

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра промышленной электроники и информационно-измерительной техники

С.С. Фролов

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

Оренбург

2016

УДК 621.382.002.56(07)

ББК 32.852я7

Ф18

Рецензент – доцент, кандидат технических наук С. В. Митрофанов

Фролов, С.С.

Ф18

Силовая электроника и электропитание радиоэлектронной аппаратуры: методические указания к лабораторным работам по дисциплинам «Электропитание радиоэлектронной аппаратуры», «Силовая электроника» / С.С. Фролов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2016. – 67 с.

Основное содержание: методические указания по исследованию схем неуправляемых и управляемых выпрямителей в программной среде Orcad Capture 9.2, рекомендации к расчётам силовых низкочастотных трансформаторов, рекомендации к оформлению результатов измерений и исследований.

Методические указания являются основным учебным руководством при выполнении лабораторных работ по курсу «Электропитание радиоэлектронной аппаратуры» и «Силовая электроника» студентам, обучающимся по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и наноэлектроника.

УДК 621.382.002.56(07)

ББК 32.852я7

© Фролов С.С., 2016

© ОГУ, 2016

Содержание

1 Лабораторная работа №1. Исследование неуправляемых выпрямителей в программной среде Orcad	6
1.1 Сбор исходных данных.....	6
1.2 Исследование выпрямителя при резистивном характере нагрузки	8
1.2.1 Предварительные расчёты.....	8
1.2.2 Вычерчивание схемы. Редактирование параметров элементов	8
1.2.3 Моделирование переходных процессов.....	9
1.2.4 Измерение амплитуды пульсации трассировкой диаграмм.....	11
1.2.5 Анализ средневыпрямленного значения и амплитуды первой гармоники	11
1.2.6 Обработка результатов измерений	14
1.3 Исследование выпрямителя при индуктивно-резистивной нагрузке	15
1.3.1 Обработка результатов измерений	15
1.3.2 Подключение индуктивного фильтра	15
1.3.3 Предварительные расчёты.....	16
1.3.4 Измерение параметров электрических процессов в выпрямителе	16
1.4 Исследование выпрямителя с LC-фильтром	18
1.4.1 Доработка индуктивного фильтра до LC-фильтра	18
1.4.2 Предварительные расчёты.....	18
1.4.3 Измерение параметров электрических процессов в выпрямителе	19
1.4.4 Обработка результатов измерений	19
2 Лабораторная работа №2. Транзисторные выпрямители.....	20
2.1 Исследование выпрямителя при резистивном характере нагрузки	21
2.1.1 Определение начальных параметров выпрямителей (при $\alpha=0$).....	21
2.1.2 Расчёт регулировочной характеристики при резистивной нагрузке	21
2.1.3 Измерение характеристик по результатам моделирования	23
2.2 Исследование выпрямителя при индуктивно-резистивной нагрузке	26
2.2.1 Регулировочная характеристика при резистивно-индуктивной нагрузке.....	26
2.2.2 Расчёт индуктивности фильтрующего дросселя.....	27

2.2.3 Измерение характеристик по результатам моделирования	27
2.3 Управляемые выпрямители в режиме инвертирования	27
3 Лабораторная работа №3. Конструктивный расчет трансформаторов.....	30
Список использованных источников.....	40
Приложение А Параметры выпрямителей при резистивной нагрузке.....	41
Приложение Б Таблицы результатов анализа выпрямителей	42
Приложение В Краткое руководство по схемному редактору Orcad Capture	43
В.1 Создание проекта.....	43
В.2 Формирование схемы.....	46
В.2.1 Размещение одиночных элементов.....	47
В.2.2 Размещение нескольких элементов одного типа.....	48
В.2.3 Размещение общей точки схемы («земли»)	49
В.3 Соединение элементов	49
В.3.1 Рисование проводников	49
В.3.2 Назначение имён цепей.....	50
В.4 Разворот, отражение и удаление элементов и проводников схемы	50
В.5 Редактирование параметров элементов.....	50
В.5.1 Редактирование параметров резисторов, конденсаторов и индуктивностей..	50
В.5.2 Редактирование параметров источников «VSIN».....	52
Приложение Г Формирование задания анализа и пуск моделирования	53
Приложение Д Вывод диаграмм электрических процессов	55
Д.1 Вывод диаграмм напряжений.....	55
Д.2 Вывод диаграмм токов	56
Д.3 Масштабирование графиков.....	57
Д.3.1 Масштабирование с помощью команды «Zoom Area».....	57
Д.3.2 Масштабирование командами «Zoom In» и «Zoom Out».....	58
Д.3.3 Масштабирование редактированием диапазонов по осям X и Y.....	58
Д.3.4 Возврат к масштабу «по умолчанию»	59
Д.4 Вывод множества диаграмм на разные графики.....	59
Д.5 Удаление диаграмм	59

Д.6 Удаление окна диаграмм	61
Приложение Е Параметры при резистивно-индуктивной нагрузке	62
Приложение Ж Типовые магнитопроводы и обмоточные провода.....	63

1 Лабораторная работа №1. Исследование неуправляемых выпрямителей в программной среде Orcad

Цели работы:

- 1) Изучение электрических процессов в неуправляемых выпрямителях при следующих видах нагрузок:
 - a) резистивной;
 - b) индуктивно-резистивной;
 - c) при использовании индуктивно-емкостного фильтра.
- 2) Исследование определяющих параметров и характеристик выпрямителей в перечисленных режимах.

1.1 Сбор исходных данных

Каждая бригада в настоящей лабораторной работе занимается изучением одной из схем выпрямления на рисунке 1.1 (по указанию преподавателя). На рисунке 1.1 представлены схемы для моделирования выпрямителей в программной среде Orcad 9.2 или Orcad 10, в которых источники синусоидального напряжения заменяют понижающие трансформаторы.

Каждой бригаде выдаётся понижающий трансформатор, а также значения:

- сопротивление нагрузки R_n ;
- индуктивности сглаживающего дросселя L_1 .

Указанные значения фиксируются в таблице 1.1.

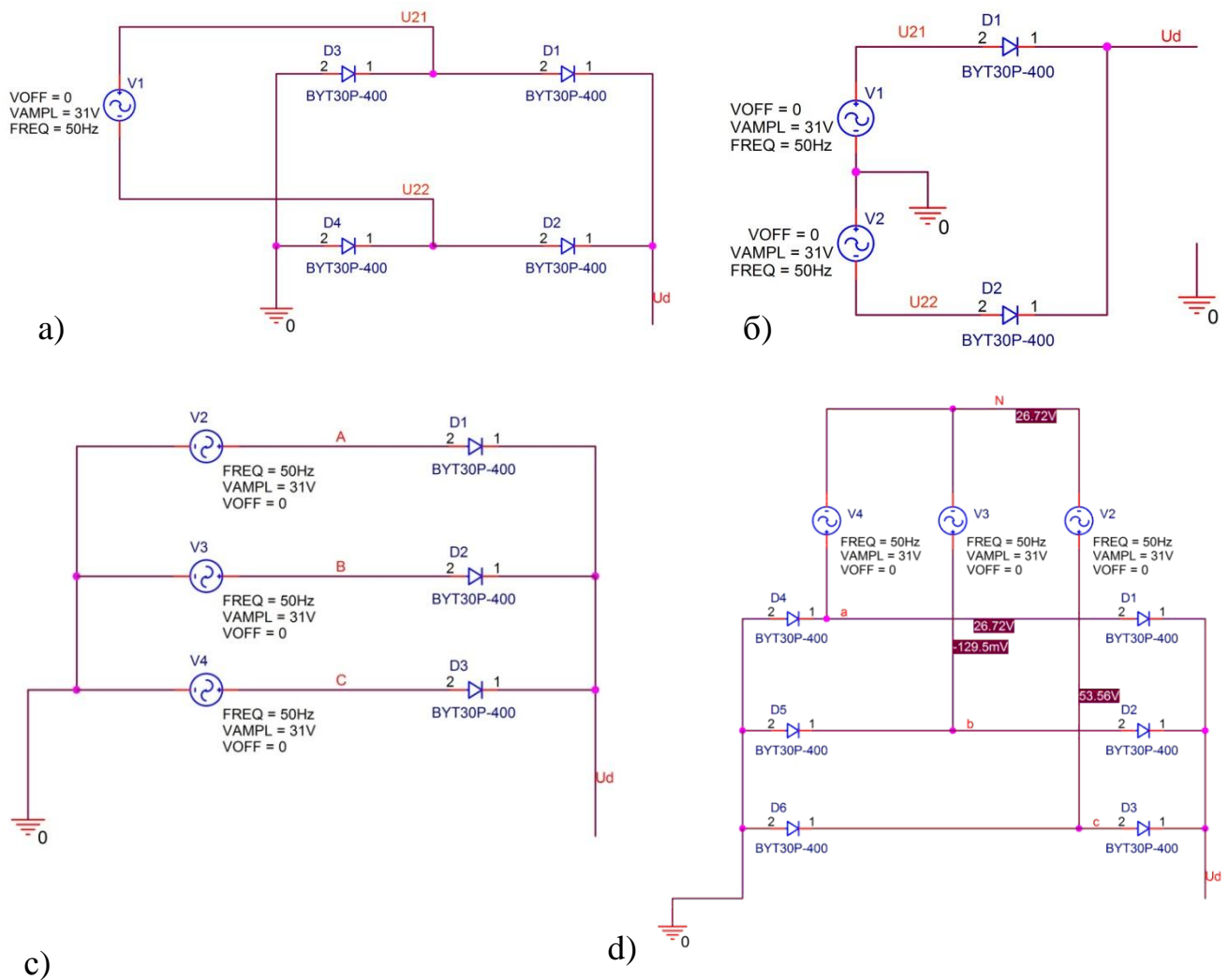


Рисунок 1.1 – Схемы выпрямителей для моделирования в программной среде Orcad:

- a) однофазного мостового; б) однофазного со средней точкой; в) трёхфазного со средней точкой; г) трёхфазного мостового

Таблица 1.1 – Исходные данные

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Частота сети, Гц	f	50
Сопротивление первичной обмотки (для нескольких обмоток – среднее значение), Ом	r_I	
Сопротивление вторичной обмотки (для нескольких обмоток – среднее значение), Ом	r_{II}	
Действующее напряжение первичной обмотки, V	U_I	
Действующее напряжение вторичной обмотки, V	U_2	
Сопротивление нагрузки, Ом	R_n	
Индуктивность сглаживающего дросселя, мГн	L_1	

Измерить омметром мультиметра В7-34 сопротивления вторичных и первичных обмоток r_{II} и r_I трансформатора (не включая в сеть!!). Вычесть из результатов измерений сопротивление короткозамкнутых щупов мультиметра.

Включив трансформатор в сеть, вольтметром того же мультиметра измерить действующее напряжение U_2 и U_1 вторичных и первичных обмоток

Все результаты измерений фиксируются в таблице 1.1.

1.2 Исследование выпрямителя при резистивном характере нагрузки

1.2.1 Предварительные расчёты

Пользуясь соотношениями и данными из таблицы А.1 приложения А определить параметры выпрямителя, указанные в таблице 1.2. Результаты зафиксировать в столбец «Расчётное значение» таблицы 1.2 и строку «Результат расчёта» таблицы Б.1 приложения Б0.

Таблица 1.2 – Параметры выпрямителя при резистивном характере нагрузки

Наименование параметра	Обозначение	Расчётное значение
Средневыпрямленное напряжение на выходе, В	U_{d0}	
Ток нагрузки, А	I_{d0}	
Средний ток диода, А	$I_{vd,0}$	
Максимальный ток диода, А	$I_{vd,II}$	
Максимальное обратное напряжение диода, В	$U_{vd,обр}$	
Частота первой гармоники выходного напряжения, Гц	f_1	
Коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя, определённый по амплитуде пульсации	$q_{1n,1}$	
Коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя, определённый по амплитуде первой гармоники	$q_{1n,2}$	

1.2.2 Вычерчивание схемы. Редактирование параметров элементов

Пользуясь рекомендациями приложения В, вычертить в схемном редакторе Orcad Capture схему своего выпрямителя, подключив к выходным зажимам выпря-

мителя («Ud» и «земля» в схемах рисунка 1.1) резистор нагрузки. Рекомендуется соединительным проводникам присвоить свои имена, установив рядом с ними метки, хотя бы такие же, как на схеме вашего исследуемого выпрямителя на рисунке 1.1.

При редактировании параметров элементов учитывать следующее:

- для резистора нагрузки не забыть установить заданное преподавателем значение сопротивления;

- для источника гармонического напряжения VSIN:

- амплитуда напряжения $U_{2m} = V_{AMPL} = \sqrt{2} \cdot U_2$;
- частота $FREQ=f=50\text{Hz}$;
- начальное постоянное смещение $VOFF=0$.

- в качестве диода используйте элемент BYV28-200 из библиотеки ediode.olb.

Первая цифра в маркировке – «28» – примерно соответствует предельному значению постоянного тока в амперах, вторая – «200» – предельному обратному напряжению. В настоящей работе указанные значения с многократным запасом превысят вычисленные значения $I_{vd,0}$ и $U_{vd,обр}$, что при моделировании в Orcad Capture допустимо. При моделировании же «живых» электронных макетов диоды подбираются, естественно, лишь с небольшим запасом. С рекомендациями определения запаса познакомитесь при выполнении следующей, «живой» лабораторной работы.

1.2.3 Моделирование переходных процессов

Задача настоящего раздела – выполнить расчёт (моделирование) переходных процессов для всех электрических величин исследуемого выпрямителя с помощью программы PSpice AD, вызываемой из оболочки Orcad Capture. Результаты моделирования в настоящей лабораторной работе будут использоваться:

- для качественного анализа диаграмм электрических процессов выпрямителя;
- для измерения параметров выпрямителя, указанных в таблице 1.2.

При моделировании выполняете действия, описанные ниже.

а) Пользуясь рекомендациями приложения Г сформировать задание на моделирование – отредактировать профиль симуляции. Время анализа TSTOP рекомендуется установить в соответствии с соотношением

$$TSTOP = \frac{10 \dots 20}{f}, \quad (1.1)$$

где $f=50$ Гц – частота сети. Запустить моделирование.

б) Пользуясь рекомендациями пункта Д.1 приложения Д и, по мере необходимости – пункта Д.4 – вывести диаграммы выходного напряжения U_d и входных напряжений источников. Проверьте полученные графические результаты на достоверность, сравнив их с соответствующими диаграммами процессов в выпрямителях с резистивной нагрузкой в лекциях или в учебных пособиях. Если соответствия нет – проверяйте корректность ввода схем, формирования профиля моделирования, корректность построения диаграмм.

Замечание: так как сетка значений по оси Y формируется автоматически, то на первый взгляд диаграммы выходных напряжений трёхфазных выпрямителей визуально могут отличаться от диаграмм в учебниках (рисунок 1.2). Для коррекции изображения отредактируйте диапазон наблюдаемых значений по оси Y, воспользовавшись рекомендациями пункта Д.3.

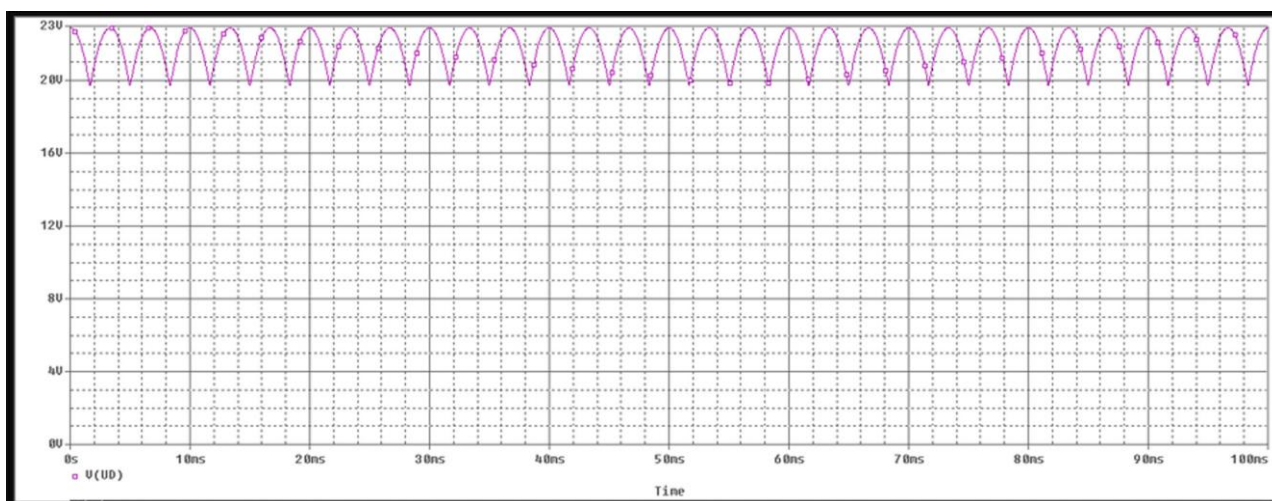







Рисунок 1.2 – Диаграмма напряжения на выходе трёхфазного мостового выпрямителя при автоматической настройке диапазонов значений по оси Y

1.2.4 Измерение амплитуды пульсации трассировкой диаграмм

При выполнении дальнейших измерений диаграммы синусоидальных напряжений не используются, поэтому можете их удалить, воспользовавшись рекомендациями пунктов Д.5 или Д.6 приложения Д. Далее измеряете амплитуду пульсаций по рекомендациям, описанным ниже.

а) Кликаете по пиктограмме  - на активном графике появится перекрестье из точечных прямых и небольшое окошко «Probe Cursor» с отображаемыми координатами в первой строке «A1» (первая – время, вторая – значение по оси Y).

б) Переводите курсор в максимум пульсации – значение Y из «Probe Cursor» присваиваете переменной $U_{d,\max}$. В максимум курсор можете поместить, кликнув по пиктограммам  или  (локального или глобального максимума).

в) Переводите курсор в минимум пульсации – значение Y из «Probe Cursor» присваиваете переменной $U_{d,\min}$. В минимум курсор можете также поместить, кликнув по пиктограммам  или  (локального или глобального минимума).


г) Вычисляете амплитуду пульсации

$$\Delta U_d = U_{d,\max} - U_{d,\min} \quad (1.2)$$

Результат вычисления (1.2) фиксируете в таблицу Б.1.

1.2.5 Анализ средневыпрямленного значения и амплитуды первой гармоники

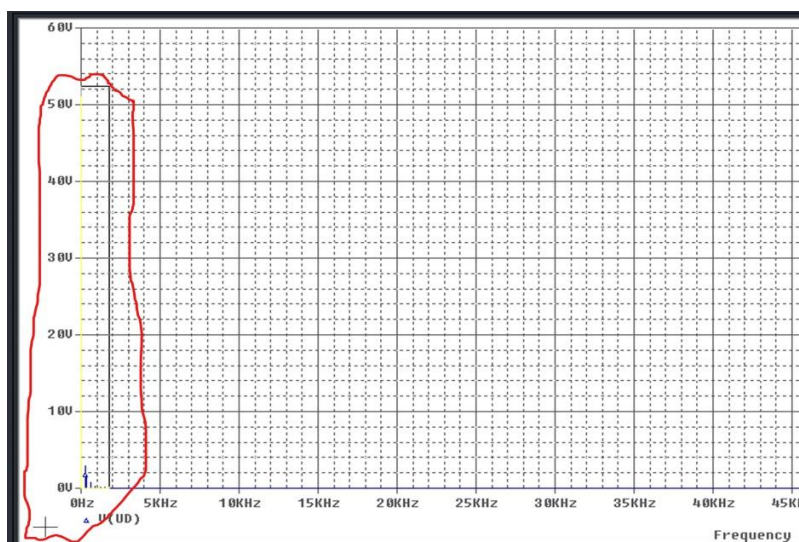
1.2.5.1 Получение диаграммы спектра

Кликнете по пиктограмме , либо выполните команду «Trace» - «Fourier» - в окне графика временные диаграммы заменятся спектральными (рисунок 1.3,а).

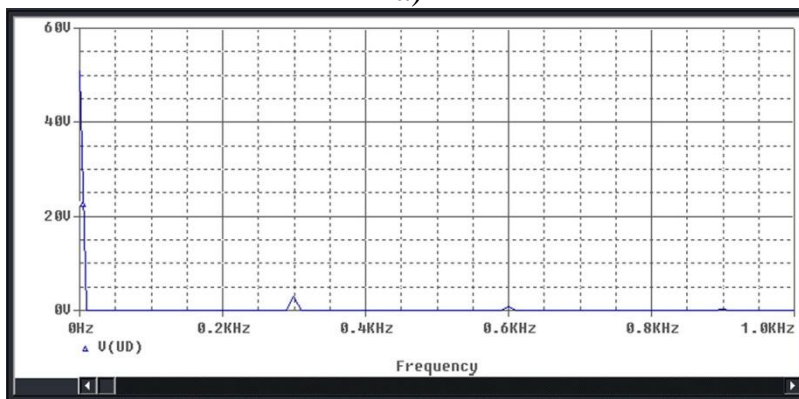
Основная энергия спектра сконцентрирована в узком диапазоне низких частот, значительно более узком, чем вся представленная на графике область частот. Поэтому почти невозможен детальный анализ интересующих нас компонент спектра - постоянной составляющей (средневыпрямленного напряжения) и первой гармоники.

Необходимо уменьшить количество наблюдаемых гармоник до трёх – пяти (рисунок 1.3,b). Решить такую задачу можете следующими способами:

- изменив диапазон наблюдаемых частот по оси X:
 - в меню «Plot» войти в подменю «Axis setting», либо щёлкнуть по любому числу по оси X – откроется окно «Axis setting» с активированным меню «X Axis»;
 - активировать режим «User Defined»;
 - установить значение нижней наблюдаемой частоты – $f_0 = 0 \text{ Hz}$;
 - установить значение верхней наблюдаемой частоты - $f_e \geq \dots 5 \text{ Д}_1$;
 - нажать кнопку «Enter» или кликнуть «Ok» - в окне «PSPice» получится изображение основных весомых компонент спектра, как на рисунке 1.3,b.




a)



b)

Рисунок 1.3 – Диаграммы амплитудных спектральных характеристик

а) отпустить левую кнопку – как и в предыдущем способе, в окне «PSpice» появиться диаграмма, включающая компоненту при $f_0 = 0 \text{ Hz}$, и несколько основных весомых компоненты спектра (рисунок 1.3,b).

Однако если вы не учли рекомендацию в скобках в пункте b), результат фрагментирования получится неудачным, непредсказуемым – в таком случае, кликнув по пиктограмме «» возвращаетесь к исходному масштабу изображения (рисунок 1.3,a) и повторяете действия пунктов а)-d).

1.2.5.2 Измерения


Если вы обратили внимание, полученная диаграмма спектральной функции на рисунке 1.3,b далеко не линейчатая, не дискретная. Вызвано это тем, что для программы PSpice (как и для всех аналогичных программ и приборов - Фурье-анализаторов) рассчитанные временные функции $y(t)$ электрических величин не периодичны в принципе. Они как бы активны на интервале времени анализа

$$t \in [\text{TSTART}, \text{TSTOP}], \quad (1.3)$$

а за его пределами нулевые. Поэтому спектральная характеристика каждого сигнала является непрерывной функцией спектральной плотности $S(f)$. Но если на интервале (1.3) умещается достаточное число периодов процесса $y(t)$, ненулевые значения $S(f)$ будут группироваться в полосах (областях) около частот f_n гармоник дискретного спектра. Чем больше периодов в диапазоне (1.3), тем полосы уже, а локальные максимумы $S_{n,\max} = S(f_n)$ приближаются к значениям амплитуд $A_{m,n}$ гармоник спектра периодического процесса. Результаты вычислительных экспериментов автора показали - при ограничении пятью периодами рассматриваемые расхождения не превышают 0,5 %.

Таким образом, значения спектральной плотности $S(f_n)$ в локальных вершинах (максимумах) вполне соответствуют значениям амплитуд гармоник $A_{m,n}$.

Величина средневывпрямленного напряжения $U_{d0,uzm}$ соответствует величине постоянной составляющей спектра $UD(t)$ – частотной компоненте при $f_0 = 0$, измерение которой выполняете следующим образом:

- кликнув по «» активируете режим «трассировки»;
- наводите курсор трассировки на вершину (локальный максимум) на частоте $f_0 = 0$. Убедитесь при этом, что первое значение первой строки в окне «Probe Cursor» - $X = f_0 = 0$;
- значение Y – второе в той же строке окна «Probe Cursor» – присвойте величине $U_{d0,uzm}$ и зафиксируйте в таблицу Б.1.

Амплитуду первой гармоники $U_{d,m1}$ измеряете почти аналогично:

- курсор трассировки наводите на вершину на частоте первой гармоники, убедившись, в первой строке «Probe Cursor» $X = f_1 = m \cdot f$;
- значение Y первой строки «Probe Cursor» присвойте величине $U_{d,m1}$ и зафиксируйте в таблицу Б.1.

1.2.6 Обработка результатов измерений

На основе результатов измерений вычисляются следующие параметры:

- коэффициент выпрямления

$$k_g = \frac{U_{d0,uzm}}{U_2}; \quad (1.4)$$

- коэффициент пульсаций (способ вычисления №1)

$$q_{1n,1} = \frac{\Delta U_d}{2 \cdot U_{d0,uzm}}; \quad (1.5)$$

- коэффициент пульсаций (способ вычисления №2)

$$q_{1n,2} = \frac{U_{d,m1}}{U_{d0,изм}}. \quad (1.6)$$

Результаты вычислений (1.4) – (1.6) фиксируете в таблицу Б.1.

1.3 Исследование выпрямителя при индуктивно-резистивной нагрузке

1.3.1 Обработка результатов измерений

На основе результатов измерений вычислить:

- коэффициент пульсаций (способ вычисления №1)

$$q_{2n,1} = \frac{\Delta U_n}{2 \cdot U_{н0}}; \quad (1.7)$$

- коэффициент пульсаций (способ вычисления №2)

$$q_{2n,2} = \frac{U_{н,m1}}{U_{н0}}; \quad (1.8)$$

Результаты вычислений (1.7) и (1.8) зафиксировать во вторую строку таблицы Б.2 и сравнить с заданным преподавателем значением $q_{2n,зад}$. Если не выполняются условия

$$q_{2n,1} < q_{2n,зад} \quad (1.9)$$

и

$$q_{2n,2} < q_{2n,зад}, \quad (1.10)$$

перейдите к исследованию работы выпрямителя, нагруженного LC-фильтр – к следующему подразделу.

1.3.2 Подключение индуктивного фильтра

а) «Разорвать» (удалить) проводник между выходным зажимом выпрямителя «Ud» и резистором нагрузки R_n .

б) В образовавшийся разрыв подключить последовательно нагрузке индуктивность $L1$.

с) К цепи между $L1$ и Rn привязать метку «Un».

В итоге между выходными зажимами выпрямителя «Ud» и «земля» должна получиться цепочка (рисунок 1.4).

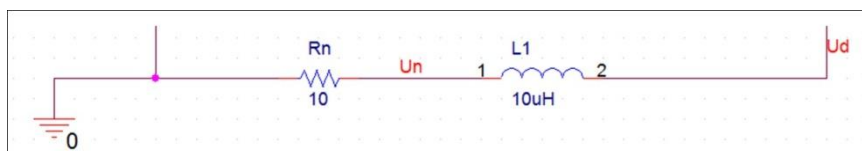


Рисунок 1.4 – Индуктивно-резистивная нагрузка выпрямителя

1.3.3 Предварительные расчёты


а) Для заданного преподавателем значения индуктивности $L1$ вычислить значение выходного коэффициента пульсаций

$$q_{2n,i} = \frac{Rn \cdot q_{1n,i}}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot L1}, \quad i=1, 2. \quad (1.11)$$

б) Вычислить действующее значение тока $I2$ синусоидального источника (вторичных обмоток), пользуясь соотношением I_2/I_{d0} (таблица Е.1 приложения Е).

Значение индуктивности $L1$ и результаты вычисления (1.11) и пункта б) – в первую строку таблицы Б.2.

1.3.4 Измерение параметров электрических процессов в выпрямителе

а) Отредактировав параметр индуктивности $L1$, запустить «PSpice-моделирование» (пиктограмма «»).

б) По завершению моделирования в программе PSpice вывести на график диаграмму напряжения на резисторе нагрузки $V(UN)$.

с) Убедиться, что переходной процесс для $V(U_N)$ к концу времени анализа завершился по следующему рекомендуемому критерию: напряжение на нагрузке U_N в момент времени t_l установилось, если выполняется условие

$$\left. \frac{\Delta U_N}{\Delta t} \right|_{\substack{t \rightarrow t_l - 0 \\ \Delta t = \underbrace{\dots}_{\approx 3-5} T_{f1}}} = \frac{\Delta U_N}{\underbrace{\dots}_{\approx 3-5} T_{f1}} < \frac{0.01 \cdot \Delta U_H}{\underbrace{\dots}_{\approx 3-5} T_{f1}}, \quad (1.12)$$

где ΔU_N – изменение напряжения на нагрузке за последние 3-5 пульсаций до момента t_l , (пример определения ΔU_N по диаграммам $V(U_N)$ – на рисунке 1.5);

ΔU_H - амплитуда пульсации (рисунок 1.5).

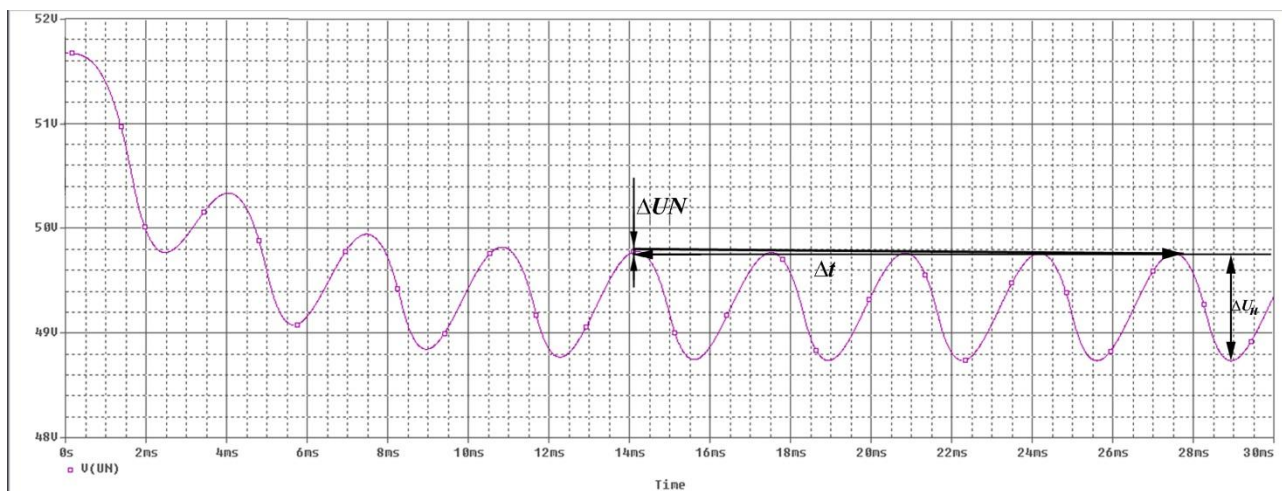


Рисунок 1.5 – Завершённый переходной процесс для напряжения на нагрузке

d) Если же переходной процесс установиться не успевает – условие (1.12) не выполняется (пример – диаграмма на рисунке 1.6), выполняете следующее:

- в программе Orcad Capture зайти в режим редактирование профиля симуляции - меню «PSpice - Edit Profile Simulation»;
- увеличить время наблюдения – переменную TSTOP;
- запустить «PSpice-моделирование» и вернуться к пункту с).

e) На интервале времени, соответствующему установившемуся режиму, измерить амплитуду пульсации ΔU_H .

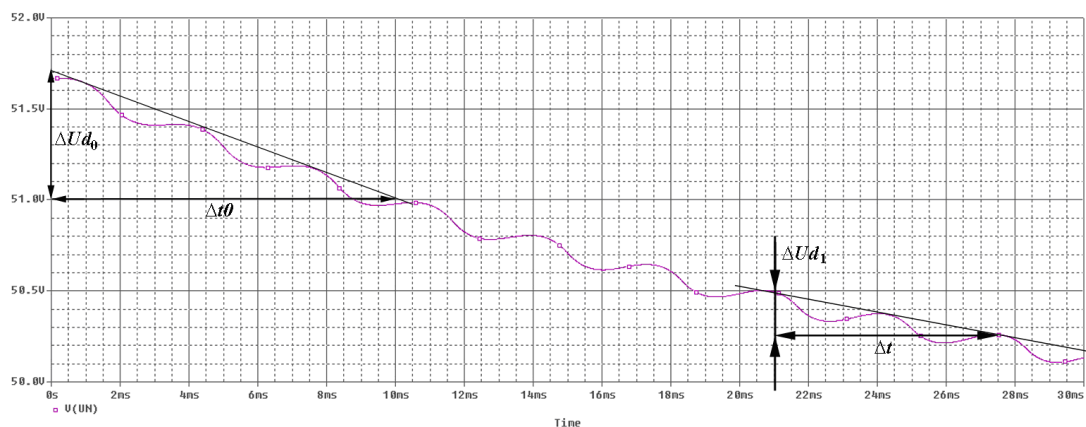


Рисунок 1.6 – Переходные процессы напряжения на нагрузке

f) Измерить средневыпрямленное значение $U_{н0}$ напряжения нагрузки и амплитуду его первой гармоники $U_{н,m1}$.

g) На отдельном графике построить диаграмму тока одного из синусоидальных источников. Например, для трёхфазного мостового выпрямителя (схема d рисунка 1.1) диаграмму тока I(V2).

h) По диаграмме проверить корректность функционирования выпрямителя.

i) Выполнить для тока преобразование Фурье и выделить фрагмент, в котором сконцентрирована основная энергия спектра (3...5 гармоник).

j) Сравнить частоту первой гармоники $f_{I2,1}$ с частотой сети f .

k) Измерить амплитуду первой гармоники тока $I_{2,m,1}$.

Результаты измерений пунктов d) – k) – во вторую строку таблицы Б.2.

1.4 Исследование выпрямителя с LC-фильтром

1.4.1 Доработка индуктивного фильтра до LC-фильтра

Параллельно сопротивлению нагрузки R_n подключите ёмкость (рисунок 1.7).

1.4.2 Предварительные расчёты

a) Вычислить значение ёмкости LC-фильтра

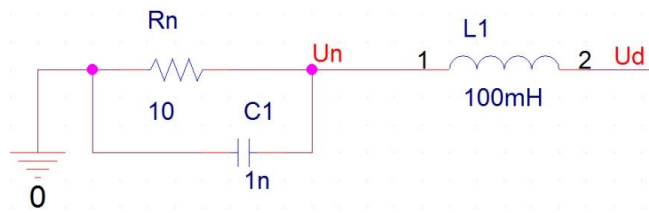


Рисунок 1.7 – Схема LC-фильтра в проекте

$$C1^* = \frac{1 \cdot q_{1n,1}}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_1^2 \cdot L1 \cdot q_{2n,зад}} \quad (1.13)$$

б) Из предоставленного преподавателем набора конденсаторов выбрать элемент с наименьшим значением $C1$, удовлетворяющим условию

$$C1 \geq C1^* \quad (1.14)$$

с) Вычислить расчётное значение коэффициента пульсаций

$$q_{2n,i} = \frac{q_{1n,i}}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_1^2 \cdot L1 \cdot C1}, \quad i=1,2 \quad (1.15)$$

Значение ёмкости $C1$ и результаты вычисления (1.13) и (1.15) – в первую строку таблицы Б.3.

1.4.3 Измерение параметров электрических процессов в выпрямителе

Отредактировав параметр конденсатора $C1$, запустить «PSpice-моделирование» и выполнить измерения параграфа 1.3.4 (пункты б) - к)). Результаты измерений пунктов - зафиксировать во вторую строку таблицы Б.3.

1.4.4 Обработка результатов измерений

С помощью выражений (1.7) и (1.8) вычислить коэффициенты пульсаций $q_{2n,1}$ и $q_{2n,2}$ зафиксировать их во вторую строку таблицы Б.3 и сравнить с $q_{2n,зад}$ и с расчётными значениями.

2 Лабораторная работа №2. Транзисторные выпрямители

Цели работы:

1 Изучение основных электрических процессов, протекающих в цепях транзисторных выпрямителей в режимах работы на следующие виды нагрузки:

- резистивную;
- индуктивно-резистивную.

2 Исследование определяющих характеристик выпрямителей в перечисленных режимах работы.

3 Изучение процессов передачи энергии *от потребителя в сеть - в режиме инвертирования*.

Каждая бригада занимается изучением одной из вентильных схем выпрямления (рисунок 2.1 или 2.2 по указанию преподавателя).

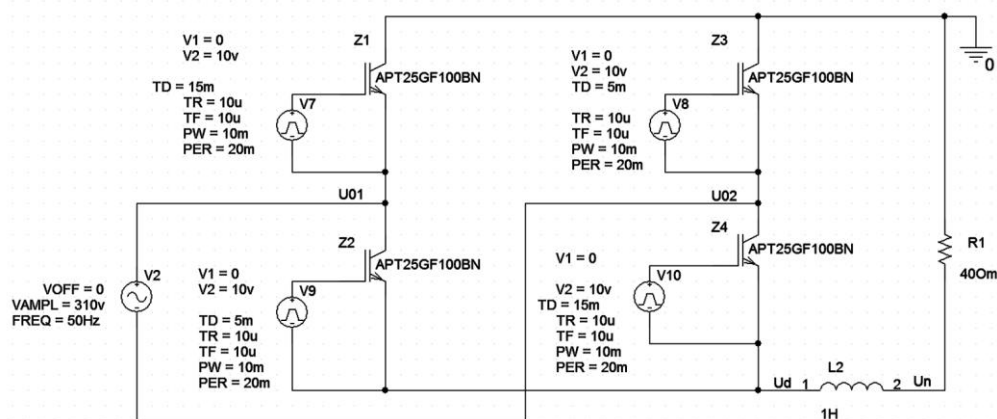


Рисунок 2.1 – Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель

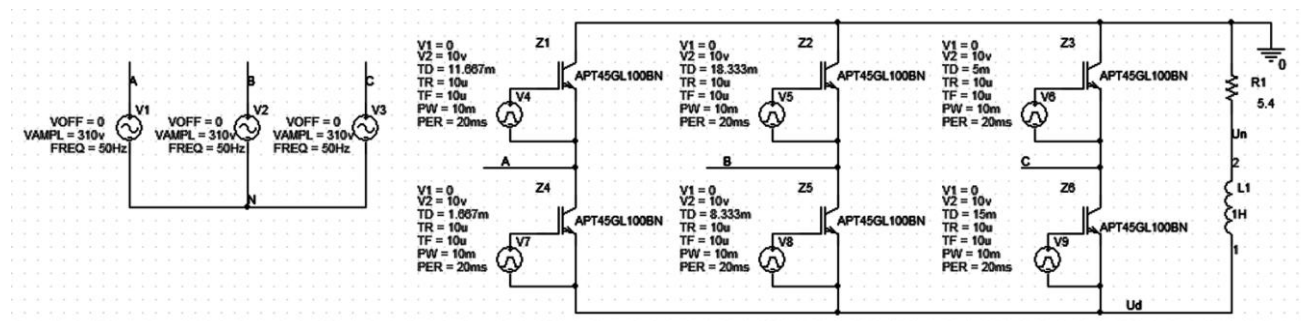


Рисунок 2.2 – Трёхфазный мостовой выпрямитель

2.1 Исследование выпрямителя при резистивном характере нагрузки

В разделе решаются следующие частные задачи:

- вычисление аналитической регулировочной характеристики при резистивной нагрузке;
- измерение значений регулировочной характеристики транзисторных выпрямителей, моделируемых в программе Orcad 9.2;
- измерение параметров выпрямителя при различных углах управления α .

2.1.1 Определение начальных параметров выпрямителей (при $\alpha=0$)

Определить параметры выпрямителя (таблица 2.1) при $\alpha=0$, используя соотношения и данные таблиц А.1 и Е.1.

Таблица 2.1 – Параметры выпрямителя при $\alpha=0$

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Действующее напряжение вторичной обмотки (<i>задаётся преподавателем</i>), V	U_2	
Средневыпрямленное напряжение на выходе выпрямителя, V	U_{d0}	
Ток нагрузки, A	I_{d0}	
Средний ток вентиля, A	$I_{vd,0}$	
Максимальное обратное напряжение вентиля, V	$U_{vd,обр}$	
Действующий ток вторичной обмотки при резистивной нагрузке, A	$I_{2\{R\}}$	
Действующий ток вторичной обмотки при резистивно-индуктивной нагрузке, A	$I_{2\{RL\}}$	
Частота первой гармоники выходного напряжения, Гц	f_1	
Сопrotивление нагрузки (<i>задаётся преподавателем</i>), Ом	RI	
Коэффициент пульсаций напряжения на выходе выпрямителя (<i>без индуктивности</i>)	q_{1n}	
Требуемый коэффициент пульсаций (<i>при наличии индуктивности, задаётся преподавателем</i>)	$q_{2n,зад}$	

2.1.2 Расчёт регулировочной характеристики при резистивной нагрузке

Используя соответствующие выражения для вычисления регулировочных характеристик из таблицы 2.2, вычислить для своего выпрямителя значения средневыпрямленного напряжения на нагрузке $U_{d0}(\alpha)$ для значений α , указанных в одной из

таблиц 2.3 или 2.4 для соответствующего варианта выпрямителя, и зафиксировать в соответствующей таблице.

Таблица 2.2 – Регулировочные характеристики при резистивной нагрузке

Однофазные двухполупериодные выпрямители	$U_{d0}(\alpha) = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$
Трёхфазный мостовой	$U_{d0}(\alpha) = \begin{cases} U_{d0} \cos \alpha, & \text{при } 0 < \alpha \leq 60^\circ, \\ U_{d0} \left(1 + \cos \left(\alpha + \frac{\pi}{3}\right)\right), & \text{при } 60^\circ < \alpha \leq 120^\circ. \end{cases}$

Таблица 2.3 – Результаты измерений двухполупериодных выпрямителей

α	0°	45°	90°	135°	180°
$U_{d0}(\alpha), V$					
$U_{d0,uzm}(\alpha), V$					
Амплитуда первой гармоники $U_{d1}(\alpha), V$					
Размах пульсации $\Delta U_d(\alpha), V$					
Коэффициент пульсаций $q_{1n,1} = \frac{\Delta U_d}{2 \cdot U_{d0,uzm}}$					
Коэффициент пульсаций $q_{1n,2} = \frac{U_{d1}}{U_{d0,uzm}}$					

Таблица 2.4 – Результаты исследований трёхфазного мостового выпрямителя

α	0°	30°	60°	90°	120°
$U_{d0}(\alpha), V$					
$U_{d0,uzm}(\alpha), V$					
Амплитуда первой гармоники $U_{d1}(\alpha), V$					
Амплитуда пульсации $\Delta U_d(\alpha), V$					
Коэффициент пульсаций $q_{1n,1} = \frac{\Delta U_d}{2 \cdot U_{d0,uzm}}$					
Коэффициент пульсаций $q_{1n,2} = \frac{U_{d1}}{U_{d0,uzm}}$					

2.1.3 Измерение характеристик по результатам моделирования

Ввести схему выпрямителя в программной среде Orcad 9.2.

2.1.3.1 Редактирование начальной фазы синусоидальных источников

Для трёхфазного мостового выпрямителя установить значения начальной фазы $PHASE=-120^\circ$ для источника фазы “В” и $PHASE=120^\circ$ для источника фазы “С”. Выполняете эту операцию следующим образом:

- а) Дважды кликнув левой кнопкой мыши по изображению источника «VSIN» вызвать окно его настроек (рисунок 2.3).

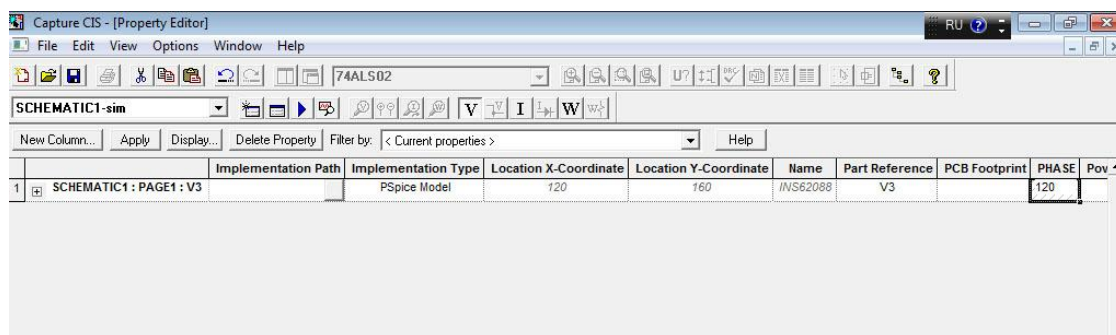


Рисунок 2.3 – Редактирование синусоидального источника напряжения

- б) Отредактировать значение переменной «PHASE».

2.1.3.2 Редактирование параметров источников управляющего импульсного сигнала напряжения

Отредактировать параметры, перечисленные ниже.

- а) Значение нижнего уровня напряжения $V1=0$.
- б) Высокий уровень напряжения $V2=(10...19)V$.
- с) Период повторения, $PER=1/f=20\text{ ms}$.
- д) Длительность импульса с уровнем напряжения $V2$:
 - для однофазных выпрямителей - $PW=PER/2=10\text{ms}$;
 - для трёхфазных выпрямителей - $PW=PER/3=6.667\text{ms}$.
- е) Длительность нарастающего фронта $TR=(1...10)\text{ns}$.

f) Длительность спадающего фронта, $TF=(1 \dots 10)ns$.

g) Время задержки TD_0 начала формирования импульсного сигнала (нарастающего фронта) относительно начала периода при $\alpha=0$:

- для двухполупериодного мостового выпрямителя (рисунок 2.1):

- $TD_0=0$ для управления транзисторами Z2, Z3 (источники V3, V5);
- $TD_0=10ms$ для управления транзисторами Z1, Z4 (источники V2, V4).

- для трёхфазного мостового выпрямителя (рисунок 2.2):

- для управления транзистором Z4 (источник V7)

$$TD_{01A} = \frac{PER}{12} = 5/3ms = 1.667ms ; \quad (2.1)$$

- для управления транзистором Z5 (источник V8)

$$TD_{01B} = \frac{PER}{12} + \frac{PER}{3} = 25/3ms = 8.333ms ; \quad (2.2)$$

- для управления транзистором Z6 (источник V9)

$$TD_{01C} = \frac{PER}{12} + \frac{2 \cdot PER}{3} = 45/3ms = 15ms ; \quad (2.3)$$

- для управления транзистором Z1 (источник V4)

$$TD_{02A} = t_{01A} + \frac{Period}{2} = 35/3ms = 11.667ms ; \quad (2.4)$$

- для управления транзистором Z2 (источник V5)

$$TD_{02B} = t_{01B} + \frac{Period}{2} = 55/3ms = 18.333ms ; \quad (2.5)$$

- для управления транзистором Z3 (источник V6)

$$TD_{02C} = t_{0C} + \frac{PER}{2} = 25ms > PER \Rightarrow TD_{02C} = 25ms - PER = 5ms . \quad (2.6)$$

2.1.3.3 Формирование задания для Spice-анализа электрических процессов во временной области

В профиле симуляции сформировать задание на моделирование, установив следующие параметры:

а) Тип анализа («Analys type») – «Time Domain (Transient)» - анализ переходных процессов.

б) Время анализа («Run to time») – $TSTOP = \frac{10 \dots 20}{f}$, где $f=50$ Гц.

с) Начало времени наблюдения относительно включения схемы («Time to Start saving Data after») – 0 s.

д) В поле «Maximum step size» вводите максимальный шаг моделирования

$$TSTEP = \frac{1}{\langle 100 \dots 1000 \rangle f} .$$

2.1.3.4 Моделирование в P-Spice и измерение параметров и характеристик

Моделируя выпрямитель в приложении P-Spice, выполнить следующее:

1) Измерить и зафиксировать значения регулировочной характеристики $U_{d0,uzm}(\alpha)$ для значений угла управления α , указанных в таблице 2.3 или 2.4. Угол управления настраивается редактированием параметра TD импульсных управляющих источников – к начальному значению $TD_{0,i}$ каждого i -го источника прибавляется величина

$$\Delta TD = \frac{\alpha}{360^\circ} \cdot PER . \quad (2.7)$$

2) Измерить и зафиксировать параметры $U_{d1}(\alpha)$ и $\Delta U_d(\alpha)$ для значений угла управления α (таблица 2.3 или 2.4).

3) Для тех же углов α вычислить и зафиксировать в таблицу 2.3 или 2.4 значения коэффициентов пульсаций $q_{1n,2}$ и $q_{1n,1}$.

2.2 Исследование выпрямителя при индуктивно-резистивной нагрузке

В разделе решаются те же частные задачи, что и в подразделе 2.1.

2.2.1 Регулировочная характеристика при резистивно-индуктивной нагрузке

Используя выражение для вычисления регулировочной характеристики

$$U_{d0}(\alpha) = U_{d0} \cos(\alpha) \quad (2.8)$$

вычислить для своего выпрямителя значения средневывпрямленного напряжения на нагрузке $U_{d0}(\alpha)$ для значений α , указанных в таблицу 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты измерений при резистивно-индуктивной нагрузке

α	0°	$22,5^\circ$	45°	$67,5^\circ$	90°
$U_{d0}(\alpha), V$					
$U_{d0,uzm}(\alpha), V$					
Амплитуда первой гармоники $U_{d,1}(\alpha), V$					
Действующий ток вторичной обмотки – ток источника VSIN $I_{2,uzm}, A$					
Амплитуда пульсации $\Delta U_d(\alpha), V$					
Коэффициент пульсаций $q_{2n,1} = \frac{\Delta U_d}{2 \cdot U_{d0,uzm}}$					
Коэффициент пульсаций $q_{2n,2} = \frac{U_{d1}}{U_{d0,uzm}}$					
Амплитуда первой гармоники тока вторичной обмотки (тока источника «VSIN») $I_{2m,1}, A$					
$k_{2,I2} = \frac{I_{2m,1}}{I_2}$					

2.2.2 Расчёт индуктивности фильтрующего дросселя

Вычислить значение индуктивности фильтрующего дросселя $L1$ с помощью выражения

$$L1 = \frac{R1}{2 \cdot \pi \cdot f_1} \cdot \frac{q_{1n,2}}{q_{2n,зад}}. \quad (2.9)$$

Включить дроссель $L1$ последовательно с нагрузкой $R1$.

2.2.3 Измерение характеристик по результатам моделирования

Моделируя выпрямитель в приложении P-Spice, выполнить следующее:

1) Измерить и зафиксировать значения регулировочной характеристики $U_{d0,uzm}(\alpha)$ для значений угла управления α , указанных в таблице 2.5.

2) Измерить и зафиксировать параметры $U_{d1}(\alpha)$, $\Delta U_d(\alpha)$ и $I_{2m,1}$ для значений угла управления α в таблице 2.5.

3) Для тех же углов α вычислить и зафиксировать в таблице 2.5 значения коэффициентов пульсаций $q_{2n,2}$ и $q_{2n,1}$. Проверить условия

$$q_{2n,1} < q_{2n,зад} \quad (2.10)$$

и

$$q_{2n,2} < q_{2n,зад}. \quad (2.11)$$

Если они не выполняются – проверить расчёт индуктивности (2.9) и повторить действия пункта 2.2.3

2.3 Управляемые выпрямители в режиме инвертирования

Выполнить пункты, перечисленные ниже.

1) В схеме своего выпрямителя заменить резистор нагрузки $R1$ на источник постоянного напряжения VDC из библиотеки «source.olb» (рисунок 2.4 или 2.5).

2) С помощью выражения (2.8) вычислить значения средневыпрямленного напряжения $U_{d0}(\alpha)$ между выходными зажимами вентильной схемы для значений α , указанных в таблице 2.6. Вычисленные значения $|U_{d0}(\alpha)|$ и значения $|U_{d0}(\alpha)| + 2B$ зафиксировать вместо соответствующих обозначений в таблице 2.6.

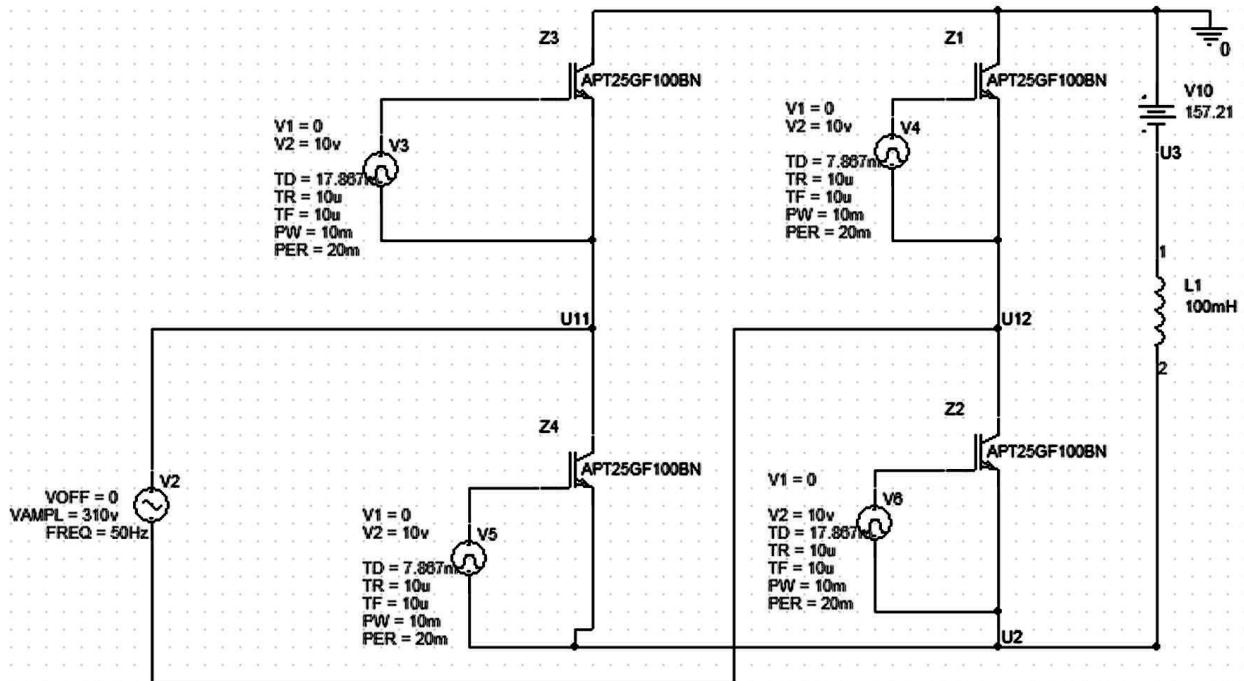


Рисунок 2.4 – Однофазный мостовой инвертор, ведомый сетью

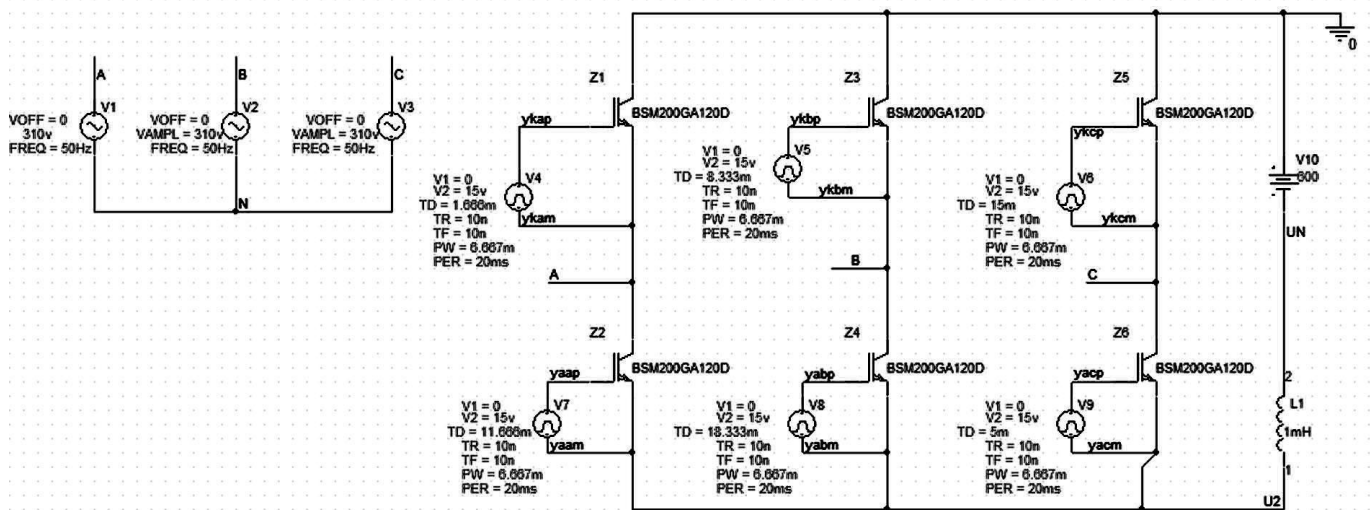


Рисунок 2.5 – Трёхфазный мостовой инвертор, ведомый сетью

Таблица 2.6 – Результаты исследования инвертора

α	170°		135°		95°	
	$ U_{d0}(\alpha) $	$ U_{d0}(\alpha) + 2B$	$ U_{d0}(\alpha) $	$ U_{d0}(\alpha) + 2B$	$ U_{d0}(\alpha) $	$ U_{d0}(\alpha) + 2B$
$U_{d0,uzm}, V$						
$\max(I_{L1})$						
$\max(I_z)$						
$\max(i_{L1})$						
$\max(I_z)$						
$\max(I_z)$						

3) Выполнить моделирование в программном приложении P-Spice A/D при всех трёх значениях α таблицы 2.6 и вычисленных значениях $|U_{d0}(\alpha)|$ и $|U_{d0}(\alpha)| + 2B$. Эти значения присваиваются значениям ЭДС источника VDC. В каждом опыте измеряете следующие величины:

- средневывпрямленное значение напряжения $U_{d0,uzm} = AVG(U_{d0})$ между выходными зажимами вентильной схемы;
- максимальное среднее значение тока катушки $\max(I_{L1}) \approx \max(AVG(I_{L1}))$ в установившемся режиме;
- максимальное мгновенное значение тока катушки - $\max(I_{L1}) \approx \max(I_{L1})$;
- максимальное значение размаха тока катушки $\max(i_{L1})$ в установившемся режиме;
- максимальное среднее значение тока транзисторов $\max(I_z) \approx \max(AVG(I_{I_x}))$ в установившемся режиме;
- максимальное мгновенное значение тока транзисторов $\max(I_z)$.

По полученным результатам измерений параметров тока катушки сделайте вывод о влиянии на этот ток ЭДС источника VDC и угла α . По результатам измерений параметров токов транзисторов и справочным данным транзисторов сделать вывод о надёжности функционирования вентильной схемы.

3 Лабораторная работа №3. Конструктивный расчет трансформаторов

Представленные в разделе методические указания – результат переработки методики расчёта низкочастотных трансформаторов для выпрямителей из учебного пособия [1].

Исходные данные для расчёта:

- частота питающей сети $f_c = 50$ Гц;
- действующее напряжения первичной обмотки – напряжение бытовой сети $U_1 = 230$ В;
- действующие значения напряжения вторичной обмотки U_2 , токов первичной и вторичной обмоток I_1 и I_2 , а также типовую мощность трансформатора $P_{\text{тип}}$ вычислите с помощью соотношений таблицы А.1 приложения А. Значения в соотношениях таблицы А.1:

- U_{d0} – выходное напряжение выпрямителя;
- I_{d0} – ток, потребляемый нагрузкой;
- P_0 – потребляемая нагрузкой мощность.

Расчет ведется в порядке, указанном ниже. Все величины в приведённых формулах – в единицах СИ.

1) По заданной величине типовой мощности из таблицы 3.1 находят ориентировочные значения магнитной индукции B , плотности тока j , коэффициента заполнения обмотки медью k_M , коэффициента заполнения сечения магнитопровода сталью и коэффициента полезного действия (КПД) η .

2) Определяем величину произведения сечения сердечника на сечение окна магнитопровода по формулам:

- для однофазных трансформаторов

$$S_{\text{ст}} \cdot S_{\text{окн}} = \frac{P_{\text{тип}}}{k_{\phi} \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) \cdot f_c \cdot B \cdot j \cdot k_M \cdot k_{\text{ст}}} ; \quad (3.1)$$

Таблица 3.1 – Рекомендуемые параметры магнитопровода и обмоток

Конфигурация магнитопровода	Марка стали /толщина, мм	КПД		15...50	50...150	150...300	300...1000	1000...2500
пластинчатая	Э42/ 0,35	0,94	B , Тл	1,5	1,35...1,5	1,35	1,2...1,35	
			j , а/мм ²	3,8...5	1,9...3,8	1,3...1,9	1...1,3	—
			k_{Φ}	0,22...0,28	0,28...0,34	0,34...0,36	0,36...0,38	—
			η	0,5...0,8	0,8...0,9	0,9...0,93	0,93...0,95	—
Ленточная	ХВП/ 0,15	0,9	B , Тл	1,6	1,45...1,6	1,2...1,45	0,95...1,2	0,8...0,95
			j , а/мм ²	4,5...6	3,5...4,5	2,5...3,5	1,5...2,5	1,2...1,5
			k_{Φ}	0,21...0,25	0,25...0,28	0,28...0,30	0,30...0,37	0,37...0,38
			η	0,87	0,87...0,94	0,94...0,96	0,96...0,97	0,97

- для трёхфазных трансформаторов

$$S_{ст} \cdot S_{окн} = \frac{2}{3} \frac{P_{тип}}{k_{\Phi} \cdot \left(1 + \frac{1}{\eta}\right) \cdot f_c \cdot B \cdot j \cdot k_M \cdot k_{ст}}, \quad (3.2)$$

где k_{Φ} - коэффициент формы напряжения. В выражениях (3.1) и (3.2) для гармонических напряжений $k_{\Phi} = 1,11$.

3) По величине $S_{ст} \cdot S_{окн}$ из таблиц Ж.1 или Ж.2 приложения Ж выбирают магнитопровод и выписывают следующие его параметры: активное сечение $S_{ст}$, вес $G_{ст}$, ширину среднего стержня a , ширину c и высоту h окна (рисунок 3.1).

4) Определяют числа витков соответственно первичных

$$W_1 = \frac{U_1 \cdot \left(- \delta U_1 \right)}{4 \cdot k_{\Phi} \cdot f_c \cdot B \cdot S_{ст}} \quad (3.3)$$

и вторичных обмоток

$$W_2 = \frac{U_2 \cdot \left(+ \delta U_2 \right)}{4 \cdot k_{\Phi} \cdot f_c \cdot B \cdot S_{ст}} \quad (3.4)$$

В выражениях (3.3) и (3.4) δU_1 и δU_2 – относительные потери падения напряжения в обмотках, определяемые по таблице 3.2.

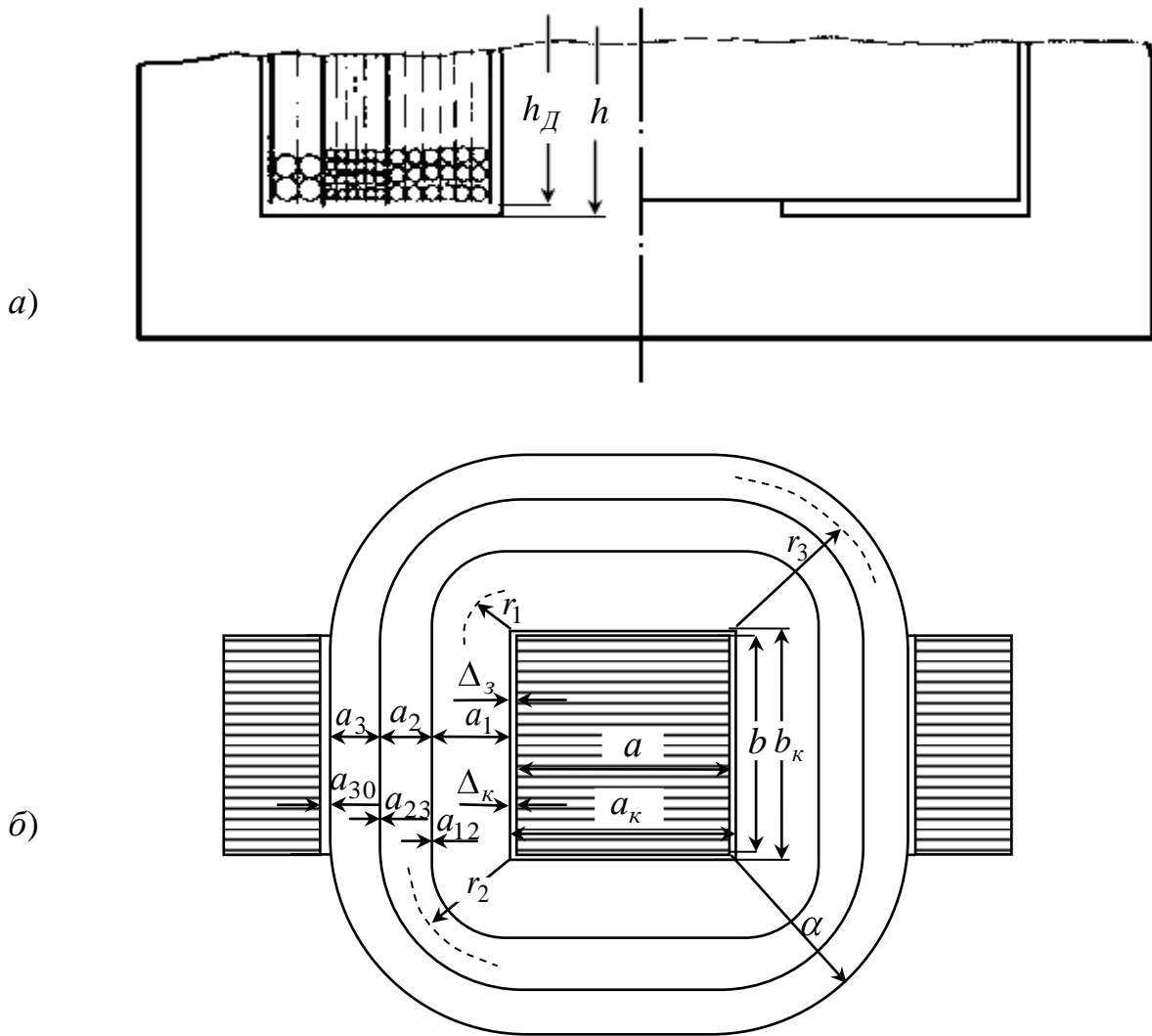


Рисунок 3.1 – Размещение катушки на магнитопроводе трансформатора (разрез и план)

Таблица 3.2 – Ориентировочные относительные потери напряжений

	$P_{\text{тип}}, \text{Вт}$				
	15...50	50...150	150...300	300...1 000	1000...2500
δU_1	0,05...0,15	0,04...0,05	0,03...0,04	0,01...0,03	0,01
δU_2	0,1...0,2	0,08...0,1	0,06..0,08	0,02...0,06	0,02

5) Вычисляют площади сечения проводов обмоток

$$S_{\text{пр.}k} = \frac{I_k}{j}, \quad (3.5)$$

где $k=1$ – для первичных обмоток и $k=2$ – для вторичных.

6) Вычисляют диаметры проводов обмоток

$$d_{\text{пр},k} = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{пр},k}}{\pi}}. \quad (3.6)$$

7) По результатам вычисления (3.6) выбирают из таблицы Ж.3 приложения Ж номинальные диаметры стандартных проводов $d_{\text{ном},k}$ и номинальные площади их сечений $S_{\text{ном},k}$, после чего уточняют фактические плотности тока на основании выражения (3.5)

$$j_k = \frac{I_k}{S_{\text{ном},k}}.$$

8) Также необходимо выписать из таблицы Ж.3 приложения Ж диаметры $d_{\text{уз},k}$ выбранных проводов с учётом изоляции и вес одного метра провода $q_{\text{пр},k}$.

9) Находят допустимую осевую высоту обмотки $h_{\text{Д}}$ (рисунок 3.1,а)

$$h_{\text{Д}} = h - 2 \cdot d_{\text{уз},\text{max}}, \quad (3.7)$$

где $d_{\text{уз},\text{max}}$ – диаметр провода с наибольшим сечением.

10) Определяют число витков в одном слое и число слоев каждой обмотки по формулам

$$W_{c,k} = \frac{h_{\text{д}}}{k_{\text{в}} \cdot d_{\text{уз},k}}, \quad (3.8)$$

$$N_{c,k} = \frac{W_k}{W_{c,k}}, \quad (3.9)$$

где $k_{\text{в}}$ – коэффициент укладки. Для него принимают $k_{\text{в}} = 1,07 \dots 1,15$ в зависимости от диаметра провода.

11) Выбор междуслоевой и междуобмоточную изоляцию.

В качестве междуслоевой изоляции рекомендуется выбирать:

- при проводах диаметром менее 0,1 мм – допускается не использовать между-
условую изоляцию;

- при проводах диаметром 0,1– 0,5 мм – тефлоновую (фторопластовую) ленту
толщиной $\Delta_{из} = 0,02$ мм;

- и при проводах диаметром более 0,5 мм – три слоя тефлоновой ленты, что
даст толщину изоляции $\Delta_{из} = 0,06$ мм.

В качестве междуобмоточной изоляции можете взять пять слоев тефлоновой
ленты, что даст толщину изоляции $\Delta_{12} = 0,1$ мм.

12) Вычисляют радиальный размер каждой обмотки с помощью выражения

$$\alpha_k = k_y \cdot N_{c,k} \cdot d_{из,k} + (N_{c,k} - 1) \cdot \Delta_{из} \quad (3.10)$$

13) Определяют полный радиальный размер катушки, то есть ее толщину:

- для трансформатора однофазного двухполупериодного выпрямителя со
средней точкой

$$\alpha = \Delta_3 + \Delta_k + \alpha_1 + 2\Delta_{12} + 2\alpha_2 + \Delta_0; \quad (3.11)$$

- для трансформаторов остальных выпрямителей

$$\alpha = \Delta_3 + \Delta_k + \alpha_1 + \Delta_{12} + \alpha_2 + \Delta_0; \quad (3.12)$$

где $\Delta_3 \approx 0,5$ мм – зазор между внутренней частью каркаса и сердечником;

$\Delta_k \approx (1 \dots 2)$ мм – толщина каркаса (гильзы);

α_1 и α_2 – толщины обмоток, вычисленные с помощью (3.10);

$\Delta_k \approx 0,1$ мм – толщина наружного слоя изоляции катушки.

14) Проверяют зазор между катушкой и сердечником:

- для однофазных трансформаторов – с помощью неравенства

$$c - \alpha \geq 0,001 \text{ м}; \quad (3.13)$$

- для трёхфазных трансформаторов – с помощью неравенства

$$c - 2 \cdot \alpha \geq 0,001 \text{ м}, \quad (3.14)$$

где c – ширина окна.

Если полученный зазор меньше, чем 1 мм, то следует выбрать из приложения Ж магнитопровод больших размеров и повторить расчёты.

15) Определяют среднюю длину витков каждой обмотки

$$l_{\text{ср.в.,}k} = 2 \cdot a_{\text{крк}} + b_{\text{крк}} + \pi \cdot r_k, \quad (3.15)$$

где r_k – радиальный размер k -й обмотки (рисунок 3.1,б);

$a_{\text{крк}}$ – ширина каркаса катушки

$b_{\text{крк}}$ – длина каркаса катушки

$$a_{\text{крк}} = a + 2 \Delta_3 + \Delta_{\text{к.л.}}; \quad (3.16)$$

$$b_{\text{крк}} = b + 2 \Delta_3 + \Delta_{\text{к.л.}}. \quad (3.17)$$

16) Радиальные размеры обмоток определите с помощью соотношений:

- для первичной обмотки

$$r_1 = \frac{\alpha_1}{2}; \quad (3.18)$$

- для вторичной обмотки трансформатора однофазного двухполупериодного выпрямителя со средним выводом

$$r_2 = \alpha_1 + \alpha_2 + \Delta_{12}; \quad (3.19)$$

- для вторичной обмотки остальных трансформаторов

$$r_2 = \alpha_1 + \frac{\alpha_2}{2} + \Delta_{12}. \quad (3.20)$$

17) Определяют вес меди каждой обмотки с помощью выражения

$$G_{M,k} = l_{\text{ср.в.,k}} \cdot W_k \cdot q_{\text{пр,k}}. \quad (3.21)$$

18) Определяют вес всех обмоток:

- для трансформатора однофазного двухполупериодного выпрямителя со средним выводом с помощью выражения

$$G_{M,\Sigma} = G_{M,1} + 2 \cdot G_{M,2}. \quad (3.22)$$

- для остальных трансформаторов – с помощью выражения

$$G_{M,\Sigma} = G_{M,1} + G_{M,2}. \quad (3.23)$$

19) Вместе с весом сердечника $G_{\text{ст}}$ оцените вес трансформатора.

20) Определяют приблизительную длину провода каждой обмотки (информация, полезная при покупке или поисках провода) с помощью выражения

$$l_k = W_k \cdot l_{\text{ср.в.,k}}. \quad (3.24)$$

21) Определяют активную составляющую сопротивления каждой обмотки

$$R_k = \frac{\rho_M \cdot l_k}{S_{\text{ном,k}}}. \quad (3.25)$$

где $\rho_M = 1,78 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное сопротивление меди.

22) Определяют фактическую активную составляющую потерь напряжений на каждой обмотке

$$\delta U_{\text{факт},k} = \frac{I_k \cdot R_k}{U_k}. \quad (3.26)$$

При значительном превышении величины $\delta U_{\text{факт},k}$ по сравнению с ранее принятыми значениями δU_k следует проверить расчёт числа витков обмоток.

23) Определяют тепловую мощность потерь в каждой обмотке по формуле

$$P_{\text{м},k} = I_k^2 \cdot R_k. \quad (3.27)$$

24) Вычисляют суммарные тепловые потери в обмотках:

- для трансформатора однофазного двухполупериодного выпрямителя со средним выводом

$$P_{\text{м},\Sigma} = P_{\text{м},1} + 2 \cdot P_{\text{м},2}; \quad (3.28)$$

- для остальных трансформаторов

$$P_{\text{м},\Sigma} = P_{\text{м},1} + P_{\text{м},2}. \quad (3.29)$$

25) Определяют площадь поверхности охлаждения катушки по формуле

$$S_{\text{охл.м}} = 2 \cdot h_{\text{д}} \cdot \pi \cdot r_{\text{крк}} + \pi \cdot \alpha. \quad (3.30)$$

26) Вычисляют удельную поверхностную нагрузку катушки согласно выражению

$$q_{\text{м}} = \frac{P_{\text{м},\Sigma}}{S_{\text{охл.м}}}. \quad (3.31)$$

27) По кривым рисунка 3.2 или 3.3 определяют среднюю температуру перегрева катушки Δt . Каждая кривая на графиках пронумерована четырьмя цифрами,

или двумя парами цифр ХХУУ. Первая пара цифр ХХ соответствует ширине сердечника a в миллиметрах, вторая пара УУ – длине сердечника b .

28) Прибавив к $\Delta\tau$ заданную температуру окружающей среды $\tau_{\text{окр}}$, при которой будет работать трансформатор

$$\tau_{\text{раб}} = \tau_{\text{окр}} + \Delta\tau, \quad (3.32)$$

получим рабочую температуру проводов обмотки.

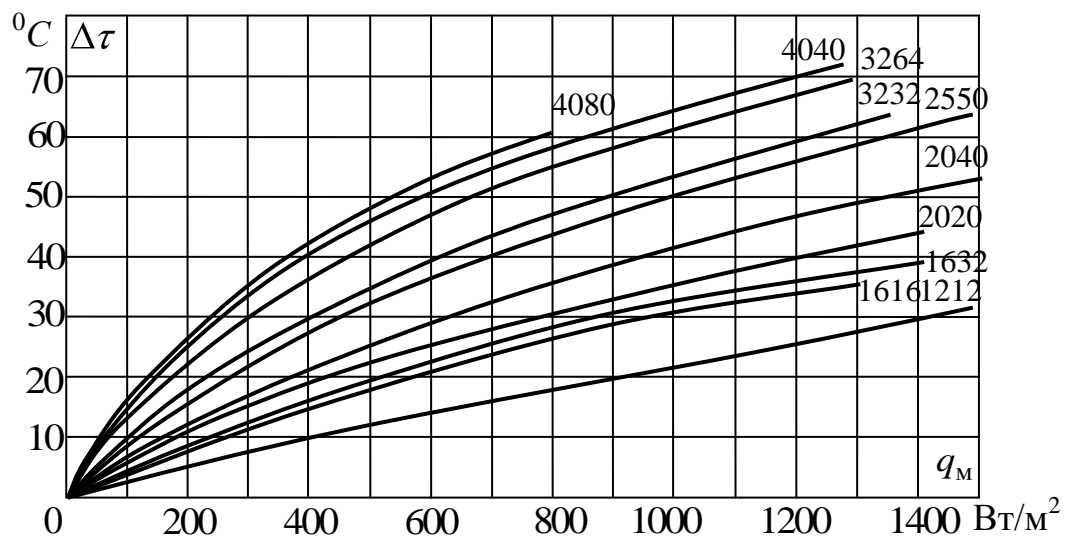


Рисунок 3.2 – Зависимости температуры перегрева от удельной поверхностной нагрузки обмоток броневых трансформаторов с пластинчатыми магнитопроводами

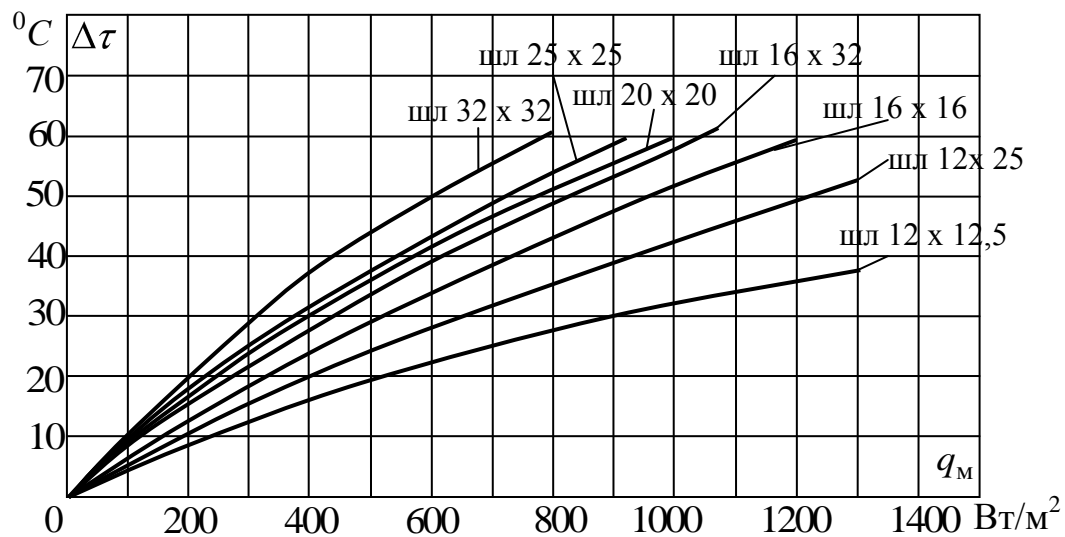


Рисунок 3.3 – Зависимости температуры перегрева от удельной поверхностной нагрузки обмоток броневых трансформаторов с ленточными магнитопроводами

Эта температура не должна превосходить $100^{\circ}C$ для проводов марки ПЭЛ и $110^{\circ}C$ для проводов марки ПЭВ.

Список использованных источников

- 1 Белопольский, И.И. Электропитание радиоустройств / И.И. Белопольский. – Издательство «Энергия». – Москва, Ленинград – 1965, 320 с.

Приложение А

(рекомендуемое)

Параметры выпрямителей при резистивной нагрузке

Таблица А.1 – Приведённые параметры выпрямителей

Наименование параметра	Схема выпрямления			
	Двухполупериодная со средней точкой	Однофазная мостовая	Трёхфазная со средней точкой	Трёхфазная мостовая
Действующее напряжение вторичной обмотки U_2/U_{d0} ¹	1,11	1,11	0,855	0,428
Ток нагрузки I_{d0}	U_{d0}/R_n			
Действующий ток вторичной обмотки I_2/I_{d0}	0,785	1,11	0,587	1,017
Действующий ток первичной обмотки I_1/I_{d0}	$\frac{0,606}{k_{mp}}$ ²	$\frac{1,11}{k_{mp}}$	$\frac{0,483}{k_{mp}}$	$\frac{0,944}{k_{mp}}$
Типовая мощность трансформатора P_{mun}/P_0	0,696	1,11	0,535	0,944
Средний ток вентиля $I_{vd,0}/I_{d0}$	0,5	0,5	0,333	0,333
Амплитуда тока вентиля, $I_{vd,max}/I_{d0}$	1,57	1,57	1,209	0,605
Обратное напряжение вентиля $U_{vd,обп}/U_{d0}$	3,14	1,57	2,094	1,047
Частота первой гармоники $m = f_1/f$	2	2	3	6
Коэффициент пульсаций $q_{1n,1}$	0,785	0,785	0,302	0,07
Коэффициент пульсаций $q_{1n,2}$	0,667	0,667	0,25	0,057

¹ В таблице параметры напряжения приведены к средневывпрямленному напряжению U_{d0} , тока – к току нагрузки I_{d0} , мощности – к мощности нагрузки P_0 , частоты – к частоте сети f .

² $k_{mp} = U_1/U_2$ - коэффициент трансформации.

Приложение Б

(обязательное)

Таблицы результатов анализа выпрямителей

Таблица Б.1 – Результаты анализа при резистивной нагрузке

Результаты	$U_{н0}, \text{V}$	$\Delta U_n, \text{V}$	$U_{н,m1}, \text{V}$	$q_{1n,1}$	$q_{1n,2}$
расчёта					
моделирования					

Таблица Б.2 – Результаты анализа при резистивно-индуктивной нагрузке

Результаты	$L1, \text{мГн}$	$U_{н0}, \text{V}$	$\frac{\Delta U_n}{\text{V}}$	$U_{н,m1}, \text{V}$	$q_{2n,1}$	$q_{2n,2}$	$I2, \text{A}$	$I_{2m,1}, \text{A}$	$k_{2,I2}$
расчёта									
моделирования									

Таблица Б.3 – Результаты анализа при использовании LC-фильтра

Результаты	$C1, \text{мкФ}$	$U_{н0}, \text{V}$	$\Delta U_n, \text{V}$	$U_{н,m1}, \text{V}$	$q_{2n,1}$	$q_{2n,2}$
расчёта	$C1^* =$					
моделирования	$C1 =$					

Приложение В

(рекомендуемое)

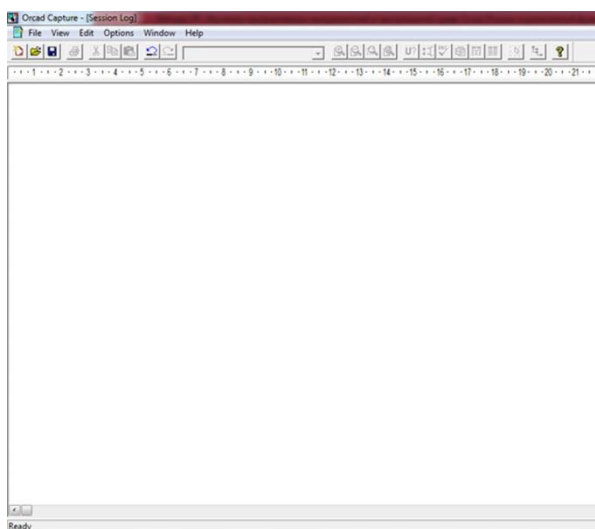
Краткое руководство по схемному редактору Orcad Capture

В.1 Создание проекта

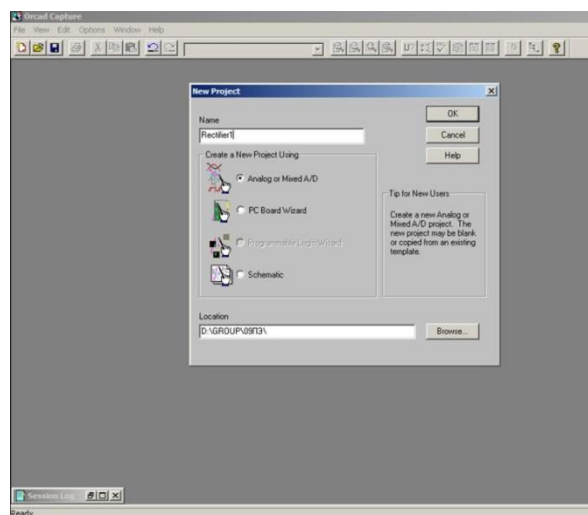
Схемный редактор OrCAD Capture является управляющей оболочкой, из которой можно запускать другие программы системы OrCAD, с помощью которых в настоящей лабораторной работе решаются следующие задачи:

- ввод схемы выпрямителя – в графическом редакторе OrCAD Capture;
- моделирование схемы – анализ переходных и установившихся электрических процессов в выпрямителе – в программе PSpice A/D.

Для ввода новой схемы в меню «Пуск» из папки пакета программ «Orcad Family Release 9.2» запускаете управляющую оболочку – «Capture CIS» или «Capture» – без разницы. Откроется окно «OrCAD Capture» (рисунок В.1,а). Для проектирования новой схемы нужно создать новый проект, выполнив действия, перечисленные ниже.



а)



б)

Рисунок В.1

1) Выполнить команду **File>New>Project** или щелкнуть по кнопке «» - «Create document» - на панели инструментов.

- 2) В появившейся на экране диалоговой панели New Project (рисунок В.1,б):
- из четырёх предлагаемых типов проектов указать «Analog or Mixed A/D»;
 - в верхнем поле задать имя проекта (например «Rectifier1»);
 - в нижнем поле указать путь, где проект будет располагаться на жестком диске. Рекомендуется указать путь к папке вашей группы - «D:\GROUP*PE*.»³. Можно указать для проекта несуществующую папку - OrCAD Capture создаст ее автоматически;
 - нажать кнопку «Ok».

3) Далее всплывет диалоговое окно «Create PSpice Project» (рисунок В.2), в котором по умолчанию выбрана опция «Create based upon an existing project». Необходимо выбрать опцию «Create a blank project», и нажать «Ok». Опция «Create a blank project» даёт возможность моделирования схемы с помощью программы Pspice A/D.

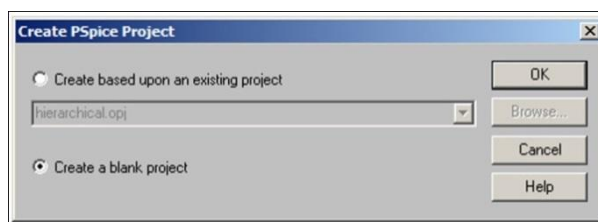
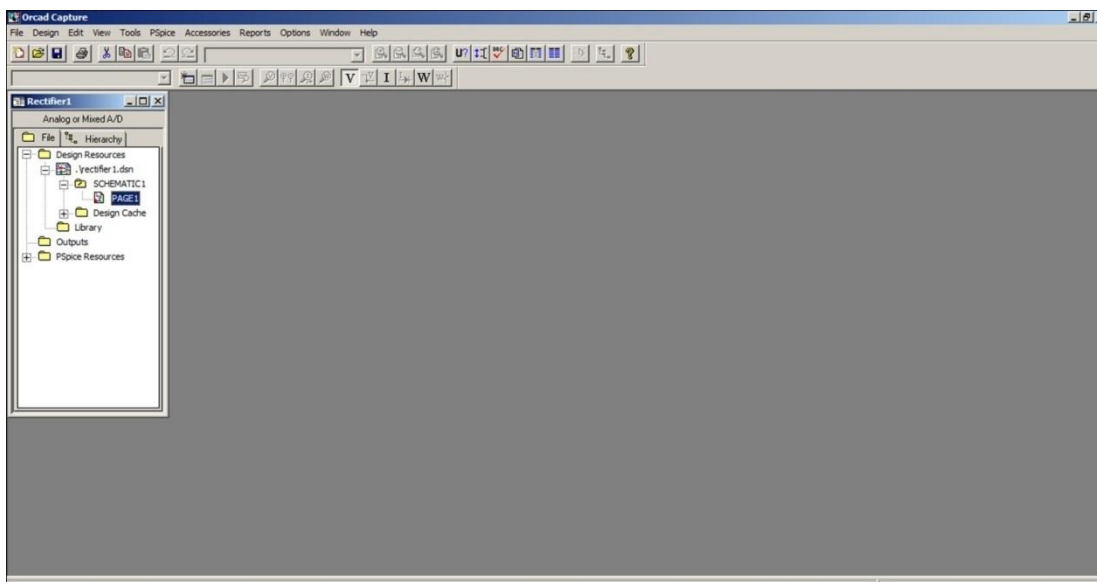


Рисунок В.2

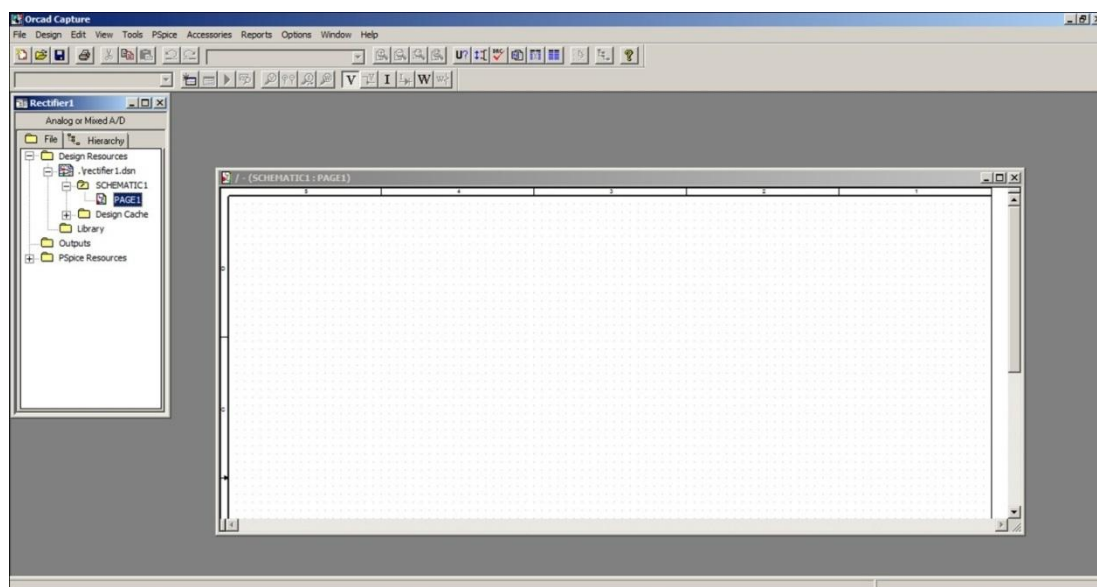
После нажатия кнопки «OK» загружается *менеджер проекта* с заданным именем «Rectifier1» (рисунок В.3,а,б). Проект имеет папки Design Resources, Outputs и PSpice Resources. Папка Design Resources содержит:

- проект схемы Rectifier1.dsn, в который вложены:
 - папка схемных страниц SCHEMATIC1;
 - кэш проекта Design Cache;
- папку библиотек схемных элементов Library.

³ В названиях папок пути и в названии проекта (пункт б)) применяйте только символы латинского алфавита, цифры и знак подчёркивания «_». В противном случае программы пакета OrCAD Capture (например, Pspice AD) могут работать не корректно



а)



б)

Рисунок В.3

Чтобы приступить к вводу электрических цепей, нужно активировать страницу проекта схемы «Page1». Сделать это можете следующим образом:

- щелкнув по значку “+” напротив проекта Rectifier1.dsn, открыть папку SCHEMATIC1, затем дважды щелкнуть по открывшемуся пункту «Page1» - страница «Page1» откроется и активируется;
- «Page1» может открыться по умолчанию при загрузке менеджера проекта (рисунок В.3,б) – в таком случае достаточно переместить в эту страницу курсор мыши и щёлкнуть левой кнопкой – «Page1» активируется.

Теперь, после активации в окне OrCAD Capture в левой части расположен менеджер проекта «Rectifier1», а в правой части окно «Page1» схемы. Содержимое меню команд в верхнем поле зависит от того, какое из названных окон активно:

- меню на обоих рисунках В.3 соответствует окну менеджера проекта;
- меню на рисунке В.4 – активированному «Page1».

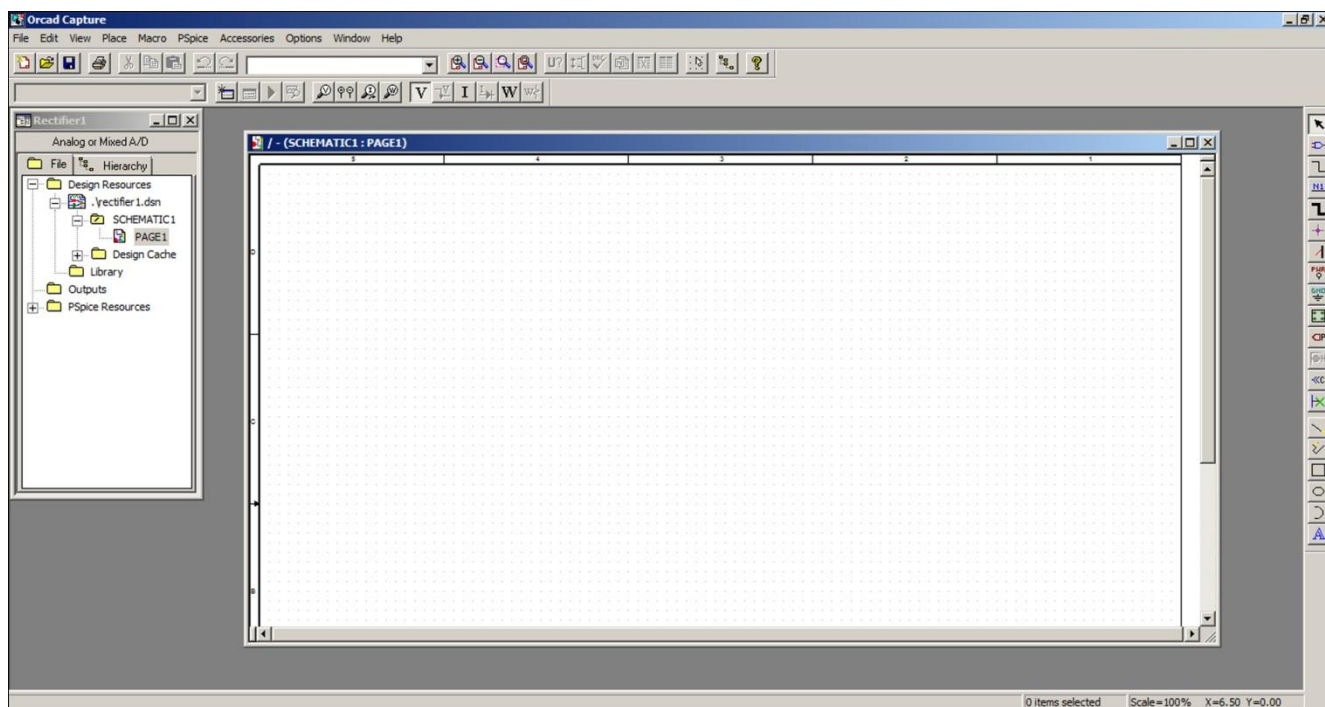









Рисунок В.4

В.2 Формирование схемы





После активации окна схемы Page1 появляется палитра инструментов «Tool Palette» для проектирования схемы (рисунок В.4). По умолчанию «Tool Palette» располагается вертикально в правой части экрана и дублирует команды меню «Place». Наиболее часто используемые кнопки расположены в верхней части панели. Для выполнения работы достаточно использовать кнопки:

- «» или «Select» - переключение курсора мыши в режим выбора (выделения) объектов схемы (элементов, цепей, обозначений и тому подобного);
- «» или «Place Part» - для размещения элементы схемы;


- «» или «Place wire» - для соединения элементов проводниками;
- «» или «Place junction» - для электрического соединения пересекающихся проводников (цепей);
- «» или «Place Gnd» - для размещения «земли»;
- «» или «Place Power» - для размещения элементов питания;
- «» или «Place net alias» – для ввода наименований проводников (цепей).

Остальные кнопки «Tool Palette» в настоящей работе не применяются.

При вводе схемы вы будете выполнять следующие действия:

- размещать элементы (кнопки  и 
- соединять их выводы между собой (
- при необходимости задавать имена цепей (

В.2.1 Размещение одиночных элементов

Для размещения элемента щелкните по кнопке . Появится панель «Place Part» (рисунок В.5,а). Изображения схемных элементов располагаются в библиотеках с расширением «.olb» (рисунок В.5,б). Нажатием «Add Library» добавьте из папки ...Orcad\Capture\Library\PSpice следующие необходимые библиотеки:

- для ввода резисторов, конденсаторов, индуктивностей - analog.olb - базовая библиотека аналоговых элементов;
- для ввода источника «VSIN» - source.olb - библиотека источников сигналов;
- в ввода диодов – библиотеку ediode.olb.

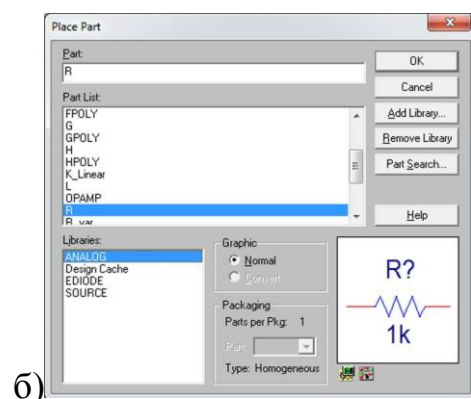
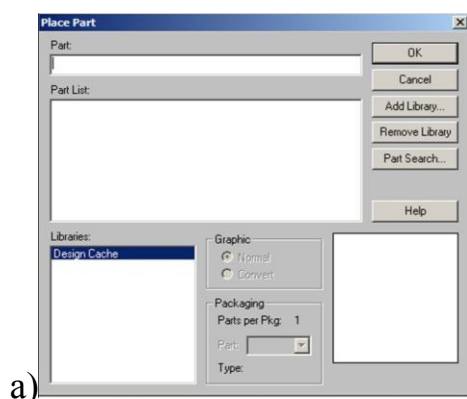


Рисунок В.5

Выбранные библиотеки отобразятся в окне «Libraries» (рисунок В.5,б).

Далее, для ввода любого компонента выпрямителя (например – резистора), необходимо:

- выбрать курсором в окне «Libraries» библиотеку с требуемым элементом (например, для ввода резистора – analog.olb) – в «Part List» появиться список элементов библиотеки;
- щёлкнуть по необходимому элементу в списке – в правом нижнем окне появиться его условное графическое изображение (УГО) (рисунок В.5, б);
- нажать кнопку ОК или ещё раз дважды щёлкнуть левой кнопкой мыши по выбранному компоненту в «Part List» - в окне схемы «Page1» появиться прямоугольный контур, соответствующий размерам УГО компонента;
- перенести курсором контур УГО в желаемое место окна схемы;
- зафиксировать положение компонента, щелкнув левой кнопкой мыши – на месте контура появиться УГО, рядом с ним – его позиционное обозначение.

В.2.2 Размещение нескольких элементов одного типа

Ввод нескольких элементов одного типа рекомендуется выполнять следующим образом:

а) так же, как и в предыдущем подразделе, введите первый элемент (например, диод D1).

б) переместив курсор в другое место, опять нажмите левую кнопку мыши - на экране появится еще один такой же элемент (диод D2);

с) таким образом, можно размещать сколько угодно копий;

д) снять активность текущей команды размещения (именно диода) можно следующими способами:

- нажать клавишу [Esc];
- нажать правую кнопку мыши, исполнив затем команду **End Mode** в открывшемся контекстном меню;
- щёлкнуть по пиктограмме **Select**.


V.2.3 Размещение общей точки схемы («земли»)

Командой «**Place Ground**» (кнопка ) – выбираете элемент «0» из библиотеки source.olb и размещаете на схеме.

Размещение «земли» обязательно – без неё невозможно моделирование в программе «PSPice». Заземлить возможно любую точку, например «минус» выпрямителя.

V.3 Соединение элементов

V.3.1 Рисование проводников

Для рисования проводника щелкните по пиктограмме «**Place wire**» ()». Обратите внимание: курсор мыши изменился - принял форму перекрестия. Далее:

а) при соединении простыми прямолинейными отрезками первым нажатием левой кнопки мыши обозначьте начало проводника, вторым – конец;

б) при рисовании сложной цепи, неоднократно меняющей направление, необходимо в точках излома фиксировать уже нарисованную часть проводника щелчком левой кнопки мыши. Закончить рисование цепи можно следующими способами:

- нажать правую кнопку мыши и исполнить команду **End Wire**;
- произвести двойной щелчок в точке, где заканчивается проводник;
- при постоянно нажатой кнопке мыши рисовать цепь до достижения при достижении вывода элемента или начала другого проводника, затем кнопку отпустить (активность команды «**Place wire**» не снимается).

Закончить процесс рисования проводников можно:

- нажав клавишу «Esc»;
- щелкнув на пиктограмму «**Select**»;
- выбрав новую команду.

Линии связи и выводы элементов схемы допускается соединять между собой только встык, без наложения. Визуальный контроль подключения цепи к контакту весьма прост: свободный вывод компонента заканчивается небольшим квадратиком, который исчезает, если произошло соединение. И наоборот, если проводник под-

ключается к другой цепи, то в точке их соприкосновения появляется так называемое Junction-соединение (довольно жирная точка малинового цвета). Добавим, что если проводники соприкасаются своими концами, то создаваемый электрический контакт не порождает Junction-соединения.

В.3.2 Назначение имён цепей

Щелкнув по пиктограмме **Place net alias** - откроется панель Place Net Alias, используемая для задания имени цепи. Введем с клавиатуры имя, например In, и нажмем кнопку ОК. Затем габаритный прямоугольник, привязанный к курсору мыши и показывающий размеры имени, необходимо «прижать» непосредственно к той цепи, которую мы именуем.

Неименованные цепи получают системные имена, присвоенные графическим редактором (неудобные для визуального восприятия). Поэтому цепи, сигналы которых представляют интерес при моделировании схемы, рекомендуется именовать.

В.4 Разворот, отражение и удаление элементов и проводников схемы

Подведите курсор к ненужному элементу или проводнику и выделите его щелчком мыши - элемент выделится малиновым цветом. Далее с элементом можно сделать следующее:

- а) нажав клавишу Del - удалить элемент с экрана;
- б) нажатием правой кнопки мыши активизировать контекстное меню и:
 - командой «**Rotate**» повернуть элемент на 90° против часовой стрелки;
 - командой «**Mirror Vertically**» зеркально отразить по вертикали;
 - командой «**Mirror Horizontally**» зеркально отразить по горизонтали.

В.5 Редактирование параметров элементов

В.5.1 Редактирование параметров резисторов, конденсаторов и индуктивностей

Операцию для R, L и C можно выполнить следующими способами:

1) С помощью окна «Property editor» (рисунок В.6):

- дважды щёлкнуть по УГО элемента;
- в открывшемся окне «Property editor» активировать пункт «Parts»;
- появившуюся вверху окна графу белого цвета прокрутить до конца вправо, и найти столбец «Value»;
- отредактировать параметр «Value»;
- закрыть окно «Property editor».

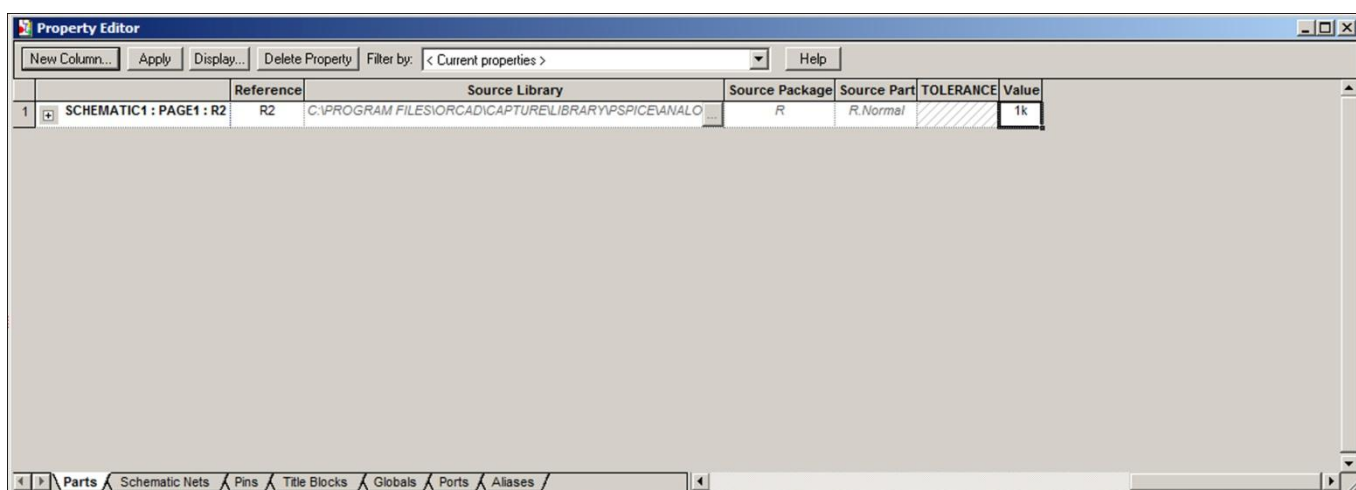


Рисунок В.6

2) С помощью окна «Display Properties»:

- дважды щёлкнуть расположению параметра редактируемого элемента;
- в открывшемся окне «Display Properties» (рисунок В.7) отредактировать параметр «Value»;
- щёлкнуть по «Ok» или нажать «Enter».

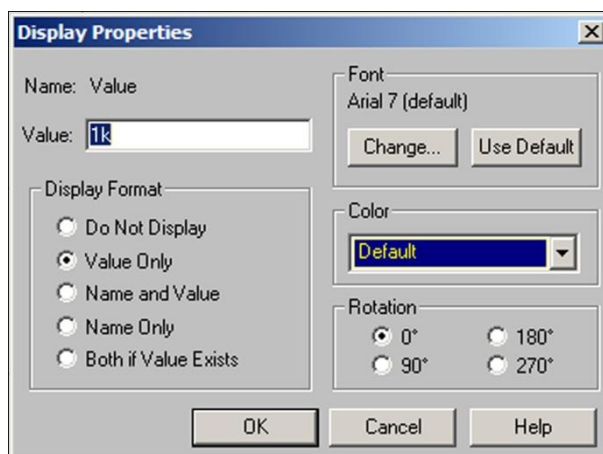


Рисунок В.7

В.5.2 Редактирование параметров источников «VSIN»

Источники гармонического сигнала «VSIN» характеризуются параметрами:

- a) VOFF – начальное постоянное смещение;
- b) VAMPL - амплитуда;
- c) FREQ – частота в герцах.

Каждый из перечисленных параметров редактируется с помощью меню «Display Properties», как и в предыдущем подразделе. В настоящей работе VOFF=0, FREQ=50Hz, $VAMPL = \sqrt{2} \cdot U_2$.

Для трёхфазных выпрямителей для источников фазы В и фазы С необходимо настроить начальные фазы. Щёлкнув по УГО соответствующего источника, открыть окно «Property editor», где в меню «Parts» найти параметр «Phase». Для источника фазы В ввести туда «-120°», фазы С – «120°».

Приложение Г

(рекомендуемое)

Формирование задания анализа и пуск моделирования

Перед запуском расчёта необходимо сформировать для программы PSpice задание на моделирование. Для этого выполняете операции, приведённые ниже.

a) В системном меню Orcad Capture откройте меню «PSpice» (рисунок Г.1,a).

b) Выбираете пункт «New Simulation Profile».

c) В открывшемся окошке «New Simulation» (рисунок Г.1,b) вводите произвольное имя профиля задания, причём, только из латинских букв и/или цифр.

d) После ввода имени должно открыться окно редактирования профиля симуляции «Simulation Setting <Name>» (рисунок Г.1,c). Если такового окна не наблюдаете, кликните по вновь появившейся пиктограмме в панели задач Windows (рисунок Г.1,d).

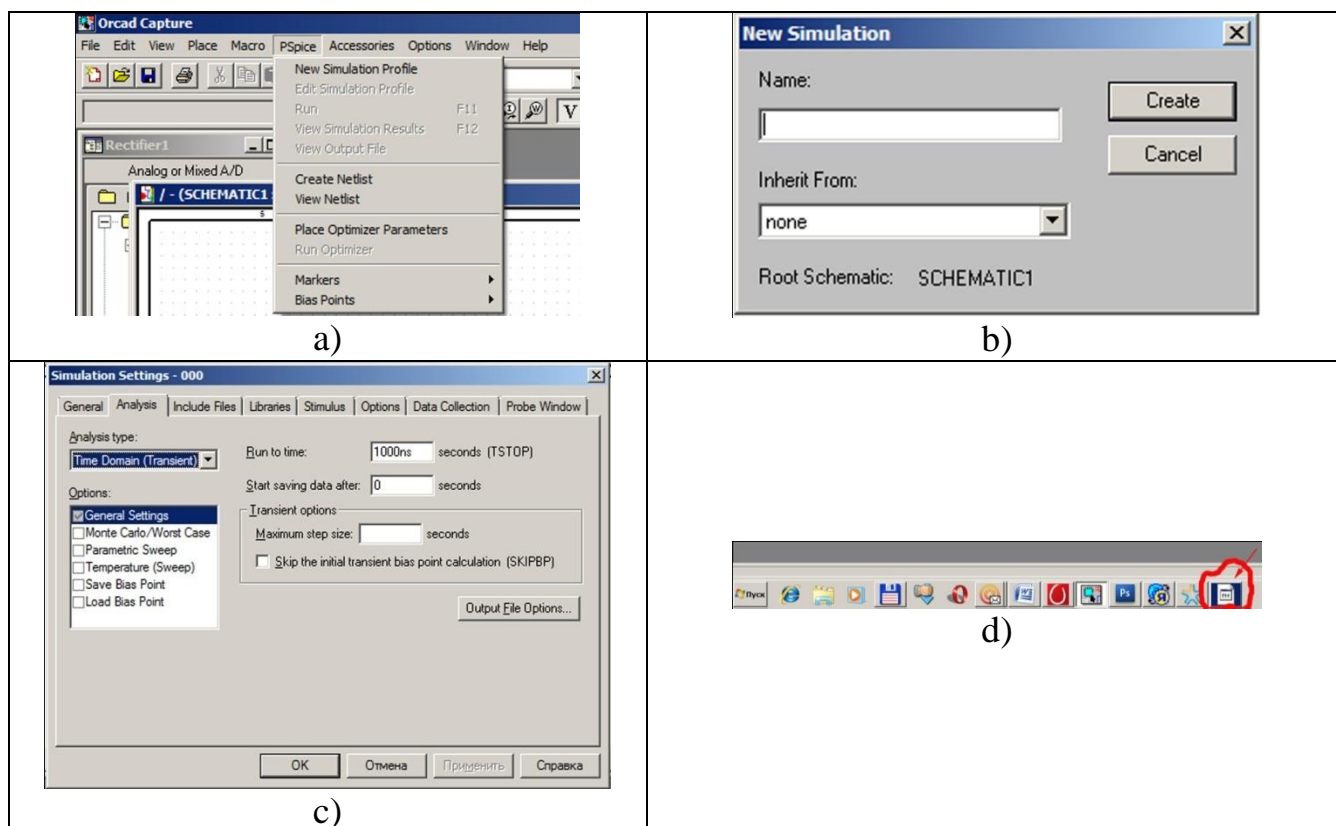


Рисунок Г.1 – Ввод нового профиля симуляции

е) Удостоверьтесь, что в поле «Analyses type» установлен тип анализа «Time Domain (Transient)», а в поле «Options» активирован режим «General Setting», то есть режим «общих установок».

ф) В поле «Run to time» введете время анализа TSTOP. Значение параметра TSTOP устанавливается в зависимости от решаемой задачи, либо в соответствии с методическими указаниями.

г) В поле «Start saving data after» вводите TSTART = 0 s.

h) В поле «Maximum step size» вводите максимальный шаг дискретизации по времени. Значение шага выберете из рекомендуемого диапазона, определённого выражением

$$TSTEP = \left(0,001 \dots 0,01 \right) TSTOP.$$

и) Кликаете по «Ok».

Запустить моделирование вы можете:

- кликнув по пиктограмме «▶»;
- выполнив команду «Run» в меню «PSpice»;
- нажав кнопку «F11».

После запуска откроется окно программы «PSpice», в котором увидите хронометраж процесса моделирования схемы во временной области (выделено на рисунке Г.2,а). Если окна не наблюдаете – пощёлкайте по вновь появившейся пиктограмме «▶» в панели задач. После окончания моделирования откроется пустое окошко «plot» («график») для вывода диаграмм (рисунок Г.2,б).

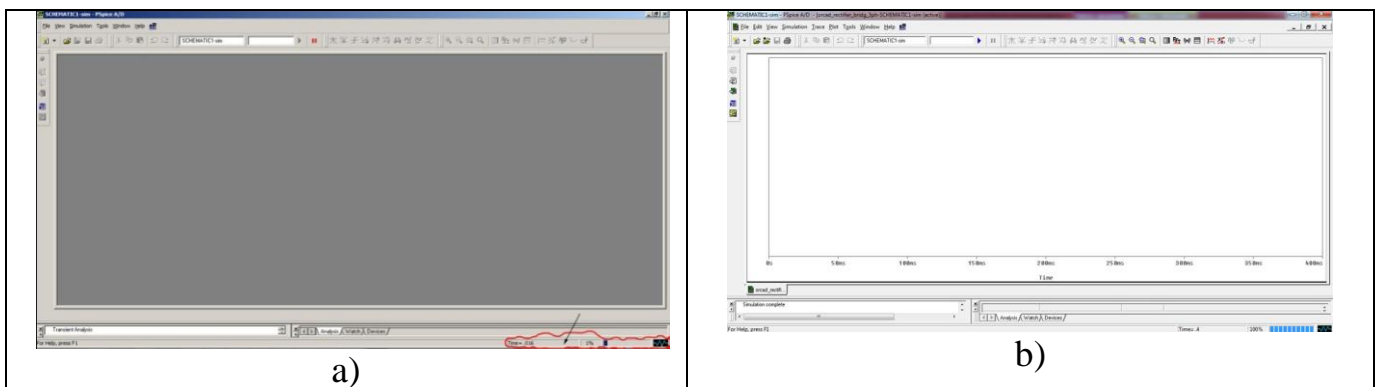


Рисунок Г.2


Приложение Д

(рекомендуемое)

Вывод диаграмм электрических процессов


Д.1 Вывод диаграмм напряжений

В настоящем подразделе рассматривается способ вывода диаграмм напряжений – разностей узловых потенциалов, при котором узлы идентифицируются собственными наименованиями «Name». «Name» либо соответствует поставленной рядом метке «Net Alias», либо даётся по умолчанию. Для вывода диаграмм разностей потенциалов выполните последовательность действий, описанную ниже.

а) Кликнете по пиктограмме  (либо выполните команду «Add Trace» в меню «Trace», либо нажмите кнопку «Insert») – появится окно «Add Trace» со списком вычисленных электрических аналоговых величин - напряжений V(xxx) – «Voltages», токов I(xxx) - «Currents», мощностей W(xxx) – «Power» (рисунок Д.1,а).

б) Рекомендуется для облегчения поиска не интересующие электрические величины (например, «Power» и «Currents») из списка убрать – «стереть» галочки напротив них (рисунок Д.1,б).

с) В списке в поле «Simulation Output Variables» находите переменную напряжения V(+xxx), где +xxx - имя цепи или узла, потенциал которого вы считаете более высоким. Например, для синусоидального источника V1 на рисунке 1.1,а $V(+xxx)=V(U21)$.

д) Кликаете по V(+xxx) – она отобразится в поле «Trace Expression» (рисунок Д.1,с). Если второй зажим элемента подключен к , то есть потенциал зажима – нулевой, можете перейти к пункту г.

е) После V(+xxx) пишете знак «минус».

ф) в поле «Simulation Output Variables» находите переменную напряжения V(-xxx), где «-xxx» – имя цепи или узла с более низким потенциалом, к которому подключен второй зажим элемента. Для синусоидального источника V1 рисунка

1.1,а $V(-xxx)=V(U22)$. Кликаете по «V(-xxx)» – это напряжение последовательно добавится после знака «минус» в поле «Trace Expression» (рисунок Д.1,д).

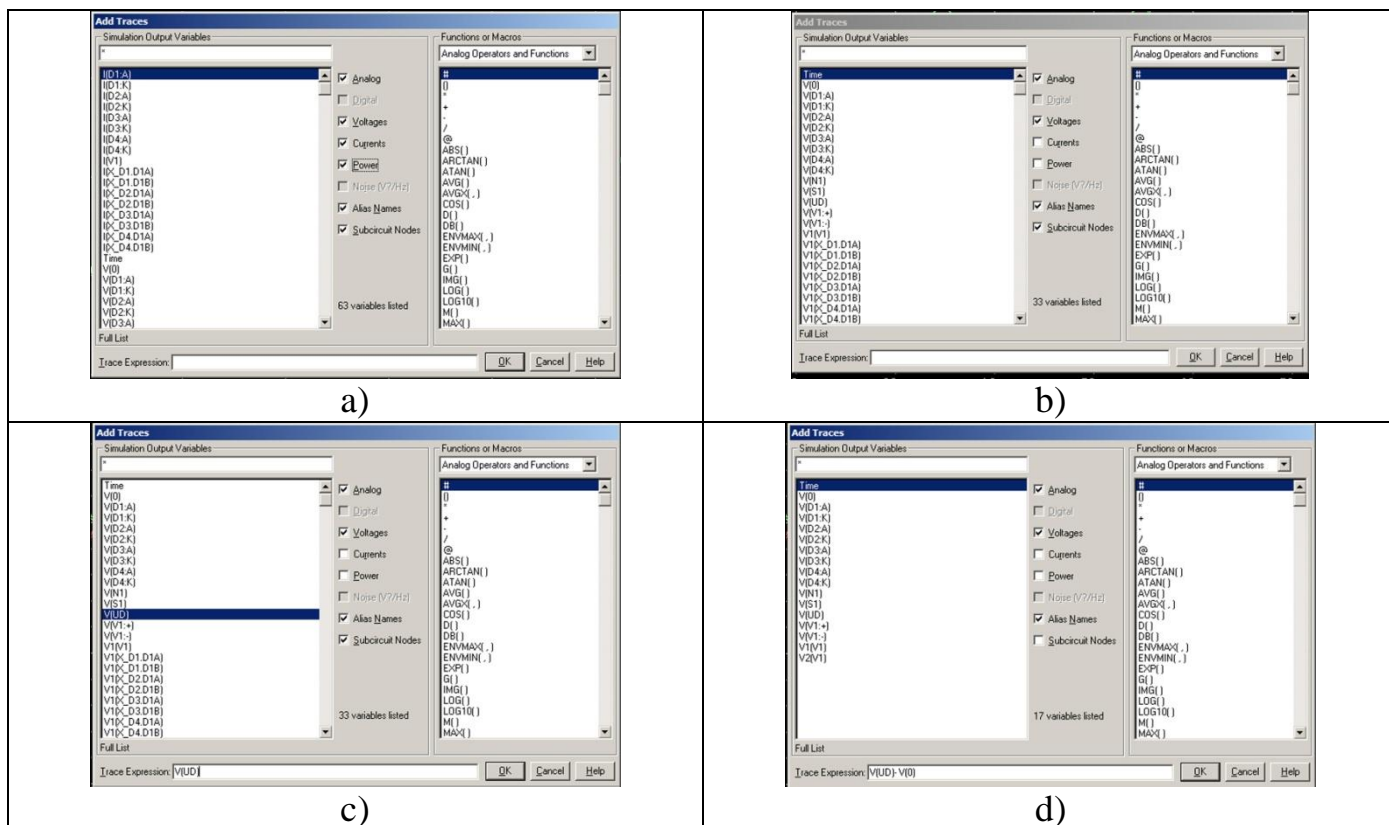


Рисунок Д.1 – Выбор переменной для вывода на график

г) Кликаете «Ok» - диаграмма построится на графике.

Повторяете действия пунктов а) – г) для вывода всех нужных вам диаграмм напряжений. На рисунке Д.2 представлен пример выведенных диаграмм напряжений на выходе и входе трёхфазного мостового выпрямителя.

Д.2 Вывод диаграмм токов

При выводе диаграмм токов нужно учитывать то, что в списке электрических величин токи $I(xxxx)$ привязываются либо к элементу (если это двухполюсный пассивный элемент), либо к выводам элементов (для всех остальных). Ниже показана последовательность действий просмотра диаграмм токов.

а) Аналогично пункту а) предыдущего подраздела вызовете окно «Add Trace».

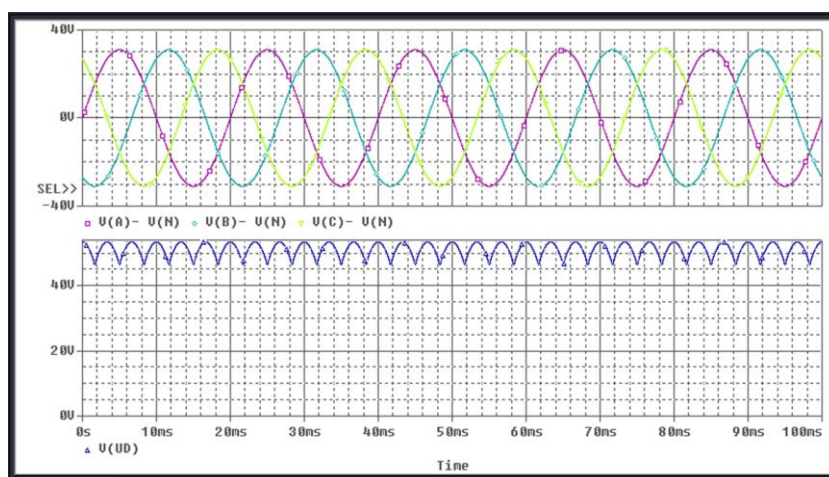


Рисунок Д.2

б) Убедитесь, что опция «Currents» активна – напротив «Currents» должна быть установлена галочка.

с) В списке в поле «Simulation Output Variables» находите интересующую вас переменную тока $I(\text{xxx})$.

д) Кликаете по $I(\text{xxx})$ – она отобразится в поле «Trace Expression».

е) Кликаете «Ok» - диаграмма построится на графике.

Действиями пунктов а) – е) можете вывести все нужные диаграммы токов.

Д.3 Масштабирование графиков

Д.3.1 Масштабирование с помощью команды «Zoom Area»

Команду можно активировать следующими способами:

- кликнуть по пиктограмме «»;



- комбинацией клавиш «Ctrl+A»;

- через основное меню, выполнив последовательность команд «View» → «Zoom» → «Area».

После активации команды курсор изображается крестиком. Далее, нажав левую кнопку мыши, выделяете фрагмент графика, который требуется увеличить. Не рекомендуется начинать выделение за пределами графика – «прямоугольник» фрагмента не отобразится, результат масштабирования не предсказуем. Заканчивать же выделение за пределами графика допускается.

Д.3.2 Масштабирование командами «Zoom In» и «Zoom Out»

Активировать команды можно следующими способами:

- кликнув по пиктограмме «» или «»;
- через основное меню, выполнив последовательность команд «View» → «Zoom» → «In» или «View» → «Zoom» → «Out».

Команда «Zoom In» также активируется комбинацией клавиш «Ctrl-I».

После активации команд курсор отображается перекрестием. Наводите курсор на область графика, которую требуется увеличить или уменьшить, кликаете левой кнопкой мыши. Выполняется соответствующее действие, команда деактивируется.

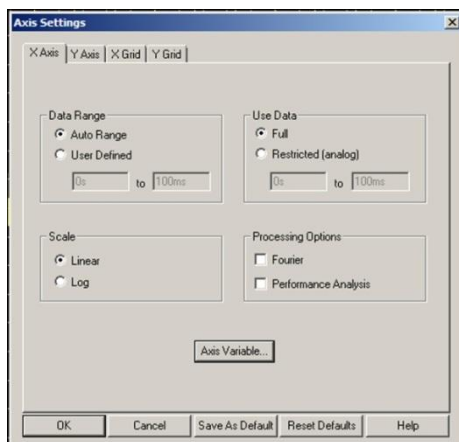
Д.3.3 Масштабирование редактированием диапазонов по осям X и Y

Анализируя график, определяете желаемые диапазоны по осям. Затем активируете окно «Axis setting» (рисунок Д.3,а) одним из следующих способов:

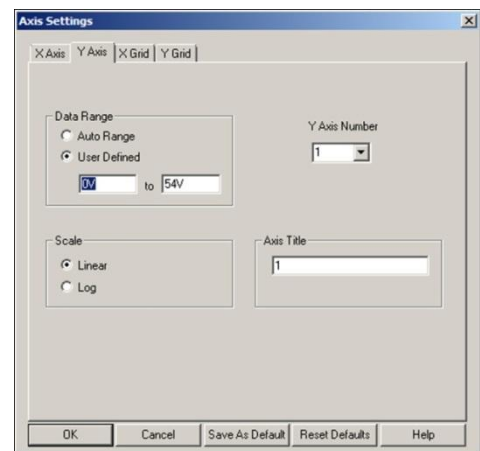
- через основное меню, выполнив команду «Plot» → «Axis setting»;
- кликнув по полю оцифровки шкал осей Y или X.

Редактирование диапазонов выполняете в следующей последовательности:

- в окне «Axis setting» выбираете подменю «Y - Axis» или «X - Axis»;
- активируете режим «User Defined» в поле «Data Range» (рисунок Д.3,б);
- устанавливаете определённые вами границы диапазона.



a)




b)

Рисунок Д.3 – Редактирование диапазонов

Д.3.4 Возврат к масштабу «по умолчанию»

Имеется в виду возврат к панорамному отображению всей просчитанной диаграммы, осуществляется командой «Zoom Fit». Выполнить её можно:

- кликнув по пиктограмме ;
- через основное меню, выполнив последовательность команд «View» → «Zoom» → «Fit».

Д.4 Вывод множества диаграмм на разные графики

Применять вывод диаграмм на разных графиках имеет смысл либо при большом количестве диаграмм, либо при построении диаграмм величин разных размерностей – токов, напряжений, относительных величин и многих других.

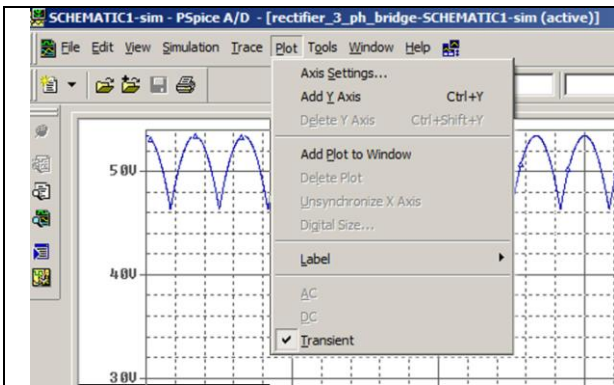
Вызов нового графика выполняете следующим образом:

- a) Входите в меню «Plot» (рисунок Д.4,а)
- b) Выполняете команду «Add Plot to Window» – в окне PSpice добавиться ещё один график (рисунок Д.4,б).
- c) Установите указатель «SEL>>» напротив нового графика слева – установив курсор мыши на новый график и кликнув левой кнопкой.
- d) Выводите на новом графике диаграммы напряжений или токов, пользуясь руководствами подразделов Д.1 или Д.2. Пример получившихся построений для трёхфазного мостового выпрямителя – на рисунке Д.4,с.

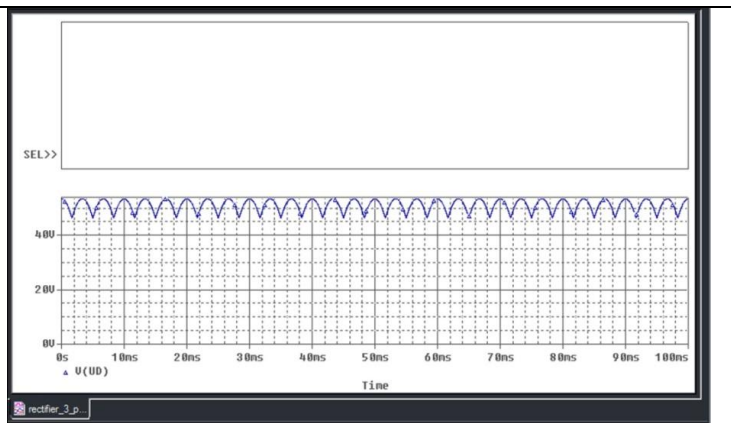
Д.5 Удаление диаграмм

Выполняете следующим образом:

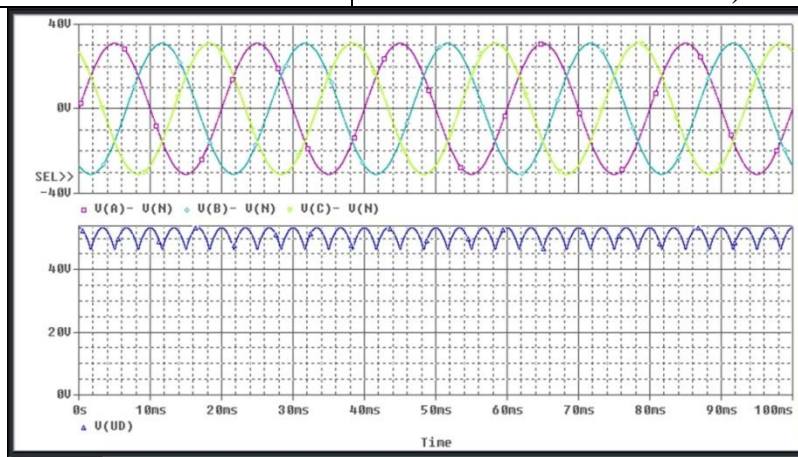
- кликаете мышью по наименованию удаляемой диаграммы – наименование выделится красным цветом (рисунок Д.5);
- жмёте кнопку «Delete» - диаграмма удалиться.



a)



b)



c)

Рисунок Д.4 – Построение диаграмм на разных графиках

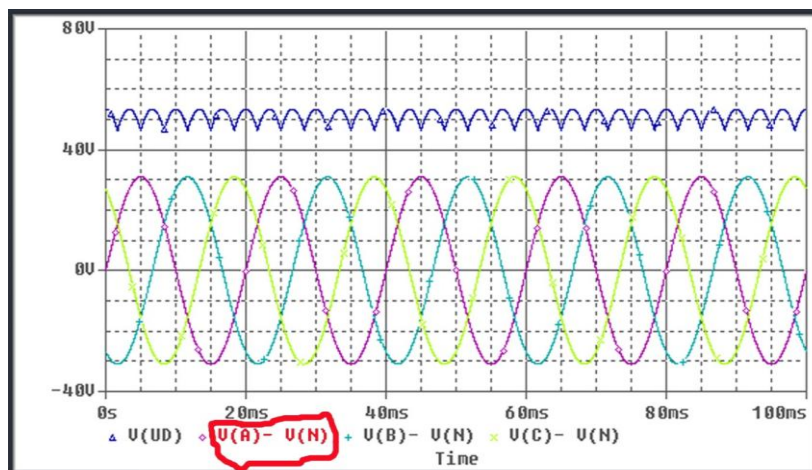


Рисунок Д.5 – Удаление диаграммы «V(A)-V(N)»

Д.6 Удаление окна диаграмм

Выполняете так:

- кликаете мышью по удаляемому окну диаграмм – указатель «SEL» устанавливается напротив окна слева;
- из основного меню выполняете команду «Plot» → «Delete plot».

Приложение Е

(рекомендуемое)

Параметры при резистивно-индуктивной нагрузке

Таблица Е.1 – Внутренние параметры выпрямителей, приведённые к внешним

Наименование параметра	Схема выпрямления			
	Двухполупериодная с нулевым выводом	Однофазная мостовая	Трёхфазная с нулевым выводом	Трёхфазная мостовая
Действующее напряжение вторичной обмотки U_2/U_{d0}	1,11	1,11	0,855	0,428
Действующий ток вторичной обмотки I_2/I_{d0}	0,707	1	0,58	0,815
Действующий ток первичной обмотки I_1/I_{d0}	$\frac{1}{k_{TV}}$	$\frac{1}{k_{TV}}$	$\frac{0,47}{k_{TV}}$	$\frac{0,815}{k_{TV}}$
Типовая мощность трансформатора P_{min}/P_0	1,34	1,11	1,35	1,045
Средний ток вентиля $I_{vd,0}/I_{d0}$	0,5	0,5	0,333	0,333
Действующий ток вентиля I_{vd}/I_{d0}	0,707	0,707	0,333D	0,333D
Амплитуда тока вентиля $I_{vd,max}/I_{d0}$	1	1	1	1

Приложение Ж

Типовые магнитопроводы и обмоточные провода

Ж.1 Броневые пластинчатые магнитопроводы

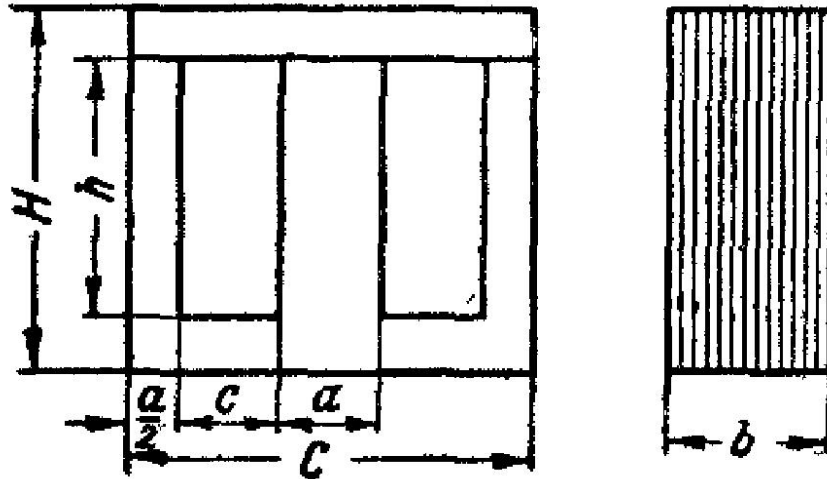


Таблица Ж.1 – Параметры пластинчатых магнитопроводов

Обозначение магнитопровода	Размеры, мм						Активная площадь сечения среднего стержня, см ²	Средняя длина магнитной силовой линии, см	Сечение стали × сечение окна, см ⁴	Активный объем магнитопровода, см ³	Вес магнитопровода, г	Количество листов, шт.
	a	H	c	C	H	b						
Ш09×09	9	22,5	9	36	31,5	9	0,74	7,72	1,62	5,71	45	23
						12	0,98	7,72	2,16	7,56	60	31
Ш12×10	12	30	12	48	42	10	0,98	10,03	4,3	9,82	90	26
						12	1,31	10,03	5,2	13,14	110	31
						16	1,75	10,03	6,8	17,55	140	42
						20	2,18	10,03	8,6	21,86	180	52
						25	2,73	10,03	10,8	27,38	230	65
						32	3,49	10,03	13,7	35	280	83
Ш16×10	16	40	16	64	56	10	1,31	13,7	10,2	17,95	156	26
						12	1,75	13,7	12,1	24	190	31
						16	2,33	13,7	16,6	32	260	42
						20	2,91	13,7	20,5	39,8	320	52
						25	3,64	13,7	25,6	49,8	400	65
						32	4,66	13,7	32,6	63,8	510	83
Ш20×12	20	50	20	80	70	12	2,18	17,14	24	37,4	300	31
						16	2,91	17,14	32	50	400	42

Таблица Ж.1 – Параметры пластинчатых магнитопроводов

Обозначение магнитопровода	Размеры, мм						Активная площадь сечения среднего стержня, см ²	Средняя длина магнитной силовой линии, см	Сечение стали×сечение окна, см ⁴	Активный объём магнито- провода, см ³	Вес магнитопровода, г	Количество листов, шт.
	<i>a</i>	<i>H</i>	<i>c</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>b</i>						
20						20	3,64	17,14	40	62,4	500	52
25						25	4,55	17,14	50	78,1	620	65
32						32	5,82	17,14	64	99,8	800	83
40						40	7,28	17,14	80	125	990	104
50						50	9,1	17,14	100	156,2	1240	130
Ш25×16						16	3,64	21,4	62,5	77,9	620	42
20						20	4,55	21,4	78	97,4	770	52
25						25	5,68	21,4	97,5	121,8	970	65
32	25	62,5	25	100	87,5	32	7,28	21,4	125	156	1230	83
40						40	9,1	21,4	156	195	1560	104
50						50	11,4	21,4	195	244	1930	130
64						64	14,5	21,4	250	310	2470	166
Ш32×20						20	5,28	27,4	164	159,5	1280	52
25						25	7,82	27,4	205	195,3	1580	65
32						32	9,32	27,4	261	255,5	2020	83
40	32	80	32	128	112	40	11,56	27,4	328	319	2530	104
50						50	14,65	27,4	410	399	3170	130
64						64	18,63	27,4	522	510	4040	166
80						80	23,29	27,4	656	640	5070	208
Ш40×25						25	9,1	34,3	400	312	2470	65
32						32	11,65	34,3	512	400	3160	83
40						40	14,56	34,3	640	500	3960	104
50	40	100	40	160	140	50	18,2	34,3	800	625	4950	130
64						64	23,29	34,3	1025	800	6320	166
80						80	29,12	34,3	1280	998	7920	208
100						100	36,4	34,3	1600	1250	9860	260

Ж.2 Броневые ленточные магнитопроводы

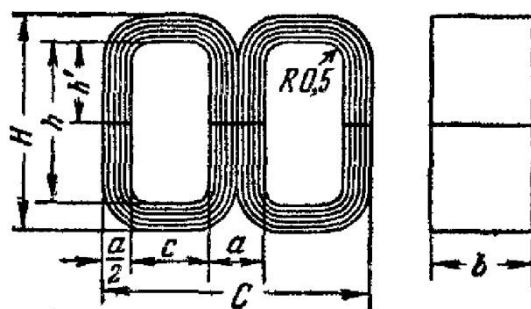


Таблица Ж.2 – Параметры ленточных магнитопроводов

Обозначение магнитопровода	Размеры, мм						Активная площадь сечения среднего стержня, см ²	Средняя длина магнитной силовой линии, см	Сечение стали×сечение окна, см ⁴	Активный объём магнитопровода, см ³	Вес магнитопровода, г
	<i>a</i>	<i>H</i>	<i>c</i>	<i>C</i>	<i>H</i>	<i>B</i>					
ШЛ06×6,5 08 10 12,5	6	15	6	24	21	6,5	0,32	5,1	0,14	1,64	14
						08	0,4		0,173	2,04	17
						10	0,5		0,216	2,55	21
						12,5	0,62		0,27	3,15	26
ШЛ08×08 10 12,5 16	8	20	8	32	28	08	0,53	6,8	0,41	3,6	31
						10	0,67		0,51	4,55	38
						12,5	0,83		0,64	5,63	48
						16	1,06		0,82	7,2	62
ШЛ10×10 12,5 16 20	10	25	10	40	35	10	0,84	8,5	2,5	7,15	60
						12,5	1,06		3,12	9	75
						16	1,35		4	11,4	96
						20	1,69		5	14,4	120
ШЛ12×12,5 16 20 25	12	30	12	48	42	12,5	1,28	10,2	5,4	13,1	105
						16	1,64		6,9	16,8	138
						20	2,05		8,7	20,9	175
						25	2,56		10,8	26,2	220
ШЛ16×16 20 25 32	16	40	16	64	56	16	2,2	13,6	16,6	29,9	250
						20	2,75		20,5	37,4	310
						25	3,44		25,6	46,6	390
						32	4,4		32,6	59,9	500
ШЛ20×20 25 32 40	20	50	20	80	70	20	3,47	17,1	40	59,3	490
						25	4,34		50	74,2	610
						32	5,56		64	95,2	780
						40	6,95		80	118,5	975
ШЛ25×25 32 40 50	25	62,5	25	100	87,5	25	5,44	21,3	98	116,5	950
						32	6,95		125	148	1220
						40	8,69		156	184	1520
						50	10,9		195	233	1900
ШЛ32×32 40 50 64	32	80	32	128	112	32	8,96	27,4	261	245	2000
						40	11,2		328	306	2500
						50	14		410	383	3140
						64	17,9		523	490	4000
ШЛ40×40 50 64 80	40	100	40	160	140	40	14	34,2	640	479	3900
						50	17,5		800	600	4900
						64	22,4		1025	765	6300
						80	28,1		1280	962	7900

Таблица Ж.3 – Данные обмоточных проводов

Номинальный диаметр, мм	Сечение, мм ²	Вес 1 м медной проволоки, г	Диаметр провода с изоляцией, мм			
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПБД
0,03	0,00071	0,0063	0,045	-	-	-
0,04	0,00126	0,0112	0,055	-	-	-
0,05	0,00196	0,0175	0,065	-	-	-
0,06	0,00283	0,0251	0,075	0,085	0,09	-
0,07	0,00385	0,0342	0,085	0,095	0,1	-
0,08	0,00503	0,0447	0,095	0,105	0,11	-
0,09	0,00636	0,0565	0,105	0,115	0,12	-
0,1	0,00785	0,0698	0,12	0,125	0,13	-
0,11	0,0095	0,0845	0,13	0,135	0,14	-
0,12	0,01131	0,101	0,14	0,145	0,15	-
0,13	0,01327	0,118	0,15	0,155	0,16	-
0,14	0,01539	0,137	0,16	0,165	0,17	-
0,15	0,01767	0,157	0,17	0,18	0,19	-
0,16	0,02011	0,179	0,18	0,19	0,20	-
0,17	0,0227	0,202	0,19	0,20	0,21	-
0,18	0,02545	0,226	0,20	0,21	0,22	-
0,19	0,02835	0,252	0,21	0,22	0,23	-
0,2	0,03142	0,279	0,225	0,23	0,24	-
0,21	0,03464	0,308	0,235	0,24	0,25	-
0,23	0,04155	0,369	0,255	0,27	0,28	-
0,25	0,04909	0,436	0,275	0,29	0,3	-
0,27	0,05726	0,509	0,31	0,31	0,32	-
0,29	0,06605	0,587	0,33	0,33	0,34	-
0,31	0,07548	0,671	0,35	0,35	0,36	-
0,33	0,08553	0,76	0,37	0,37	0,38	-
0,35	0,09621	0,855	0,39	0,39	0,41	-
0,38	0,1134	1,01	0,42	0,42	0,44	0,61
0,41	0,1320	1,18	0,45	0,45	0,47	0,64
0,44	0,1521	1,35	0,49	0,48	0,5	0,67
0,47	0,1735	1,54	0,52	0,51	0,53	0,7
0,49	0,1886	1,68	0,54	0,53	0,55	0,72
0,51	0,2043	1,82	0,56	0,56	0,58	0,74
0,53	0,2206	1,96	0,58	0,58	0,6	0,76
0,55	0,2376	2,11	0,6	0,6	0,62	0,78
0,57	0,2552	2,27	0,62	0,62	0,64	0,8
0,59	0,2734	2,43	0,64	0,64	0,66	0,82
0,62	0,3019	2,68	0,67	0,67	0,69	0,85
0,64	0,3217	2,86	0,69	0,69	0,72	0,87
0,67	0,3526	3,13	0,72	0,72	0,75	0,9
0,69	0,3739	3,32	0,74	0,74	0,77	0,92
0,72	0,4072	3,6	0,78	0,77	0,8	0,96
0,74	0,4301	3,82	0,8	0,8	0,83	0,98
0,77	0,4657	4,14	0,83	0,83	0,86	1,01
0,8	0,5027	4,47	0,86	0,86	0,89	1,04
0,83	0,5411	4,81	0,89	0,89	0,92	1,07
0,86	0,5809	5,16	0,92	0,92	0,96	1,1
0,9	0,6362	5,66	0,96	0,96	0,99	1,14
0,93	0,6793	6,04	0,99	0,99	1,02	1,17
0,96	0,7238	6,44	1,02	1,02	1,05	1,2
1,0	0,7854	6,98	1,07	1,08	1,11	1,29
1,04	0,8495	7,55	1,12	1,12	1,15	1,33
1,08	0,9161	8,14	1,16	1,16	1,19	1,37
1,12	0,9852	8,76	1,2	1,2	1,23	1,41
1,16	1,057	9,4	1,24	1,24	1,27	1,45
1,2	1,131	10,1	1,28	1,28	1,31	1,49

Номинальный диаметр, мм	Сечение, мм ²	Вес 1 м медной проволоки, г	Диаметр провода с изоляцией, мм			
			ПЭЛ	ПЭВ-1	ПЭВ-2	ПБД
1,25	1,227	10,9	1,33	1,33	1,36	1,54
1,3	1,327	11,8	1,38	1,38	1,41	1,59
1,35	1,431	12,7	1,43	1,43	1,46	1,64
1,4	1,539	13,7	1,48	1,48	1,51	1,69
1,45	1,651	14,7	1,53	1,53	1,56	1,74
1,5	1,767	15,7	1,58	1,58	1,61	1,79
1,56	1,911	17,0	1,64	1,64	1,67	1,85
1,62	2,061	18,3	1,71	1,7	1,73	1,91
1,68	2,217	19,7	1,77	1,76	1,79	1,98
1,74	2,378	21,1	1,83	1,82	1,85	2,04
1,81	2,573	22,9	1,9	1,9	1,93	2,11
1,88	2,776	24,7	1,97	1,97	2,0	2,18
1,95	2,987	26,5	2,04	2,04	2,07	2,25
2,02	3,205	28,5	2,12	2,11	2,14	2,32
2,1	3,464	30,8	2,2	2,2	2,23	2,4
2,26	4,012	35,7	2,36	2,36	2,39	2,62
2,44	4,676	41,6	2,54	2,54	2,57	2,8
2,63	5,433	48,3	-	-	-	2,99
2,83	6,29	55,9	-	-	-	3,19
3,05	7,306	65,0	-	-	-	3,42
3,28	8,45	75,1	-	-	-	3,65
3,53	9,787	87,0	-	-	-	3,9
3,8	11,34	101	-	-	-	4,17
4,1	13,2	117	-	-	-	4,47
4,5	15,9	142	-	-	-	4,88
4,8	18,1	161	-	-	-	5,18
5,2	21,24	189	-	-	-	5,53