi_{2(1)} = 0, 8$.

Сформулировать в письменной форме закономерности изменения исследуемых зависимостей

9. Построить спектрограммы напряжений до фильтра ($u_{вх.ф}$) и после фильтра - на нагрузке (u_2) (в диапазоне частот (f) от 0 до 60кГц).

1-ый лист:

- 1-ая спектрограмма - $u_{вх.ф}(f)$ при $\mu = 1; \xi = 10$.
- 2-ая спектрограмма - $u_2(f)$ при $\mu = 1; \xi = 10$.
- 3-ья спектрограмма - $u_{вх.ф}(f)$ при $\mu = 1; \xi = 20$.
- 4-ая спектрограмма - $u_2(f)$ при $\mu = 1; \xi = 20$.

2-ой лист:

- 1-ая спектрограмма - $u_{вх.ф}(f)$ при $\mu = 0, 5; \xi = 10$.
- 2-ая спектрограмма - $u_2(f)$ при $\mu = 0, 5; \xi = 10$.
- 3-ья спектрограмма - $u_{вх.ф}(f)$ при $\mu = 0, 5; \xi = 20$.
- 4-ая спектрограмма - $u_2(f)$ при $\mu = 0, 5; \xi = 20$.

Сформулировать в письменной форме закономерности изменения исследуемых зависимостей.

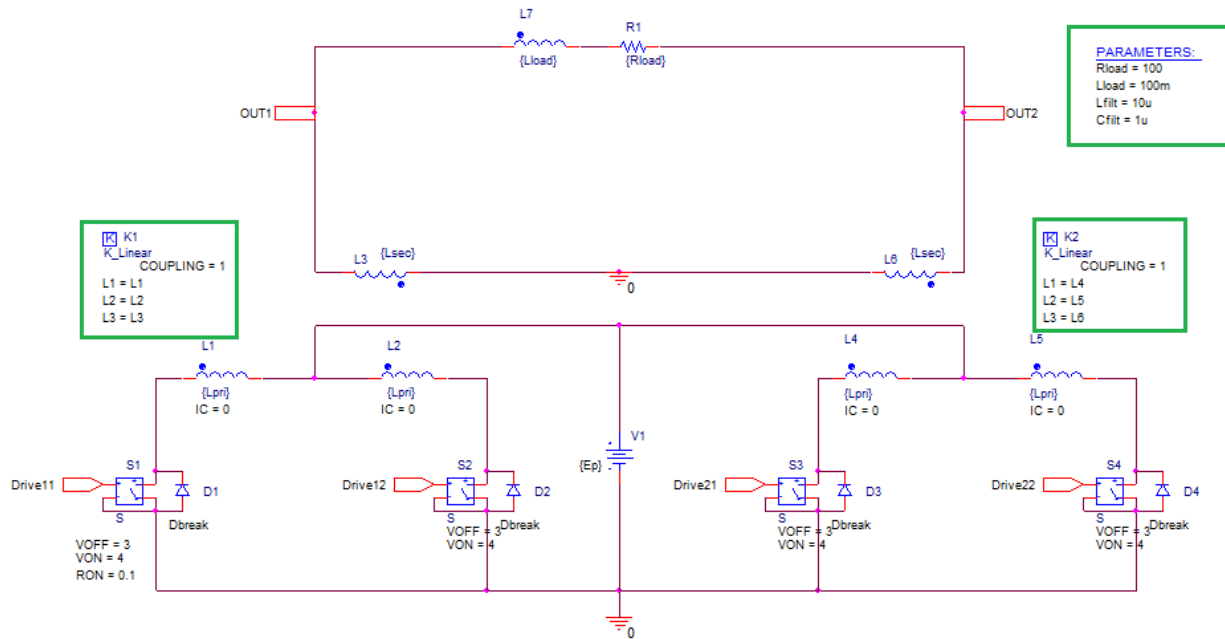


Рис. 1. Схема ИК-модели силовой части преобразователя

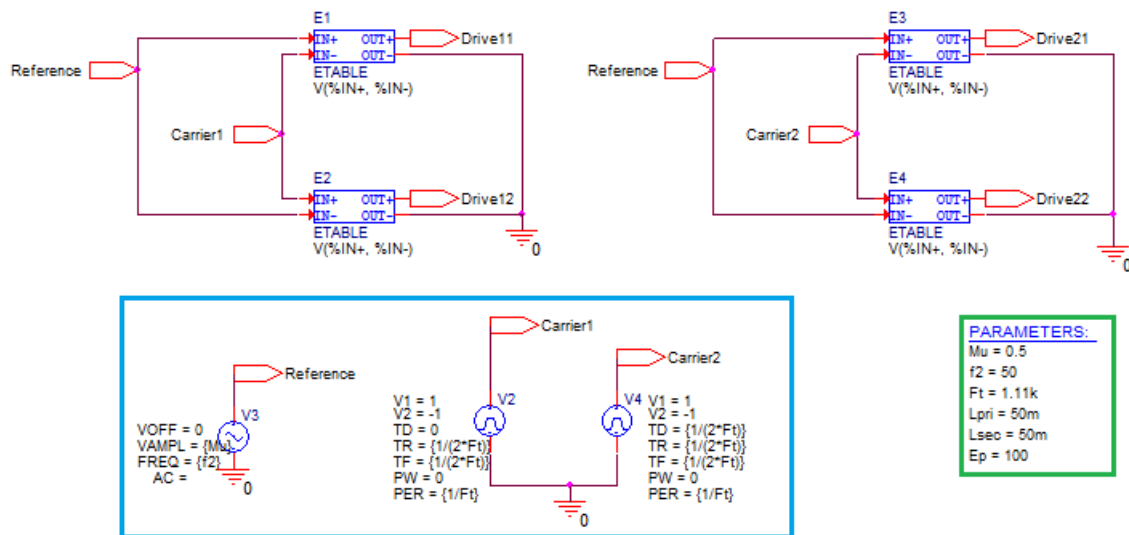


Рис. 2. Схема ИК-модели системы управления

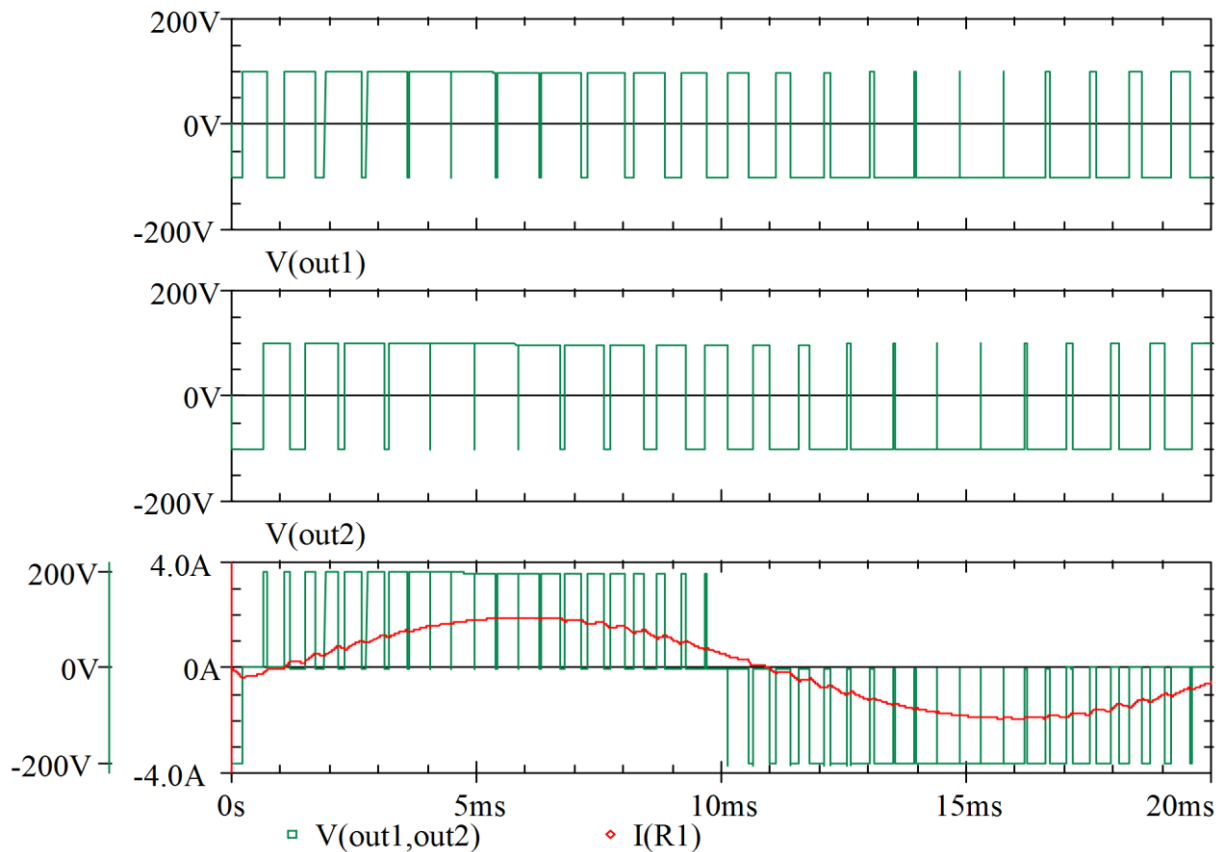


Рис. 3. Пример осциллограмм выходного напряжения каналов, суммарного выходного напряжения и тока в активно-индуктивной нагрузке

Задание для первой половины группы

(*) Общее направление исследования: на основе ИКМ при заданных значениях параметров μ определить влияние параметра $\xi = f_p / f_z$ на коэффициент гармоник $K_{Г(U_2)}$ выходного напряжения инвертора с выходной частотой $f_{2(1)} = 400$ Гц, заданным выходным напряжением $U_{2(1)} = 115$ В (действ. знач. Основной гармоники) с заданными значениями мощности RL нагрузки $S_{2(1)}$ (задается индивидуально) при $\cos \varphi_{2(1)} = 1,0$ и $\cos \varphi_{2(1)} = 0,8$. Области изменения параметров: $\mu = 1,2; 1,0; 0,75; 0,5$; $\xi = 10 \dots 30$ с шагом 10. Результаты представить в виде графических зависимостей.

() Общее задание**

На основе серии численных экспериментов при $\mu = 0,5$ найти минимальное значение произведения LC Г образного фильтра, обеспечивающее $K_{Г(U_2)} \leq 8\%$. В качестве начальных значений взять значения L и C , указанные в индивидуальном задании. Для найденного значения LC_{min} определить рациональное соотношение сомножителей этого произведения $(L / C)^{opt}$. Для оптимизированного $(L / C)^{opt}$ построить зависимость $K_{Г(U_2)} = f(\xi)$ для значений μ , указанных в (*). При значениях $\mu = 1,0; 0,5$ для значений параметра $\xi = 10; 20$ вывести на печать спектрограммы выходного напряжения (в диапазоне частот от 0 до 60 кГц): а) - до фильтра и б) - после фильтра. Результаты представить в виде графических зависимостей. (На печать выводить по 4 plots на 1-м листе А4. На каждом из 2-х листов для одного μ).

(f_p – частота разворачивающего напряжения треугольной формы (тактовая частота); f_z – частота задающего напряжения синусоидальной формы, равная частоте выходного напряжения инвертора; $\mu = U_{zm} / U_{pm} = 1 \div 0$ – глубина модуляции, параметр регулирования напряжения). **Сформулировать рекомендации по проектированию.**

(*) Рекомендации по оформлению**

На печать вывести типовые временные диаграммы рабочих процессов (напряжение до фильтра и после фильтра + ток нагрузки (на 1-ом плоте), напряжение на дросселе фильтра, его ток и ток через конденсатор (на 2-ом плоте) – оба плота на 1 общем листе формата А4 с полями: слева и сверху - 2,5 см, справа – 1,5 см, снизу – 6 см (место для подрисуночной подписи), а также зависимости в соответствии с индивидуальным заданием. Результаты представить в виде графических зависимостей. (На печать выводить по 4 плота на 1-м листе А4. На каждом из 2-х листов для одного μ). Число графиков и их вид согласовать с преподавателем.

(**) Дополнительные указания:**

1) Для обеспечения требуемого уровня выходного напряжения (действующее значение 115В) задать соответствующее значение коэффициента трансформации трансформатора при напряжении питания инвертора $E_{II} = 30$ В.

2) В том случае, если после проведения исследований значение параметра $K_{\Gamma(U_2)}$ при значении $\xi \leq 20$ окажется больше 8%, подобрать (увеличить) параметры фильтра, обеспечивающие уменьшение $K_{\Gamma(U_2)}$ до этого значения. Если $K_{\Gamma(U_2)}$ окажется существенно меньше заданного значения, параметры фильтра необходимо уменьшить. В отчетной записке указать число итераций, которое пришлось сделать до определения приемлемых параметров фильтра. **Для снижения числа итераций предварительно ознакомиться с упрощённой методикой определения параметров фильтра в уч. пособии: Мыцык Г.С. и др. «Поисковое проектирование устройств....».**

3) После выполнения задания группа совместно анализирует и обсуждает полученные результаты исследований. Сверяет качественную непротиворечивость индивидуально полученных результатов и формулирует выявленные закономерности и итоговые выводы, которые представляются в заключительной части записки.

4) Материалы работы оформляются в форме научно-исследовательской работы (с титульным листом, аннотацией, комментариями к осциллограммам и графикам и выводами). Обобщающие материалы представляются в виде текста и графиков. Завершающим этапом является защита выполненной работы.

5) В задании с целью активизации самостоятельного логического мышления не для всех шагов исследования даны (однако могут быть даны в ходе выполнения работы) исчерпывающие указания. В этих случаях исследователь или же сам определяет путь решения задачи, или же консультируется с преподавателем.

6) Перед выполнением работы целесообразно составить детализированную программу Ваших действий. При затруднениях консультироваться с преподавателями.
Параметры индивидуального задания (необходимо включить в отчет)

№ в списке 1-ой половины	Мощность нагрузки $S_{2(l)}$, кВА	Начальные параметры фильтра	
		L , мГн	C , мкФ
1	1	2	2
2	2	1,8	4
3	3	1,6	6
4	4	1,4	8
5	5	1,2	10
6	6	1,0	12
7	7	0,8	14
8	8	0,6	16
9	9	0,4	18
10	10	0,3	19
11	11	0,2	20
12	12	1,0	10
13	13	0,8	12
14	14	0,7	15
15	15	0,6	20

Целью настоящей исследовательской работы является закрепление ранее приобретенных знаний, развитие логического мышления и освоение навыков самостоятельного исследования, - качества которые именно в такой совокупности необходимы при поисковом проектировании новых устройств силовой электроники (на базе использования современных возможностей имитационного компьютерного моделирования).

При несоответствии результатов фильтрации выходного напряжения ИН ожидаемым процессам обращаться к преподавателям.

Указание 1: на титульном листе обязательно указываются:

- Ф.И.О. студента;
- номер подгруппы (1 или 2) и номер варианта;
- значение заданной выходной частоты;
- расчётные значения индуктивностей всех обмоток трансформаторов;
- значения трёх параметров: $S_{2(l)}$, кВА; L , мГн; C , мкФ.

Все данные свести в таблицу.

Указание 2: значения индуктивностей обмоток трансформаторов рассчитываются индивидуально при заданных напряжении питания, выходном напряжении и выходной частоте. Определение индуктивности первичной полуобмотки трансформатора рассчитывается по следующей методике:

1. При заданной выходной мощности ИН (по основной гармонике) и заданном КПД $\eta=0,8$ определяем входную мощность, потребляемую от источника питания с напряжением $E_{\text{п}}$.

2. При заданном напряжении питания определяем потребляемый ИН от источника питания ток.

3. Первичные полуобмотки трансформаторов работают попеременно (в противофазе, без пауз), т.е. со скважностью $s=2$. С учётом этого (и п.2) определяем действующее значение тока через полуобмотку – $I_{W1(\text{ном})}$.

4. Задаёмся током ХХ ИН, например, $I_{W1(\text{хх})}=0,05 \cdot I_{W1(\text{ном})}$.

5. Определяем входное сопротивление полуобмотки трансформатора на выходной частоте: $Z_{\text{вх}}=E_{\text{п}} / I_{W1(\text{хх})} \approx X_{L(W1)}$ (в пренебрежении её активным сопротивлением).

6. Используя равенство: $X_{L(W1)}=\omega L_{(W1)}$, находим L_{W1} .

7. Значения индуктивностей выходных обмоток двух трансформаторов находят следующим образом:

7.1. При $\mu=1$ выходное напряжение ИН имеет форму с ОШИМ. При этом амплитуда 1-й (основной) гармоники напряжения $U_{2(1)m}$ равна максимальному значению этого напряжения. Следовательно, при последовательном соединении вторичных обмоток трансформаторов напряжение на каждой из них должно быть равно:

$$U_{W2}=0,5 U_{2(1)m}.$$

7.2. При известных значениях напряжений на первичных полуобмотках и на вторичной обмотке определяем коэффициент трансформации K_T .

7.3. При известной индуктивности первичной полуобмотки (и с учётом п.7.2) определяем индуктивность вторичной обмотки: $L_{W2}=K_T^2 L_{W1}$.

8. Ввести полученные значения индуктивностей в ИК-модель ИН и начать ИКМ.

Примечание: Указание 2 должно быть реализовано в цифрах и представлено в начальной части отчёта.

Задание для второй половины группы

(*) Общее направление исследования: на основе ИКМ при заданных значениях параметров μ определить влияние параметра $\xi=f_p/f_z$ на коэффициент гармоник $K_{Г(U_2)}$ выходного напряжения (после фильтра) инвертора с частотой $f_{2(1)}=50\text{Гц}$, и напряжением $U_{2(1)}=220\text{В}$ с заданными (индивидуально) значениями мощности RL нагрузки $S_{2(1)}$ при $\cos\varphi_{2(1)}=1,0$ и $\cos\varphi_{2(1)}=0,8$. Области изменения параметров: $\mu=1,2; 1,0; 0,75; 0,5$; $\xi=10\dots 50$ с шагом 10. Результаты представить в виде графических зависимостей.

(f_p – частота развёртывающего напряжения треугольной формы (тактовая частота); f_z – частота задающего напряжения синусоидальной формы, равная частоте выходного

напряжения инвертора; $\mu = U_{zm} / U_{pm} = 1 \div 0$ – глубина модуляции, параметр регулирования напряжения). **Сформулировать рекомендации по проектированию.**

() Общее задание**

На основе серии численных экспериментов при $\mu = 0,5$ найти минимальное значение произведения LC Γ образного фильтра, обеспечивающее $K_{\Gamma(U_2)} \leq 5\%$. В качестве начальных значений взять значения L и C , указанные в индивидуальном задании. Для найденного значения LC_{min} определить рациональное соотношение сомножителей этого произведения $(L / C)^{opt}$. Для оптимизированного $(L/C)^{opt}$ построить зависимость $K_{\Gamma(U_2)} = f(\xi)$ для значений μ , указанных в (*). При значениях $\mu = 1, 0; 0,5$ для двух значений параметра $\xi = 10; 50$ вывести на печать спектрограммы выходного напряжения **(в диапазоне частот от 0 до 30 кГц): а) - до фильтра и б) - после фильтра.** (По 4 plots на 1-м листе А4. На каждом из 2-х листов для одного μ).

(*) Рекомендации по оформлению**

На печать вывести типовые временные диаграммы рабочих процессов (напряжение до фильтра и после фильтра + ток нагрузки (на 1-ом листе), напряжение на дросселе фильтра, его ток и ток через конденсатор (на 2-ом листе) – оба листа на 1 общем листе формата А4 с полями: слева и сверху - 2,5 см, справа – 1,5 см, снизу – 6 см (место для подписи), а также зависимости в соответствии с индивидуальным заданием. Число графиков и их вид согласовать с преподавателем.

(**) Дополнительные указания:**

1) Для обеспечения требуемого уровня выходного напряжения (действующее значение 220В) задать соответствующее значение коэффициента трансформации трансформатора при напряжении питания инвертора $E_{II} = 30$ В..

2) В том случае, если после проведения исследований значение параметра $K_{\Gamma(U_2)}$ при значении $\xi \leq 30$ окажется больше 8%, подобрать (увеличить) параметры фильтра, обеспечивающие уменьшение $K_{\Gamma(U_2)}$ до этого значения. Если $K_{\Gamma(U_2)}$ окажется существенно меньше заданного значения, параметры фильтра необходимо уменьшить. В отчетной записке указать число итераций, которое пришлось сделать до определения приемлемых параметров фильтра. **Для снижения числа итераций предварительно ознакомиться с упрощённой методикой определения параметров фильтра в уч. пособии: Мыцык Г.С. и др. «Поисковое проектирование устройств....».**

3) После выполнения задания группа совместно анализирует и обсуждает полученные результаты исследований. Сверяет качественную непротиворечивость индивидуально полученных результатов и формулирует выявленные закономерности и итоговые выводы, которые представляются в заключительной части записки.

4) Материалы работы оформляются в форме научно-исследовательской работы (с титульным листом, аннотацией, комментариями к осциллограммам и графикам и

выводами). Обобщающие материалы представляются в виде текста и графиков. Завершающим этапом является защита выполненной работы.

5) В задании с целью активизации самостоятельного логического мышления не для всех шагов исследования даны (однако могут быть даны в ходе выполнения работы) исчерпывающие указания. В этих случаях исследователь или же сам определяет путь решения задачи, или же консультируется с преподавателем.

6) Перед выполнением работы целесообразно составить детализированную программу Ваших действий. При затруднениях консультироваться с преподавателями.

Параметры индивидуального задания (необходимо включить в отчет)

№ в списке 2-ой половины	Мощность нагрузки $S_{2(l)}$, кВА	Начальные параметры фильтра	
		L , мГн	C , мкФ
1	1	10	10
2	2	10	12
3	3	8	14
4	4	8	16
5	5	6	18
6	6	6	20
7	7	4	22
8	8	4	24
9	9	2	26
10	10	2	28
11	11	3	30
12	12	4	40
13	13	5	50
14	14	4	60
15	15	5	50

Целью настоящей исследовательской работы является закрепление ранее приобретенных знаний, развитие логического мышления и освоение навыков самостоятельного исследования, - качества которые именно в такой совокупности необходимы при поисковом проектировании новых устройств силовой электроники (на базе использования современных возможностей имитационного компьютерного моделирования – ИКМ).

При несоответствии результатов фильтрации выходного напряжения ИН ожидаемым процессам обращаться к преподавателям.

Указание 1: на титульном листе обязательно указываются:

- Ф.И.О. студента;
- номер подгруппы (1 или 2) и номер варианта;
- значение заданной выходной частоты;
- расчётные значения индуктивностей всех обмоток трансформаторов;
- значения трёх параметров: $S_{2(l)}$, кВА; L , мГн; C , мкФ.

Все данные свести в таблицу.

Указание 2: значения индуктивностей обмоток трансформаторов рассчитываются индивидуально при заданных напряжении питания, выходном напряжении и выходной частоте. Определение индуктивности первичной полуобмотки трансформатора рассчитывается по следующей методике:

1. При заданной выходной мощности ИН (по основной гармонике) и заданном КПД $\eta=0,8$ определяем входную мощность, потребляемую от источника питания с напряжением E_{Π} .

2. При заданном напряжении питания определяем потребляемый ИН от источника питания ток.

3. Первичные полуобмотки трансформаторов работают попеременно (в противофазе, без пауз), т.е. со скважностью $s=2$. С учётом этого (и п.2) определяем действующее значение тока через полуобмотку – $I_{W1(ном)}$.

4. Задаёмся током ХХ ИН, например, $I_{W1(хх)}=0,05 \cdot I_{W1(ном)}$.

5. Определяем входное сопротивление полуобмотки трансформатора на выходной частоте: $Z_{вх}=E_{\Pi} / I_{W1(хх)} \approx X_{L(W1)}$ (в пренебрежении её активным сопротивлением).

6. Используя равенство: $X_{L(W1)}=\omega L_{W1}$, находим L_{W1} .

7. Значения индуктивностей выходных обмоток двух трансформаторов находят следующим образом:

7.1. При $\mu=1$ выходное напряжение ИН имеет форму с ОШИМ. При этом амплитуда 1-й (основной) гармоники напряжения $U_{2(1)m}$ равна максимальному значению этого напряжения. Следовательно, при последовательном соединении вторичных обмоток трансформаторов напряжение на каждой из них должно быть равно:

$$U_{W2}=0,5 U_{2(1)m}.$$

7.2. При известных значениях напряжений на первичных полуобмотках и на вторичной обмотке определяем коэффициент трансформации K_T .

7.3. При известной индуктивности первичной полуобмотки (и с учётом п.7.2) определяем индуктивность вторичной обмотки: $L_{W2}=K_T^2 L_{W1}$.

8. Ввести полученные значения индуктивностей в ИК-модель ИН и начать ИКМ.

Примечание: Указание 2 должно быть реализовано в цифрах и представлено в начальной части отчёта.

Лабораторная работа №2.

Регулируемый по напряжению трёхфазный инвертор напряжения – ТИН-Р

ЗАДАНИЕ НА ЛАБ. РАБОТУ №2

№	Мощность Нагрузки кВА	$\cos\varphi_{2(1)}$	f_2 [Гц]	R_2 [Ом]	L_2 [мГн]	E_{Π} [В]
1	1	0,85; 0,5; 0,2	50			100
2	2	0,80; 0,6; 0,1	400			
3	3	0,90; 0,6; 0,3	50			
4	4	0,85; 0,5; 0,2	400			
5	5	0,80; 0,6; 0,1	50			
6	6	0,90; 0,6; 0,3	400			
7	7	0,85; 0,5; 0,2	50			
8	8	0,80; 0,6; 0,1	400			
9	9	0,90; 0,6; 0,3	50			
10	10	0,85; 0,5; 0,2	400			
11	11	0,80; 0,6; 0,1	50			200
12	12	0,90; 0,6; 0,3	400			
13	13	0,85; 0,5; 0,2	50			
14	14	0,80; 0,6; 0,1	400			
15	15	0,90; 0,6; 0,3	50			
16	16	0,85; 0,5; 0,2	400			
17	17	0,80; 0,6; 0,1	50			
18	18	0,90; 0,6; 0,3	400			
19	19	0,85; 0,5; 0,2	50			
20	20	0,80; 0,6; 0,1	400			
21	21	0,90; 0,6; 0,3	50			300
22	22	0,85; 0,5; 0,2	400			
23	23	0,80; 0,6; 0,1	50			
24	24	0,90; 0,6; 0,3	400			
25	25	0,85; 0,5; 0,2	50			
26	26	0,80; 0,6; 0,1	400			
27	27	0,85; 0,5; 0,2	50			
28	28	0,80; 0,6; 0,1	400			
29	29	0,90; 0,6; 0,3	50			
30	30	0,85; 0,5; 0,2	400			
31	31	0,80; 0,6; 0,1	50			

Решаемые в работе задачи

1. Закрепление: а) навыков составления компьютерной модели; б) навыков исследования процессов в направлении максимального понимания их физической сущности («что от чего и каким образом зависит»).

2. Поставленные задачи решаются по вышеприведённому индивидуальному заданию:

2.1. Значения параметров нагрузки R_2 и L_2 определяются при заданных значениях мощности нагрузки, частоты и напряжения питания ТИН-Р для заданных трёх значений $\cos\varphi_{2(1)}$.

3. На основе ИКМ получить представление о гармониках нулевой последовательности (ГНП) и показать их влияние на рабочие процессы. Для этого провести:

3.1. Соответствующую коррекцию в модели ТИН-Р;

3.2. Соответствующие эксперименты и проиллюстрировать их соответствующими осциллограммами.

4. На основе серии экспериментов определить (построить):

4.1. Зависимость постоянной составляющей потребляемого ТИН-Р тока от угла нагрузки $\varphi_{2(1)}$ при $\alpha=0$ и $\alpha=30^\circ$. Привести осциллограммы соответствующих процессов и зависимость $I_{d0}=f(\varphi_{2(1)})$.

4.2. Получить зависимость амплитуды основной гармоники выходного напряжения ТИН-Р $U_{2(1)m}$ от угла регулирования α (это регулировочная характеристика). Брать следующие значения угла $\alpha=0^\circ$; 15° ; 30° ; 45° ; 55° . Привести несколько (от 2-х до 3-х) осциллограмм выходных фазных напряжения и тока (на общем плоте).

5. Дать письменное определение КПД ТИН-Р.

5.1. Почему здесь нельзя пользоваться традиционным определением КПД ?
Ответ дать письменно.

6. Требования к оформлению такие же, как и в лаб. работе №1.

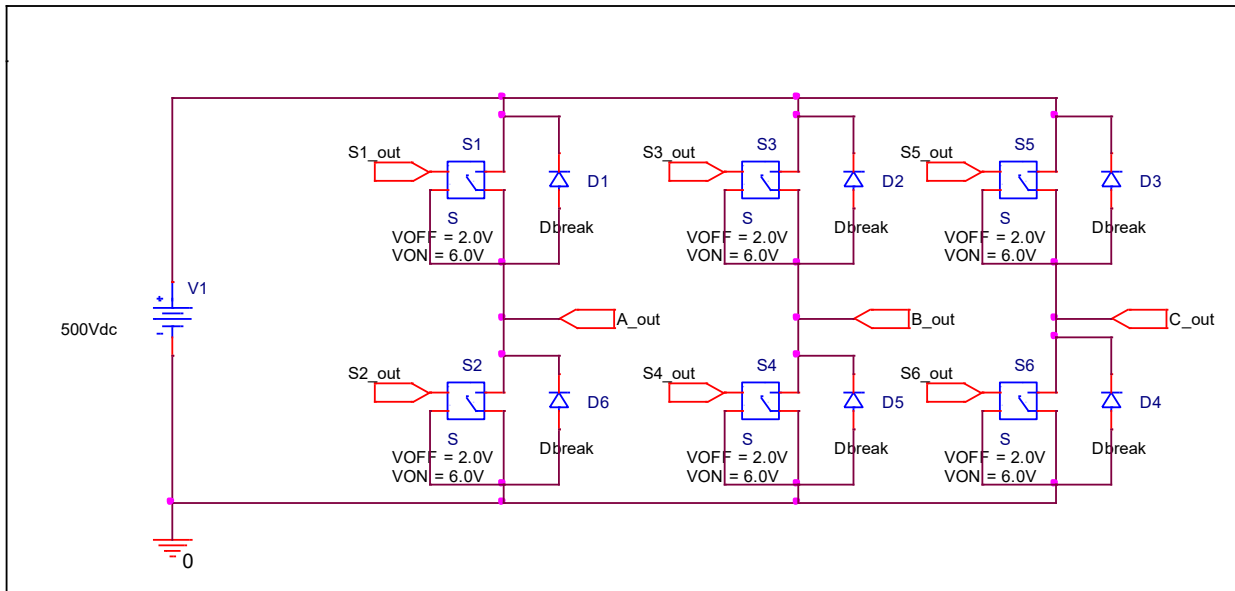


Рис. 1. Силовая часть трехфазного мостового инвертора

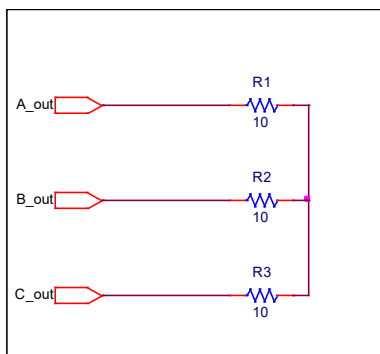


Рис. 2. Нагрузка

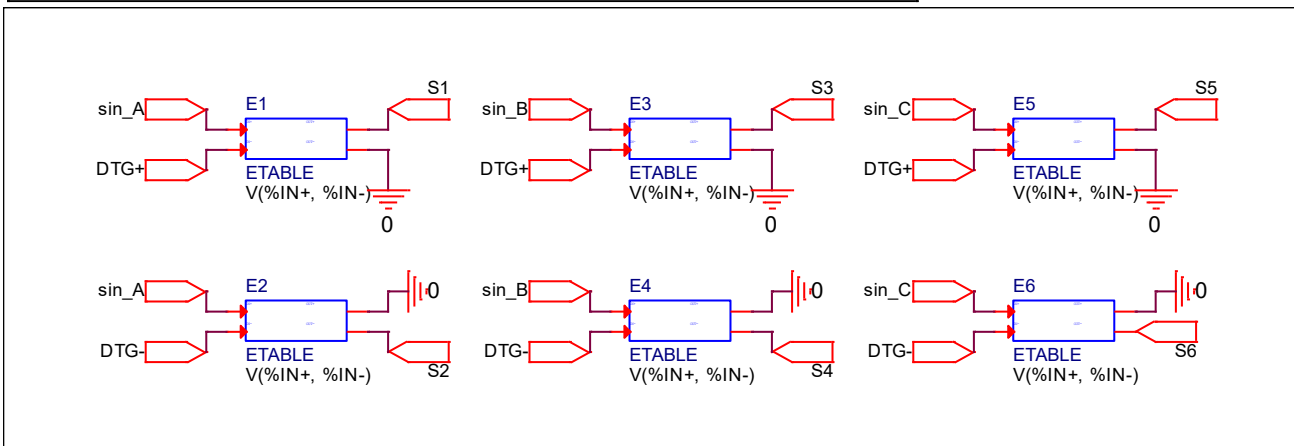
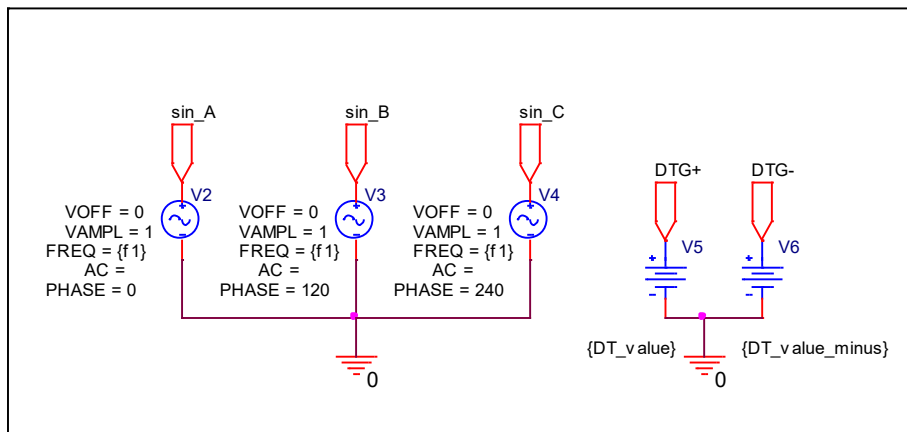
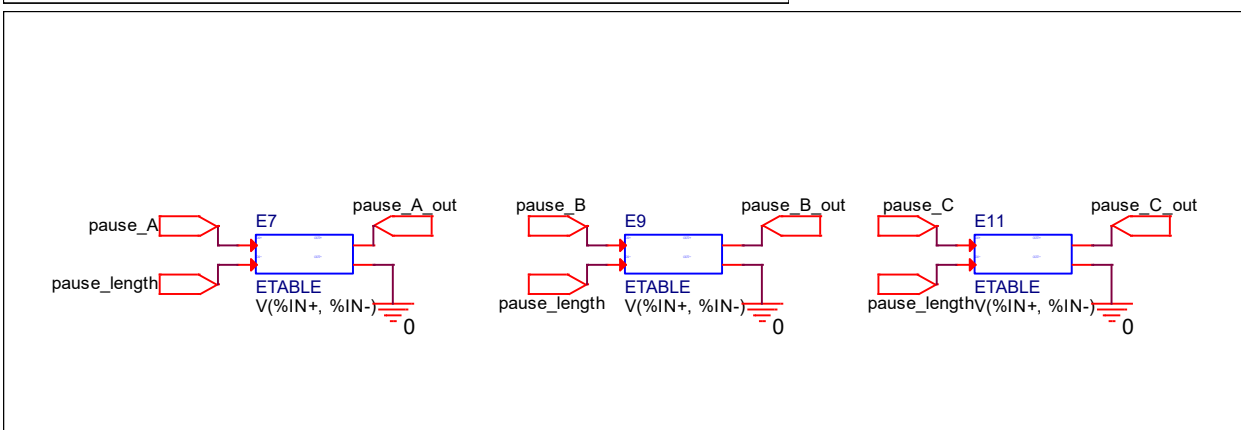
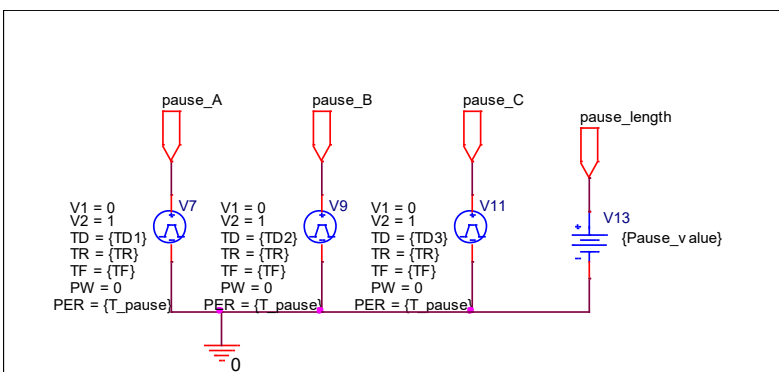
Рис. 3. Блок формирования π -алгоритма с мёртвым временем

Рис. 4. Блок формирования паузы

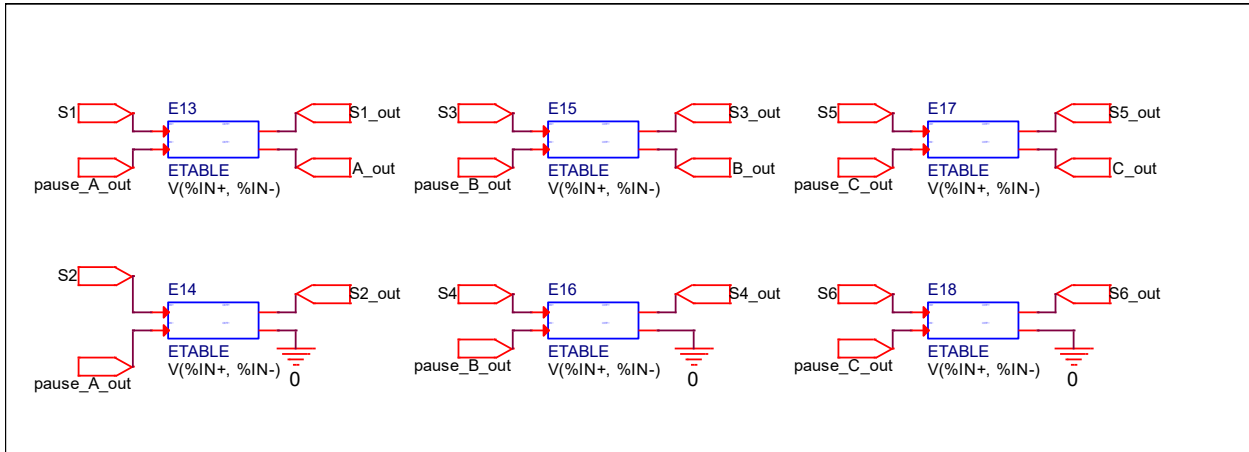


Рис. 5. Блок драйверов

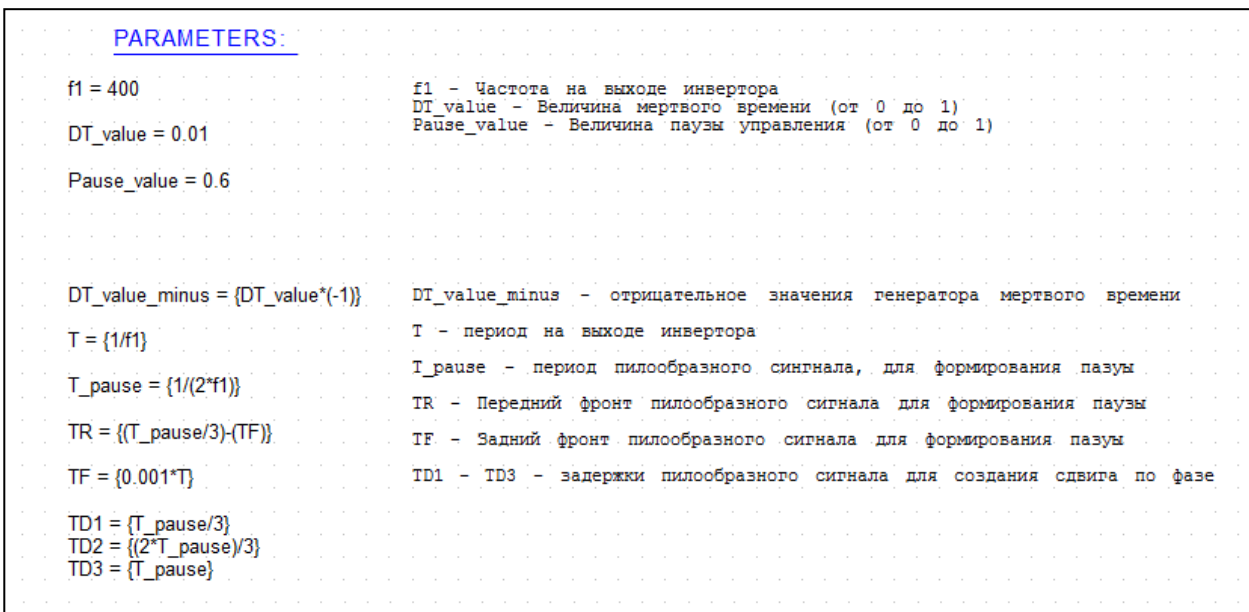


Рис. 7. Глобальные переменные ИК-модели

Лабораторная работа №3.

Трёхфазный инвертор напряжения с ШИМ по синусоидальному закону

Часть 1

Примечание: Блестяще выполнила работу Авцынова Т. Взять её для описания методички по ЛР. (05.04.19).

Цель работы:

- 1) приобретение навыков моделирования (ИКМ);
- 2) понимание ШИМ – как средства улучшения спектрального состава выходного напряжения и, как следствие, уменьшения массы фильтра;
- 3) понимание физической сути КПД ТИН и отличие его от его классического определения;
- 4) приобретение представлений о системном проектировании.

Задачи работы:

- 1) При принятых ранее индивидуальных заданиях выполнить эксперименты по определению параметров LC фильтра для ранее заданных параметров нагрузки при заданных значениях параметров ШИМ – $\xi = f_p/f_z$ (где $f_z = f_2$), $\mu = U_{zm}/U_{pm}$, где f_p, f_z – частота развертывающего напряжения треугольной формы и частота сигнала задания, равная частоте выходного напряжения f_2 ; U_{zm}, U_{pm} – максимальные значения сигнала задания синусоидальной формы и развертывающего напряжения.

Значениями параметров нагрузки и частоты руководствоваться индивидуальными заданиями Лаб.раб. №1

- 2) Уточнение: при $f_2=50$ Гц и $f_2=400$ Гц взять два значения $\xi=30; 50$ и для $\mu=1,0$ определить параметры фильтра, обеспечивающие $K_{Г(U2)} \approx 5\%$ для $f_2=50$ Гц и $K_{Г(U2)} \approx 8\%$ для $f_2=400$ Гц. Полученные значения $K_{Г(U2)}$ выводить на печать (в области осциллограмм). Дать спектрограммы напряжения до фильтра и после него. На печать вывести те же величины, что и в ЛР№1 (+ потребляемый ТИН ток). Осциллограммы и спектрограммы расположить на одном листе. (Для этого правильно определить целесообразные масштабы информации).

3) Повторить задание по п.2) для $\mu=0,5$.

4) **Проанализировать результаты и (письменно) сделать выводы по выполненным экспериментам.**

Часть 2

Работа выполняется на базе модели, созданной в ходе первой части лабораторной работы.

- 1) Определить частоту и ввести в сигнал задания всех фаз ТИН первую гармонику нулевой последовательности с амплитудой $U_{нпм}=1/6 \cdot U_{lm}$.
- 2) С помощью ИКМ (или аналитически) определить максимальную глубину модуляции по основной гармонике $\mu_{1\max}=U_{lm}/U_p$, при которой не наступает перемодуляция полного сигнала задания (образец результата представлен на рис. 1).
- 3) Провести эксперименты, описанные в части 1, для сформированного на предыдущем этапе закона модуляции и сравнить показатели качества выходного напряжения с полученными ранее результатами, сделать вывод о преимуществах или недостатках рассмотренного квазитрапецеидального закона модуляции по сравнению с синусоидальным.
- 4) * Дополнительное задание: обосновать соотношение $U_{нпм}/U_{lm}=1/6$

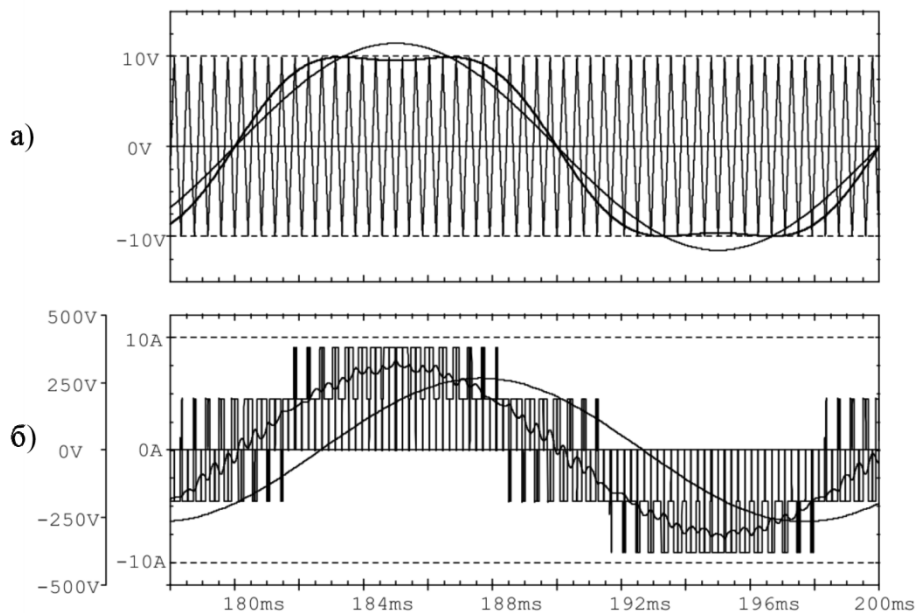


Рис. 1. Введение гармоники нулевой последовательности в сигнал задания:
 а – основная гармоника, результирующий сигнал задания и сигнал развёртки;
 б – выходные напряжения до и после фильтра, ток в активно-индуктивной нагрузке.

Лабораторная работа №4.

Четырёхквadrантный преобразователь с простым алгоритмом управления

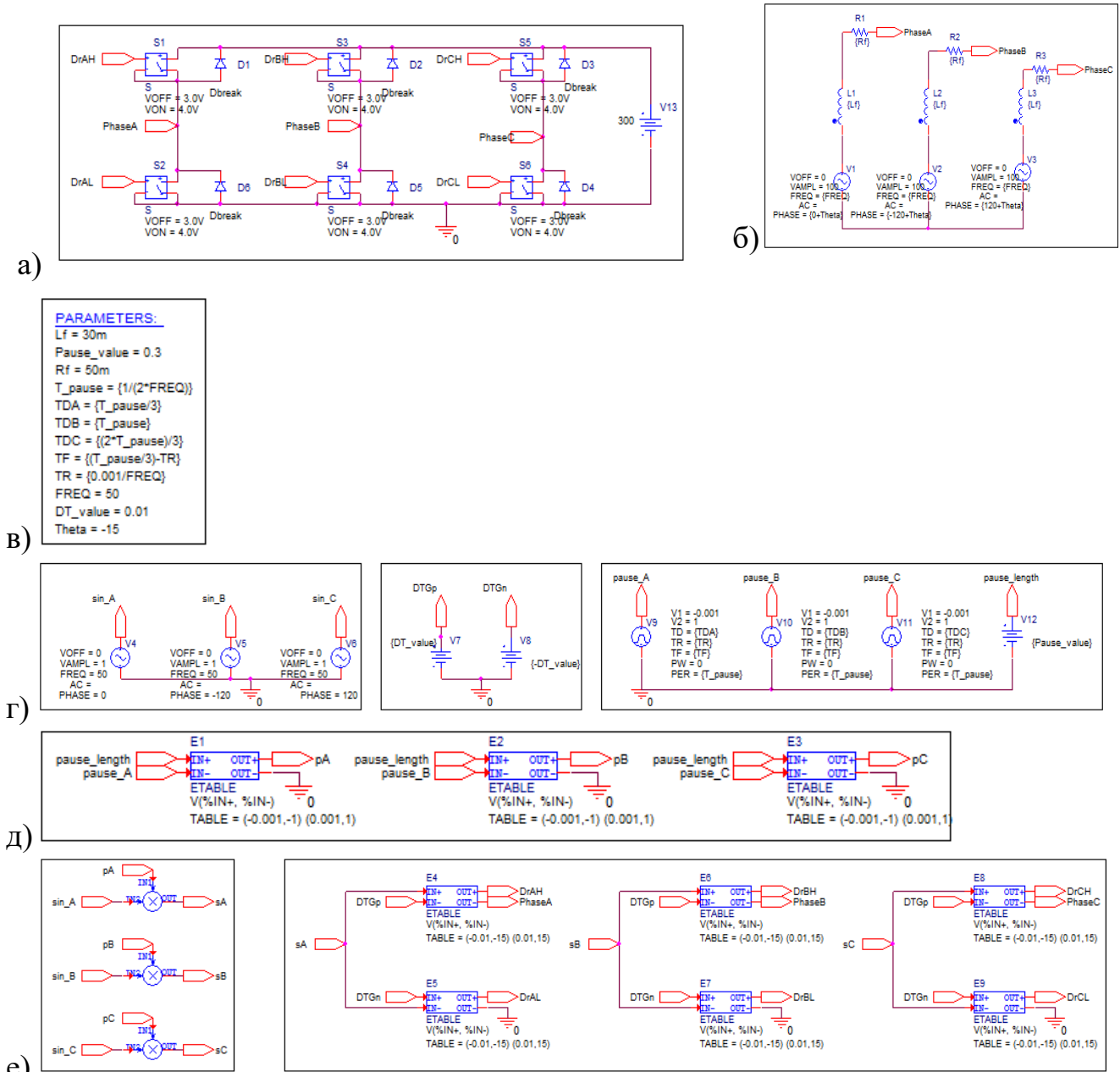


Рис.1. Схема ИК модели:

а – силовая часть ЧКП;

б – имитатор сети и фильтр;

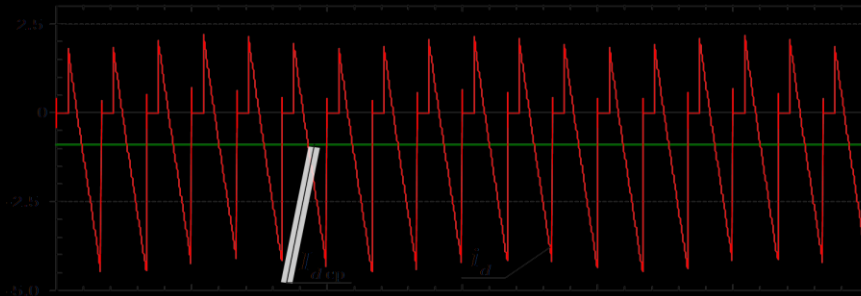
в – переменные проекта;

г – исходные сигналы ;

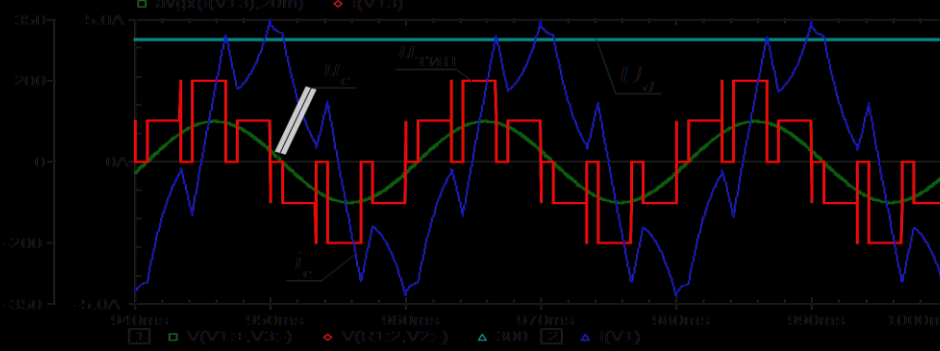
д – блок формирования паузы;

е – блок формирования алгоритма управления и блок драйверов силовых ключей.

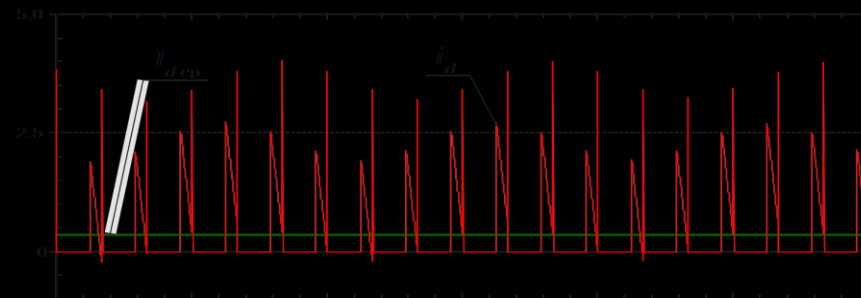
а)



б)



в)



г)

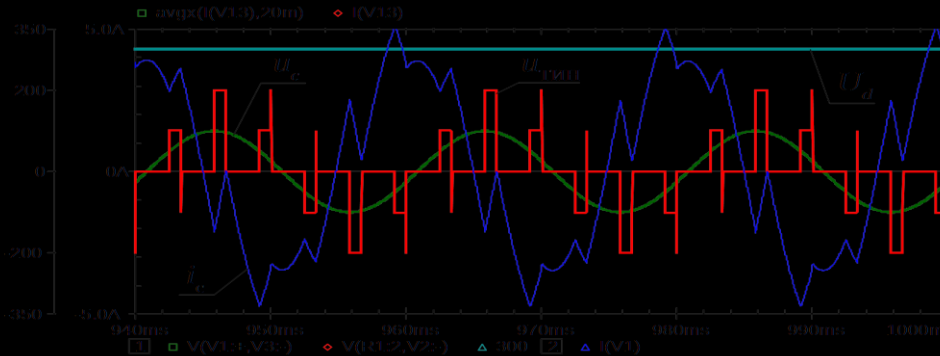


Рис. 2. Осциллограммы работы ЧКП:
а, б – в режиме отдачи энергии в сеть;
в, г – в режиме потребления энергии из сети;

Лабораторная работа №4.

Четырёхквadrантный преобразователь

I. Цель работы: ознакомление с функциональными свойствами 3-х фазной инверторной схемы, работающей в двух режимах:

I-1. В режиме трёхфазного инвертора напряжения (ТИН), работающего параллельно с промышленной сетью (РПС), когда в сеть отдаётся только активная составляющая тока ($\cos\varphi_{2(1)}=1$) – рис.1а.

I-2. В режиме малоискажающего трёхфазного выпрямителя (МИТВ), когда из сети потребляется только активная его составляющая ($\cos\varphi_{1(1)}=1$), – рис.1б.

II. Базовая информация, которую необходимо знать, чтобы понять отличие двух вышеуказанных режимов от традиционного автономного режима его работы, это векторные диаграммы, характеризующие режимы I-1, I-2, которые представлены на рис.1а, рис.1б:

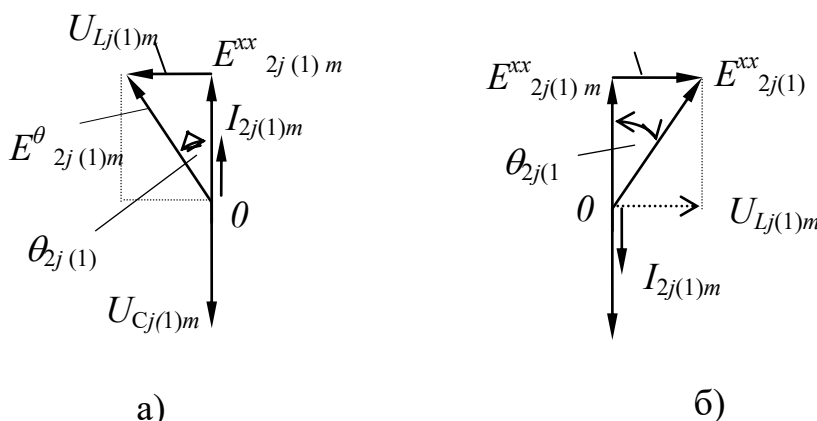


Рис.1. Векторные диаграммы, поясняющие процессы в ЧКП (по основной гармонике) в двух режимах: а) – в режиме параллельной работы с сетью – ТИН при РПС; и б) – в режиме МИТВ: $U_{Cj(1)m}$ – фазное напряжение промышленной сети; $E_{2j(1)m}^{xx}$ – противо-ЭДС ЧКП-2 на холостом ходу; $E_{2j(1)m}^{\theta}$ – противо-ЭДС в режиме отдачи в сеть чисто активного тока – $I_{2j(1)m}$ – отдаваемый в сеть ток; $\theta_{2j(1)}$ – угол нагрузки; $U_{L2j(1)m}$ – падение напряжения на дросселе индуктивности L_{2j} .

Учитывая различные функциональные свойства, которые может реализовать схема ТИН, целесообразно обозначать её более обобщенно – как четырёхквadrантный преобразователь (ЧКП), работающий в одном из 4-х режимов. В ЛР№4 исследуются только два режима.

Значения мощности, потребляемой из сети и отдаваемой в сеть, взять из индивидуальных заданий к ЛР №3.

III. Настроить ИК-модель ЧКП на работу в режиме ТИН при РПС.

III-1. Задать параметры требуемого режима ЧКП (напряжение и отдаваемый в сеть ток согласно заданию).

III-2. Описать принцип определения (задания) параметров μ_1 и θ_1 («1» – для основной гармоники) и задать эти значения в ИК-модели (выражения в блоках EVALUE на рис. 2б). Нетрудно показать, что $\mu_1 = \frac{2 \cdot U_{m\phi}}{E_n}$, причём, как было показано в лабораторной работе №3, допустимо увеличение μ_1 до 1,15 при искусственном введении в сигнал задания гармоник нулевой последовательности.

III-3. Определить требуемый уровень напряжения источника питания.

III-4. Проверить правильность результатов ИКМ с помощью снятия осциллограмм фазного напряжения и тока сети.

III-5. Снять осциллограмму тока в цепи источника питания. Измерить параметры источника питания – его U_{d0} , I_{d0} , P_{d0} , R_d .

III-6. Проверить полученные результаты на выполнение критерия энергетического баланса: $P_{d0} = 3U_{1(l)} \cdot I_{1(l)}$, где $U_{1(l)}$ и $I_{1(l)}$ – действующие значения фазных напряжения и тока.

IV. Тот же самый объём исследований (из 6 пунктов) провести для работы ЧКП в режиме МИТВ. При этом в качестве нагрузки в звене постоянного тока использовать параллельно включённые конденсатор (500 мкФ) и резистор, рассчитанный таким образом, чтобы при заданной мощности напряжение на нём было на 10% больше максимального значения выпрямленного линейного напряжения сети.

V. В отчёте по ЛР №4 должна быть представлена принципиальная блок-схема ЧКП силовой части и системы управления (СУ). Указать, датчики каких величин должны быть использованы для построения СУ.

VI. В конце отчёта сформулировать какие положения (вопросы) в работе наиболее тяжело (трудно) поддаются восприятию.

Примечание: Настоящая ЛР №4 в наибольшей мере ориентирована на самостоятельную работу и требует вдумчивого, глубокого ознакомления с материалом, а также тщательного (и осознанного) оформления результатов исследований. По не ясным вопросам обращаться к преподавателям и ассистентам.

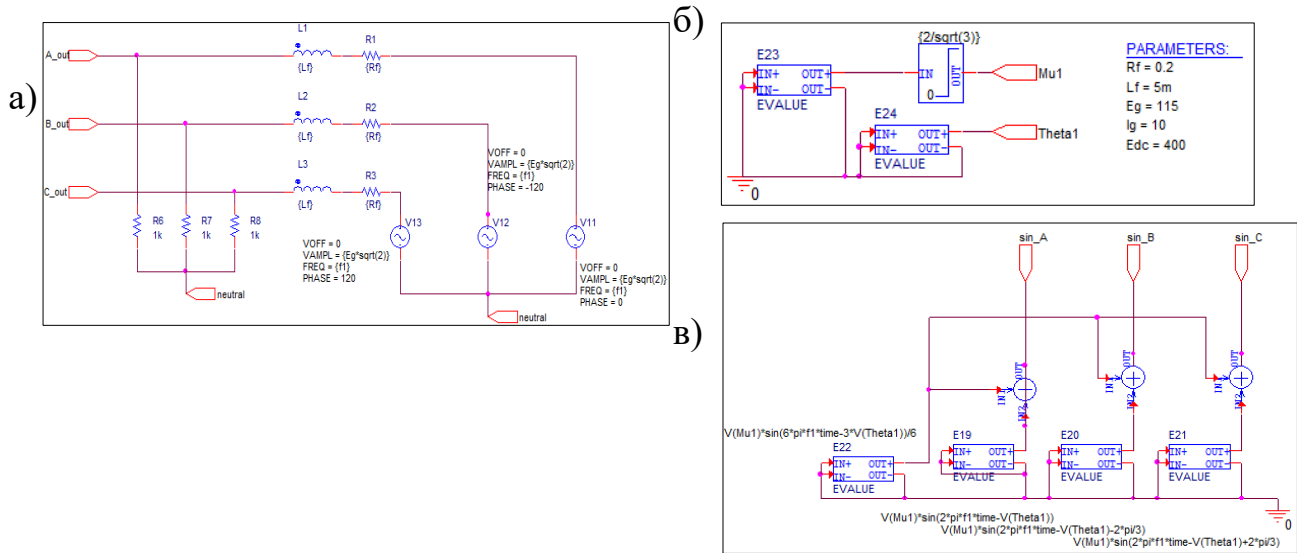


Рис. 2. К формированию ИК-модели ЧКП:

- а) – сопряжение ЧКП с сетью (порты A_out, B_out, C_out – выход ТИН, V11-V13 – модель сети бесконечной мощности);
- б) – способ расчёта μ и θ , входные данные для их определения: активное сопротивление (глобальная переменная R_f в блоке PARAMETERS) и индуктивность (L_f) сопрягающего дросселя, фазное напряжение сети (E_g), желаемое значение фазного тока (I_g), напряжение источника постоянного тока (E_{dc});
- в) – формирование сигналов задания для модулятора ширины импульсов с ведением третьей гармоники.

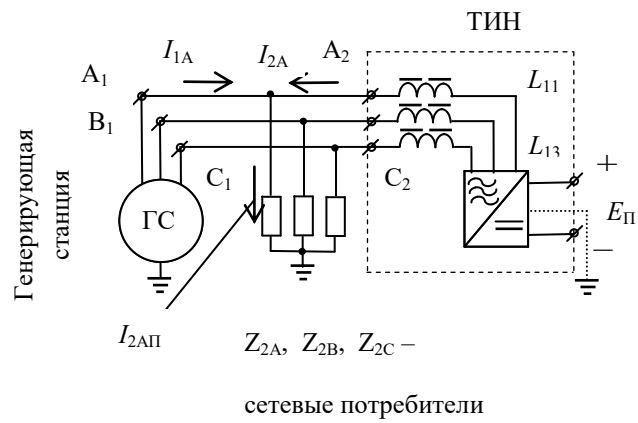
Формулы прямого вычисления параметров задающего сигнала (следуют из векторных диаграмм, приводятся для самопроверки):

$$\mu = \frac{2 \cdot U_{m\phi}}{E_n} = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{(U_{C\phi} - R \cdot I_{\phi})^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I_{\phi})^2}}{U_d}, \quad (2)$$

$$\mu(t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{(U_{C\phi} - R \cdot I_{\phi})^2 + (2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I_{\phi})^2}}{u_d(t)}, \quad (3)$$

$$\theta = \arctg \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot I_{\phi}}{U_{C\phi} - R \cdot I_{\phi}} \right), \quad (4)$$

где f – частота напряжения сети, L и R – индуктивность и активное сопротивление согласующего дросселя, $U_{C\phi}$ – фазное напряжение сети, I_{ϕ} – фазный ток ЧКП, U_d – напряжение в звене постоянного тока.



$$I_{2АП} = I_{1A} + I_{2A} \quad (1)$$

Рис.3. Принципиальная электрическая схема системы параллельной работы ТИН с сетью бесконечной мощности. Система управления ТИН, включая информационные каналы (в виде датчиков напряжения и тока) не показана.

Лабораторная работа №6.

Трансформаторно-выпрямительные устройства

№	Сетевое напряжение	Выходное напряжение U_{d0} [В]	Выходная мощность, P_{d0} [кВт]	Снять осциллограммы:
1	220 / 380 В, 50 Гц	10	3	1. Входного напряжения и тока (на одном плоте с двумя осями ординат) с определением коэффициента гармоник тока, его действующего значения и спектрограммы. 2. Токи на входе двух мостов (на двух плотах) с определением действующего значения тока и его спектрограммы. 3. Определение U_{d0} и спектрограммы выпрямленного напряжения и значения пульсаций в форме коэффициента гармоник напряжения. 4. Осциллограммы токов на выходе каждого из мостов и тока нагрузки (на отдельных координатных плоскостях)
2		15	6	
3		20	9	
4		25	12	
5		30	15	
6		35	18	
7		40	21	
8		45	24	
9		50	27	
10	115 / 208 В, 400 Гц	20	4	
11		30	7	
12		40	10	
13		50	13	
14		60	16	
15		70	19	
16		80	22	
17		90	25	
18		100	28	

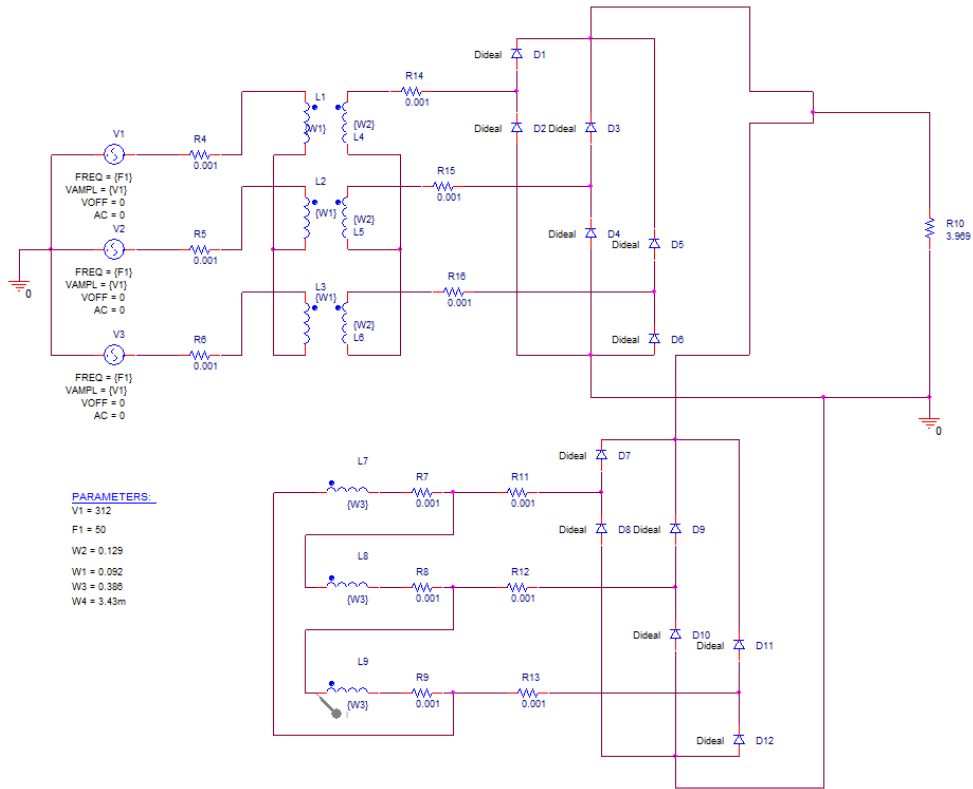


Рисунок 1. Схема ИК-модели силовой части ТВУ-1

<input checked="" type="checkbox"/> K1 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L1 L2 = L4	<input checked="" type="checkbox"/> K2 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L1 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K3 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L1 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K4 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L1 L2 = L2	<input checked="" type="checkbox"/> K5 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L1 L2 = L3	<input checked="" type="checkbox"/> K16 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L1 L2 = L7	<input checked="" type="checkbox"/> K17 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L1 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K18 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L1 L2 = L9
<input checked="" type="checkbox"/> K6 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L2 L2 = L4	<input checked="" type="checkbox"/> K7 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L2 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K8 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L2 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K9 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L2 L2 = L3	<input checked="" type="checkbox"/> K19 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L2 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K20 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L2 L2 = L7	<input checked="" type="checkbox"/> K21 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L2 L2 = L9	
<input checked="" type="checkbox"/> K10 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L3 L2 = L4	<input checked="" type="checkbox"/> K11 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L3 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K12 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L3 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K22 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L3 L2 = L9	<input checked="" type="checkbox"/> K23 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L3 L2 = L7	<input checked="" type="checkbox"/> K24 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L3 L2 = L8		
<input checked="" type="checkbox"/> K13 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L4 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K14 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L4 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K29 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L4 L2 = L7	<input checked="" type="checkbox"/> K30 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L4 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K31 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L4 L2 = L9			
<input checked="" type="checkbox"/> K15 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L5 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K28 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L5 L2 = L7	<input checked="" type="checkbox"/> K32 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L5 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K33 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L5 L2 = L9				
<input checked="" type="checkbox"/> K34 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L6 L2 = L7	<input checked="" type="checkbox"/> K35 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L6 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K36 K_Linear COUPLING = 1 L1 = L6 L2 = L9					
<input checked="" type="checkbox"/> K25 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L7 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K26 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L7 L2 = L9						
<input checked="" type="checkbox"/> K27 K_Linear COUPLING = -0.5 L1 = L8 L2 = L9							

Рисунок 2. Матрица коэффициентов магнитной связи трансформатора ТВУ-1

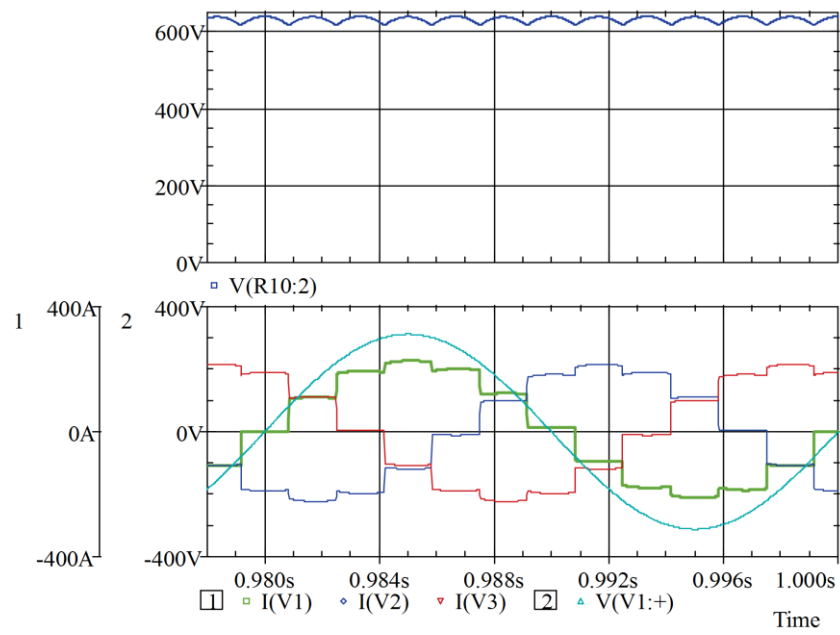


Рисунок 3. Осциллограммы выходного напряжения и входного тока ТВУ-1

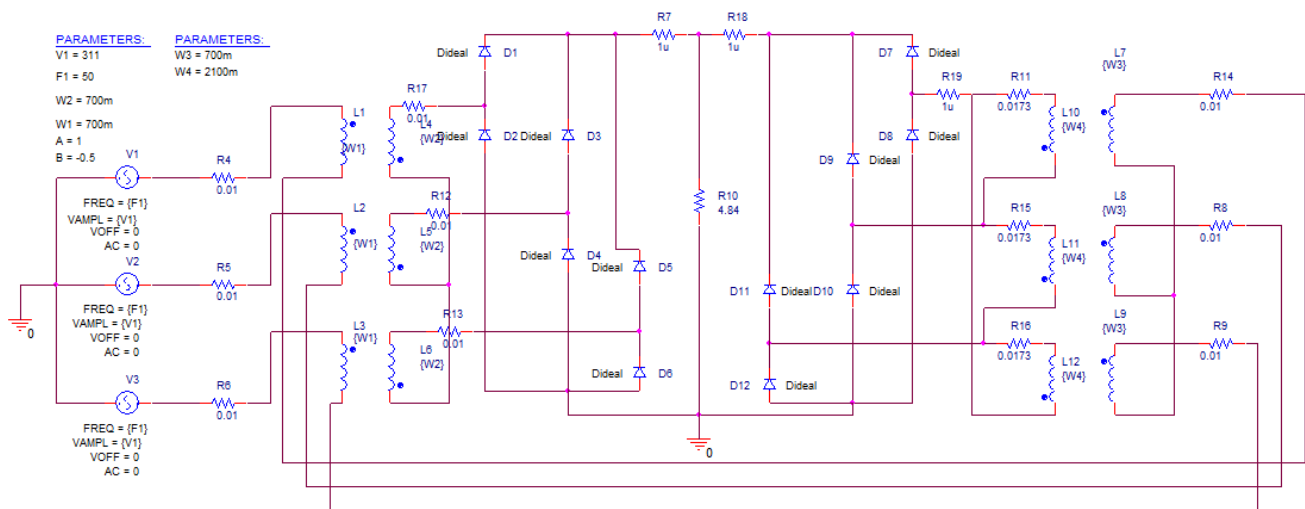


Рисунок 4. Схема ИК-модели силовой части ТВУ-2

<input checked="" type="checkbox"/> K1 K_Linear COUPLING = (A) L1 = L1 L2 = L4	<input checked="" type="checkbox"/> K2 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L1 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K3 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L1 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K4 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L1 L2 = L2	<input checked="" type="checkbox"/> K5 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L1 L2 = L3	<input checked="" type="checkbox"/> K16 K_Linear COUPLING = (A) L1 = L7 L2 = L10	<input checked="" type="checkbox"/> K17 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L7 L2 = L8	<input checked="" type="checkbox"/> K18 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L7 L2 = L11	<input checked="" type="checkbox"/> K19 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L7 L2 = L9	<input checked="" type="checkbox"/> K20 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L7 L2 = L12
<input checked="" type="checkbox"/> K6 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L2 L2 = L4	<input checked="" type="checkbox"/> K7 K_Linear COUPLING = (A) L1 = L2 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K8 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L2 L2 = L6	<input checked="" type="checkbox"/> K9 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L2 L2 = L3		<input checked="" type="checkbox"/> K24 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L8 L2 = L10	<input checked="" type="checkbox"/> K21 K_Linear COUPLING = (A) L1 = L8 L2 = L11	<input checked="" type="checkbox"/> K22 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L8 L2 = L9	<input checked="" type="checkbox"/> K23 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L8 L2 = L12	
<input checked="" type="checkbox"/> K10 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L3 L2 = L4	<input checked="" type="checkbox"/> K11 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L3 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K12 K_Linear COUPLING = (A) L1 = L3 L2 = L6			<input checked="" type="checkbox"/> K25 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L9 L2 = L10	<input checked="" type="checkbox"/> K26 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L9 L2 = L11	<input checked="" type="checkbox"/> K27 K_Linear COUPLING = (A) L1 = L9 L2 = L12		
<input checked="" type="checkbox"/> K13 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L4 L2 = L5	<input checked="" type="checkbox"/> K14 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L4 L2 = L6				<input checked="" type="checkbox"/> K28 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L10 L2 = L11	<input checked="" type="checkbox"/> K29 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L10 L2 = L12			
<input checked="" type="checkbox"/> K15 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L5 L2 = L6					<input checked="" type="checkbox"/> K30 K_Linear COUPLING = (B) L1 = L11 L2 = L12				

Рисунок 5. Матрицы коэффициентов магнитной связи трансформаторов ТВУ-2

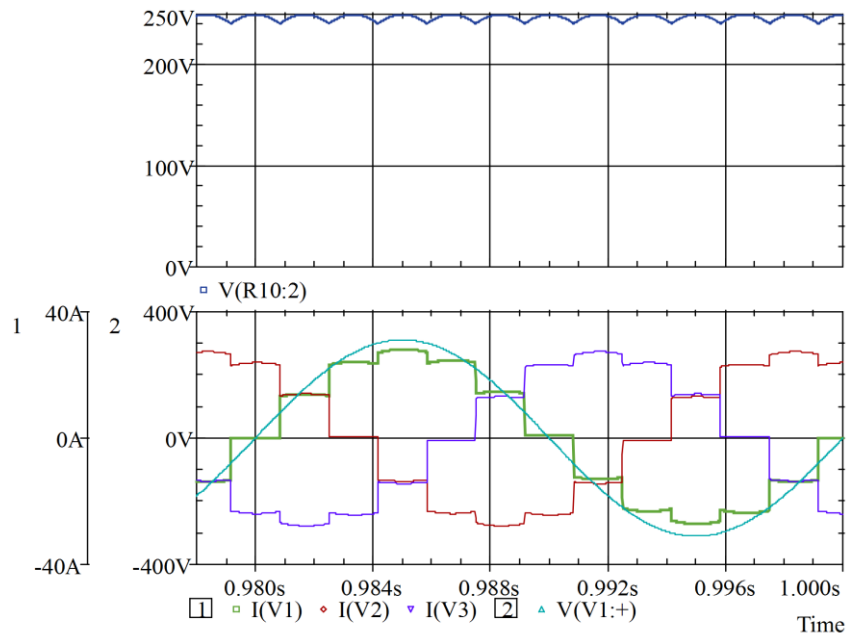


Рисунок 6. Осциллограммы выходного напряжения и входного тока ТВУ-2