



Министерство образования
Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Организация автомобильных перевозок
и дорожного движения»

ЭЛЕКТРОННАЯ АВТОМАТИКА И ТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум)

Часть 2

Минск 2009

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Организация автомобильных перевозок
и дорожного движения»

ЭЛЕКТРОННАЯ АВТОМАТИКА И ТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум)
для студентов специальностей
1-44 01 01 «Организация перевозок и управление
на автомобильном и городском транспорте»
и 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»

В 2 частях

Часть 2

Работа в среде Electronics Workbench

Минск 2009

УДК 681.5 (076.5)

ББК 32.965я7

Э 45

Составитель

В.В. Мочалов

Рецензенты:

Ю.П. Важник, В.В. Напрасников

Э 45 Электронная автоматика и техника: лабораторные работы (практикум) для студентов специальностей 1-44 01 01 «Организация перевозок и управление на автомобильном и городском транспорте» и 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»: в 2 ч. / В.В. Мочалов. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2: Работа в среде Electronics Workbench. – 90 с.

В части 1 были приведены методические указания по выполнению лабораторных работ по курсу «Электронная автоматика и техника» с использованием физических образцов элементов электронной автоматики и техники и электронного контрольно-измерительного оборудования. В данном издании (части 2) приведены методические указания и контрольные задания для компьютерного моделирования и изучения работы электронных узлов автоматики с использованием программы Workbench, разработаны и приводятся задания для повариантной индивидуальной работы.

Практикум может быть использован студентами очной и заочной форм обучения при выполнении лабораторных, курсовых и дипломных работ с элементами электронной автоматики.

Часть 1 настоящего издания «Электронная автоматика и техника», автор В.В. Мочалов, вышла в свет в 2004 году в БНТУ.

Существенную помощь при составлении и апробации практикума внесли студенты дневной формы обучения М.Ю. Антошенко, А.И. Бобко, Т.О. Вайтуль, И.В. Дубковская, И.В. Лапковская, Е.Г. Сенкевич, О.Б. Смирнова, Е.С. Ходор, Г.З. Чирвоная, С.С. Чуевская (гр. 101516) и заочной С.С. Семченков (гр. 301515).

ISBN 978-985-525-006-8 (Ч. 2)

ISBN 978-985-525-217-8

© БНТУ, 2009

Лабораторная работа № 1

ОСНОВЫ РАБОТЫ В СРЕДЕ ELECTRONICS WORKBENCH. ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ

Цель

Освоить работу с основными компонентами Workbench и получить вольтамперные характеристики резисторов при различном соединении.

Задание

1.1. Изучить основные компоненты Electronics Workbench.

1.2. Для заданного варианта N собрать схему измерения и, используя Workbench, получить вольтамперные характеристики (ВАХ) двух отдельных резисторов, а также их последовательного и параллельного соединений. Номинальные значения резисторов выбирать по номеру варианта: $R1 = N \times 100$, кОм, и $R2 = N \times 33$, кОм, из ближайших промышленно выпускаемых стандартных значений резисторов.

1.3. Построить графики ВАХ и проанализировать полученные результаты.

Общие сведения

Программа Electronics Workbench применяется в большинстве высших учебных заведений мира с целью замены дорогостоящего экспериментального оборудования. Она предназначена для проектирования электрических цепей (аналоговых и цифровых) средней и высокой сложности и анализа их электрических параметров в различных режимах. Входные воздействия моделируются с помощью генераторов напряжения разной формы (гармонические колебания, прямоугольные и треугольные импульсы). Реакции цепи можно наблюдать с помощью осциллографа (осциллоскопа), мультиметра, вольт- и амперметров, логического анализатора, светодиодов, сегментных индикаторов, ламп накаливания, динамика. Можно легко получать амплитудную и фазовую частотные характеристики электронных аналоговых устройств автоматики с помощью частотного

графопостроителя (bode plotter). С помощью логического анализатора и конвертера легко и быстро можно изучать, исследовать и улучшать работу цифровых логических устройств.

В целом, практика использования программы в вузах стран СНГ показала ее эффективность и высокую степень гибкости для изучения и моделирования работы электронных узлов автоматики и техники.

Electronics Workbench реализована как реальная лаборатория, в которой имеются перед глазами все компоненты и инструменты, готовые к использованию. При наведении мышки на элемент меню и непродолжительном ожидании появляется подсказка с названием элемента. Имеется также текстовая помощь (на английском языке).

Основная панель Electronics Workbench 5.12 показана на рис. 1.1.

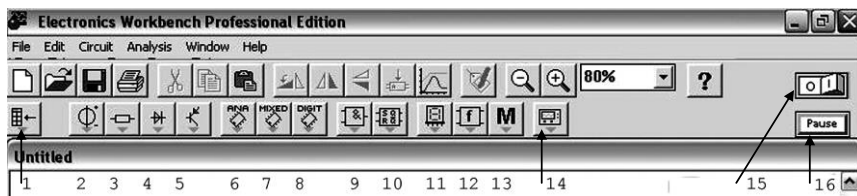



Рис. 1.1. Основная панель Electronics Workbench


Команды можно выбирать из следующих, разделов меню:


Файл (File), Правка (Edit), Схема (Circuit), Анализ (Analysis), Окно (Window), Помощь (Help).


Следующие пиктограммы обозначают возможные режимы работы (и горячие клавиши):

 Создать (^N), Открыть (^O), Сохранить (^S), Печатать (^P) документ.

 Вырезать (^X), Копировать (^C), Вставить (^V).

 Повернуть (^R), «Flip Horizontal» – отразить вправо, «Flip Vertical» – отразить вниз, «Create Sub circuit» – создать подсхему (^B), «Display Graphs» – графики.

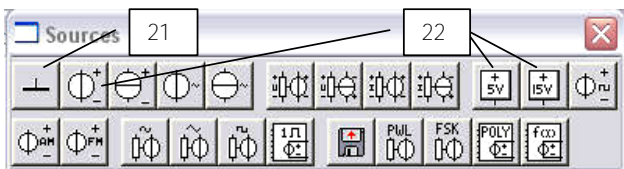
 «Component Properties» – свойства компонентов, «Zoom Out» – уменьшить масштаб, «Zoom In» – увеличить масштаб, Масштабирование в процентах.

- 1  «Help» – Помощь – вызов справки о данной панели.


Дополнительные пиктограммы 1–14 на рис. 1.1 обозначают различные наборы электронных компонентов, основные из которых раскрыты ниже. Кнопка 15 (Пуск) служит для включения или выключения, а кнопка 16 (Пауза) – для приостановки процесса работы устройства.

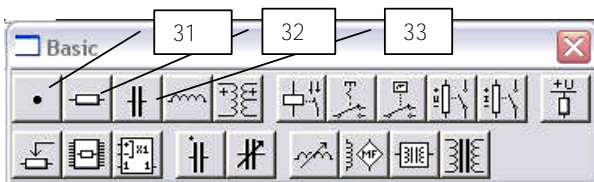
Поясним обобщенно основные наборы компонентов Electronics Workbench, которые понадобятся при выполнении заданий.

- 2  – Sources – источники сигналов:



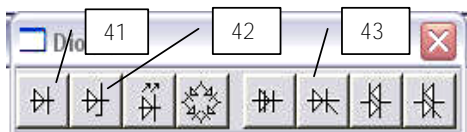
- 21– общая шина (заземление),
22– источники напряжения

- 3  – Basic – основные, пассивные компоненты:



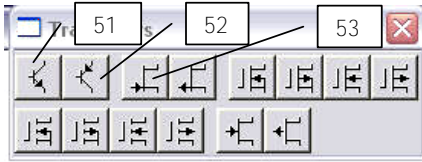
- 31– точка присоединения,
32 – резистор,
33 – конденсатор

- 4  – Diodes – диоды:




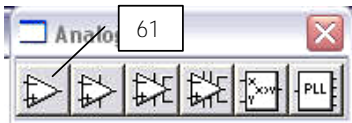
- 41 – полупроводниковый диод,
42 – стабилитрон,
43 – тиристор

5  – Transistors – транзисторы биполярные и полевые:




- 51 – транзистор биполярный n-p-n-типа,
- 52 – транзистор биполярный p-n-p-типа,
- 53 – полевой транзистор с P-N-переходом (с N-каналом)

6  – Analog ICs – аналоговые интегральные схемы (ИС):
операционные усилители, компаратор, цепь фазовой синхронизации




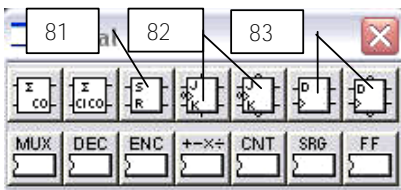
61 – операционный усилитель

7  – Mixed ICs – смешанные ИС:




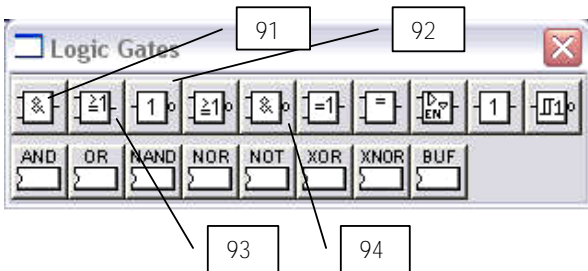
аналогоцифровые и цифроаналоговые преобразователи, ждущий (одностабильный) мультивибратор, таймер

8  – Digital ICs – цифровые ИС:



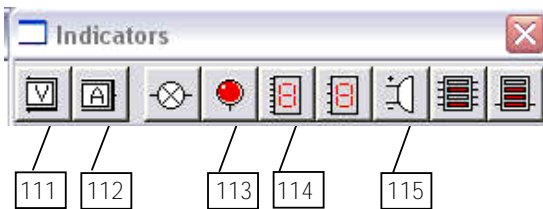
- 81 – RS-триггеры,
- 82 – JK-триггеры,
- 83 – D-триггеры

9  – Logic Gates – логические элементы (внимательно их выберите!!!):



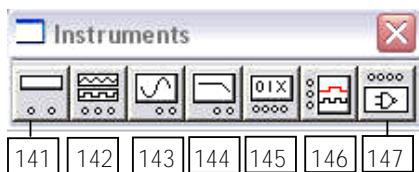
- 91 – И (AND),
- 92 – НЕ (NOT),
- 93 – ИЛИ (OR),
- 94 – И-НЕ (NAND)

11  – Indicators – индикаторные приборы:



- 111 – вольтметр,
- 112 – амперметр,
- 113 – красный индикатор уровня,
- 114 – семисегментный индикатор,
- 115 – динамик

14  – Instruments – приборы:



- 141 – мультиметр,
- 142 – функциональный генератор,

- 143 – двухлучевой осциллограф,
- 144 – построитель АЧХ (bode plotter),
- 141 142 143 144 145 146 147 145 – генератор цифровых слов (кодов) (word generator),
- 146 – логический анализатор (logic analyzer),
- 147 – логический преобразователь (logic converter).

Основные компоненты меню программы Workbench показаны на рис. 1.2.

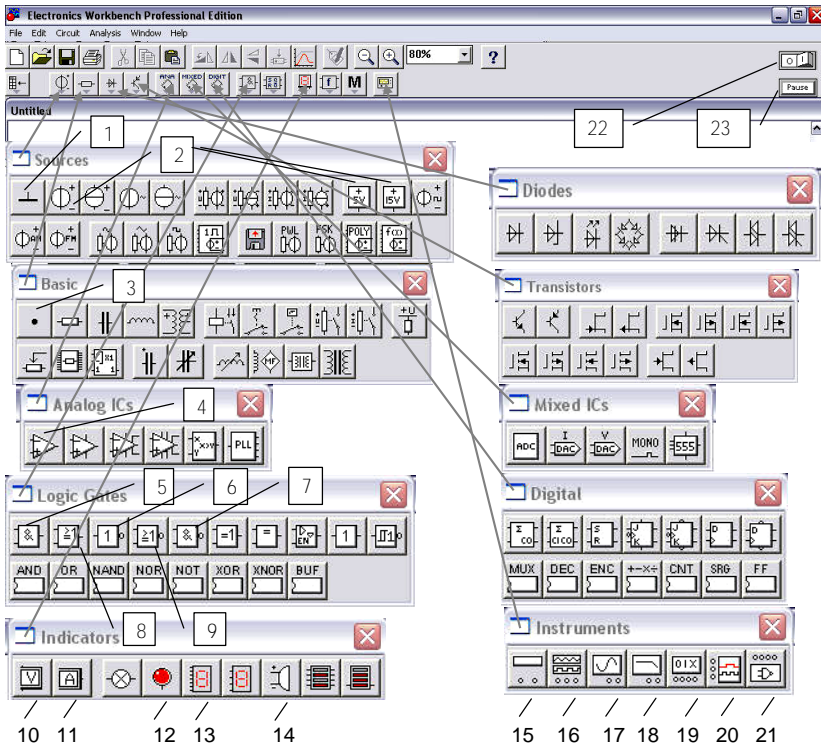




Рис. 1.2. Основные компоненты меню программы Electronics Workbench: 1 – общая шина; 2 – источники напряжения; 3 – точка присоединения; 4 – операционный усилитель; логические элементы: 5 – 2И, 6 – НЕ, 7 – 2И-НЕ, 8 – 2ИЛИ, 9 – 2ИЛИ-НЕ; 10 – вольтметр; 11 – амперметр; 12 – красный индикатор уровня; 13 – семисегментный индикатор; 14 – динамик; 15 – мультиметр; 16 – функциональный генератор; 17 – двухлучевой (двухвходовой) осциллограф; 18 – построитель амплитудно-частотных характеристик (bode plotter); 19 – генератор цифровых слов (кодов) (word generator); 20 – логический анализатор; 21 – логический преобразователь (конвертер) (Logic converter); 22 – тумблер включения макета («ПУСК»); 23 – кнопка «ПАУЗА»

При запуске Workbench автоматически создается и открывается новый файл, который следует сохранить, используя команду *File – Save as*. Используя манипулятор «мышь», перенести необходимые элементы на рабочую область. Для этого нужно выбрать раздел на панели элементов и приборов (рис. 1.1, 1.2), в котором находится нужный элемент.

Для соединения двух выводов необходимо щелкнуть по одному из них левой кнопкой мыши и, не отпуская кнопку, довести курсор до вывода другого элемента.

Для изменения параметров (например, значения напряжения питания у источника питания или номинального значения у резистора, или количества входов у двухвходовых логических элементов) следует нажать правую кнопку мыши на компоненте, выбрать и изменить *Component properties* – свойства компонента.

Когда схема собрана следует нажать на тумблер 15 – ПУСК  – в верхнем правом углу рабочей области Workbench. Повторное нажатие приведет к остановке расчета. Следует отметить, что наличие элемента «Заземление»  в схеме является обязательным условием ее работы.

Применение соответствующих приборов позволяет выполнить необходимые измерения, расчеты и вывести результаты.

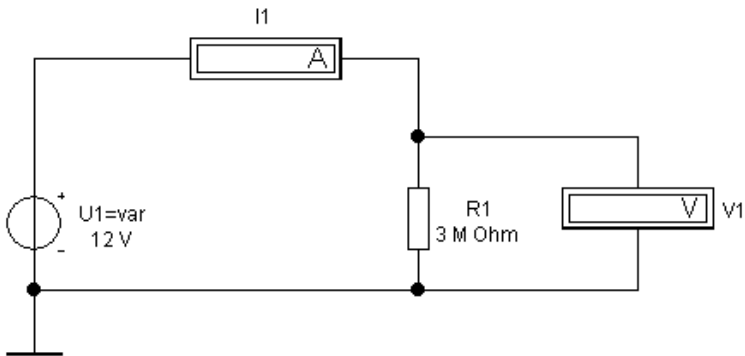
Пассивные компоненты электроники (резисторы R , конденсаторы C и катушки индуктивности L) не требуют источника энергии (источника питания) для их работы. Вольтамперная характеристика (ВАХ) – зависимость тока I , протекающего через компонент от приложенного к нему напряжения V , – является важнейшей характеристикой.

Порядок выполнения работы

1.1. Изучив компоненты и работу в Workbench, собираем принципиальную электрическую схему измерения ВАХ, например, для варианта с номером $N = 30$ ($R1 = 30 \cdot 100 = 3000 \text{ кОм} = 3 \text{ МОм}$):

Изменяя значения источника питания $U1$, измеряем значения тока I через резистор $R1$ амперметром $I1$ и напряжения V на резисторе вольтметром $V1$. Результаты заносим в таблицу, например, в программе Excel. Далее повторяем измерения для второго резистора

$R2 = 30 * 33 = 990$ (выбираем ближайшее значение по шкале промышленно выпускаемых номинальных значений $R2 = 1000 \text{ кОм} = 1 \text{ МОм}$), затем для последовательного и параллельного их соединения.



1.2. В программе Excel строим графики полученных ВАХ и анализируем их, используя известные соотношения, вытекающие из закона Ома и расчета общего значения сопротивления при различных соединениях резисторов.

1.3. Отвечаем письменно на контрольные вопросы и задания. Вопросы для самопроверки не требуют письменного ответа.

Контрольные вопросы и задания

1.1. По графическим зависимостям, используя выражение для расчета относительной погрешности рассчитать максимальную относительную погрешность при различном соединении резисторов.

1.2. Линейным или нелинейным элементом является резистор и различные соединения резисторов?

1.3. Как в среде Workbench автоматизировать процесс измерения ВАХ резисторов?

Вопросы для самопроверки

1.1. Что такое ВАХ?

1.2. Как маркируются резисторы и конденсаторы?

1.3. Как изменяется сопротивление неполупроводникового резистора при его нагревании?

1.4. Какие требования к внутреннему сопротивлению приборов должны быть при измерении токов, напряжений и сопротивлений?

Лабораторная работа № 2

ИЗМЕРЕНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цель

Освоить методику аналитического расчета и получения ВАХ полупроводниковых диодов в среде Workbench.

Задание

2.1. Для заданного в соответствии с вариантом полупроводникового диода собрать электрическую схему измерения и получить ВАХ для прямого и обратного включения диода неавтоматизированным и автоматизированным способом изменения входного напряжения.

2.2. Для прямой ветви «экспериментальной» ВАХ рассчитать средние значения теплового потенциала φ_T и обратного теплового тока I_0 диода и построить расчетную ВАХ. Результаты занести в таблицы и по этим данным построить графики «экспериментальной» и расчетной ВАХ совместно. Графики с маркерами строить в программе Excel.

2.3. Ответить письменно на контрольные вопросы и задания.

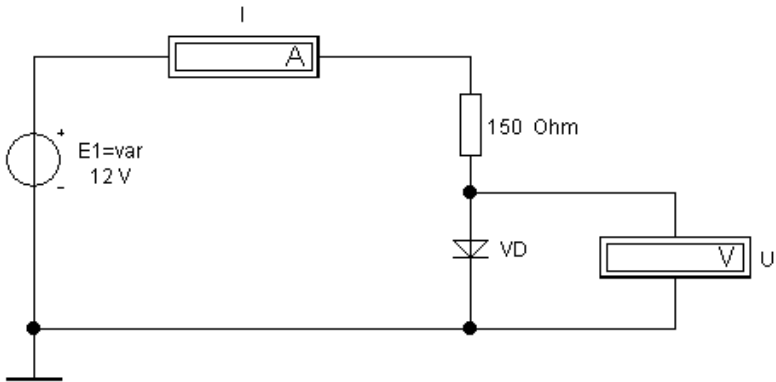
2.4. Найти погрешность построения ВАХ и сделать выводы, сравнивая результаты.

Общие сведения

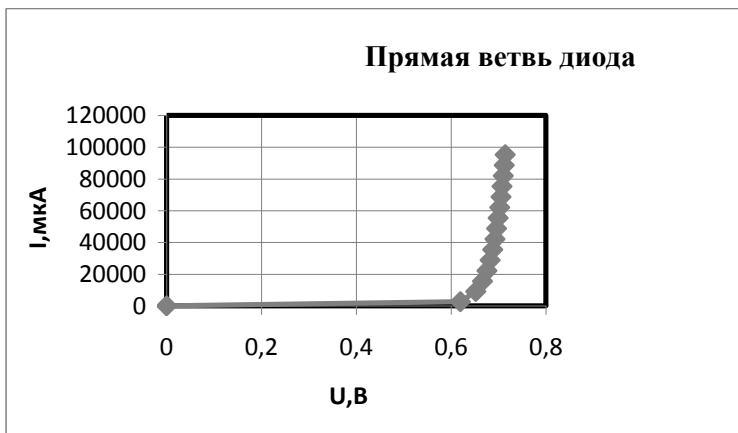
В части 1 практикума (лабораторная работа № 3 «Изучение полупроводниковых диодов») даются основные сведения по конструкции и принципу работы полупроводниковых диодов, методике экспериментального измерения и аналитического расчета ВАХ.

2.1. Для получения смоделированной в Workbench «экспериментальной» ВАХ собираем схему измерения с неавтоматизированным ручным изменением входного напряжения $E1=var$.

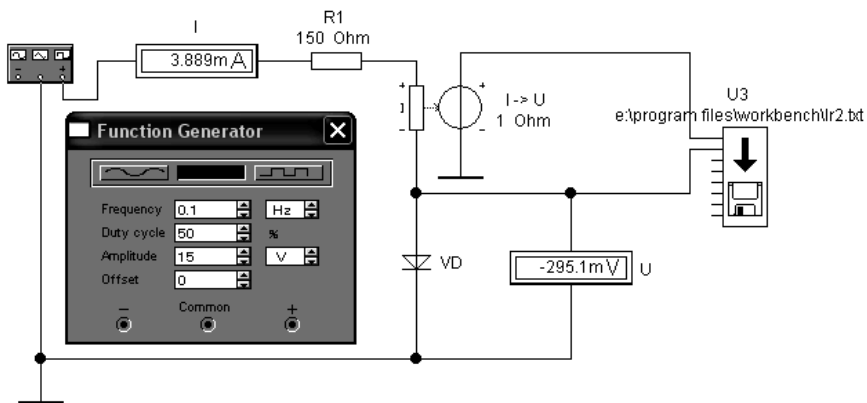
Примечание: в обозначении вольтметра U и амперметра I выделенная толстой линией сторона прямоугольника соответствует отрицательной клемме и может быть размещена как нужно вращением с помощью клавиш Ctrl+R или выбором Rotate по правой кнопке мыши.



Изменяя значения источника входного напряжения $E1$ от 0 до +15 В для прямой и от -15 В до 0 для обратной ветви, не менее чем в 8 точках для каждой, получаем значения тока I и напряжения U на диоде. Результаты заносим в таблицу, по которой строим в Excel график с маркерами для «экспериментальной» ВАХ. Для примера на рисунке показана прямая ветвь «экспериментальной» ВАХ.



Для изучения способа автоматизированного изменения входного напряжения $E1=var$ собираем следующую схему измерения «экспериментальной» ВАХ2:



Поясним новые дополнительные элементы.

Функциональный генератор Function Generator находится в меню Instruments – инструменты. Настройки параметров линейного изменения входного напряжения для снятия ВАХ производятся двойным нажатием мышки на обозначении функционального генератора и проиллюстрированы на схеме измерения (Function Generator).

Источник напряжения, управляемый током $I \rightarrow U$ (значение напряжения в вольтах численно пропорционально току в амперах), находится в меню Sources. Им измеряется ток через диод. Для записи результатов используется 8-входовое устройство записи напряжений $U3$. Предварительно это устройство настраиваем по нажатию правой кнопки мыши в Component Properties–Value–Browse: назначаем имя файла для сохранения (с расширением.TXT). В схеме измерения был выбран для примера файл e:\Program Files\Workbench\LR2.txt. После запуска и остановки тумблером ПУСК результаты сохраняются в табличном виде в файле с указанным именем в колонках время, $U1$ ($I-U$) – ток через диод, $U2$ – напряжение на диоде. Нумерация напряжений идет сверху вниз на устройстве для записи напряжений $U3$. Из указанного файла выбираем возрастающие в первом цикле значения. Эти значения либо набираем в таблице Excel, либо, что быстрее, используем конвертер форматов в Excel для преобразования формата TXT в формат Excel. По табличным значениям строим график ВАХ2 с маркерами в Excel.

2.2. Расчетная ВАХ диода описывается следующим выражением:

$$I = I_0 (e^{U/\Phi_T} - 1), \quad (2.1)$$

где I , U – ток и напряжение на диоде;

I_0 – обратный (тепловой) ток через диод;

Φ_T – тепловой потенциал.

Из линеаризованного выражения (2.1) получаем уравнение для расчета I_0 и Φ_T :

$$\Phi_T \approx (U_2 - U_1) / (\ln I_2 - \ln I_1); \quad (2.2)$$

$$I_0 \approx I_2 \cdot e^{-U_2/\Phi_T}; \quad (2.3)$$

$$\Phi_{TCP} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \Phi_{Ti}; \quad I_{0CP} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n I_{0i}, \quad (2.4)$$

где I_1 , U_1 , I_2 , U_2 – первая и вторая произвольные точки на ВАХ соответственно;

n – количество точек для усреднения.

Результаты заносим в таблицу.

| № п/п | I_1 | U_1 | I_2 | U_2 | Φ_T | I_0 | Φ_{TCP} | I_{0CP} |
|----------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|--------------|-----------|
| | мА | В | мА | В | В | мА | | |
| 1 | | | | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |

Подставляя вычисленные средние значения теплового потенциала Φ_{TCP} и тока I_{0CP} в выражение (2.1) для ВАХ, изменяем произ-

вольное значение напряжения U на диоде, полученные значения I и соответствующее U диода заносим в таблицу

| № п/п | U , мВ | I , мА |
|-------|----------|----------|
| 1 | -800 | ... |
| 2 | -700 | ... |
| 3 | -600 | ... |
| ... | ... | ... |
| 17 | +800 | ... |

По указанной таблице строим график расчетной ВАХ. Наносим его на график экспериментальной ВАХ, выделив для отличия формой или цветом линии.

2.3. Отвечаем письменно на контрольные вопросы и задания. На вопросы для самопроверки можно письменно не отвечать.

2.4. Погрешность оцениваем аналогично тому, как делалось в лабораторной работе № 1.

Содержание отчета

В отчете приводятся принципиальные схемы для снятия ВАХ, таблицы и графики выполнения указанных выше этапов задания, даются письменные ответы на контрольные вопросы и задания. Рекомендуется в отчете приводить рекомендации по выполнению наиболее сложных этапов работы.

Контрольные вопросы и задания

2.1. По ВАХ построить зависимость статического внутреннего сопротивления R_d измеренного диода от напряжения U_d на диоде:

$$R_d = U_d / I_d. \text{ Линейно или нелинейно } R_d?$$

2.2. Изобразить и подписать ВАХ германиевого и кремниевого диодов и стабилитрона.

2.3. Привести пример схемы устройства с использованием полупроводникового диода.

Вопросы для самопроверки

2.1. Что такое полупроводниковый диод, как он устроен?

- 2.2. Что такое точечные и плоскостные конструкции полупроводниковых диодов?
- 2.3. Что называется прямой и обратной ВАХ диода?
- 2.4. Чем отличается реальная ВАХ от идеальной ВАХ диода?
- 2.5. Как изменяется сопротивление полупроводниковых диодов при нагревании?
- 2.6. Как изменяется ВАХ при параллельном и последовательном соединении диода?
- 2.7. На какой ветви стабилитрон используют для стабилизации напряжения?

Литература

- 2.1. Карлашук, В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB / В.И. Карлашук. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 800 с.
- 2.2. http://window.edu.ru/window_catalog/pdf2txt?p_id=12066&page=4 – сборник лабораторных работ, выполняемых с использованием программы Electronics Workbench. – Таганрог: ТРТУ, 2003. – 37 с.
- 2.3. <http://www.ict.edu.ru/ft/004289/virtpr.pdf> – виртуальный физический практикум.

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ

Цель

Исследовать параметры компенсационных стабилизаторов напряжения в среде Workbench, освоить пополнение библиотеки Workbench, создавая модели элементов.

Задание

3.1. Изучить принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения и собрать принципиальную схему стабилизатора в Workbench.

3.2. Рассчитать номинальные значения используемых элементов для заданных по варианту компонентов и характеристик стабилизатора.

3.3. Создать модели заданных по варианту транзисторов и стабилитрона.

3.4. Построить график зависимости выходного $U_{\text{вых}}$ от входного $U_{\text{вх}}$ напряжения.

3.5. Определить коэффициент стабилизации $K_{\text{ст}U}$.

3.6. Построить график зависимости выходного напряжения от сопротивления нагрузки $R_{\text{н}}$.

3.7. Оформить отчет, куда включить исследуемую схему, таблицы и графики.

3.8. Сделать выводы.

Общие сведения и порядок выполнения работы

3.1. В [3.1] приводится методика экспериментального исследования компенсационного стабилизатора. Принципиальная схема показана на рис. 3.1.

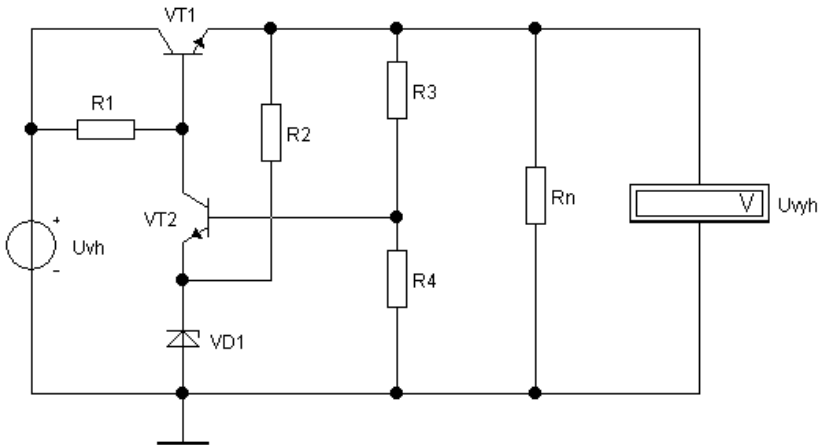


Рис. 3.1. Принципиальная схема компенсационного стабилизатора

3.2. Выполняем предварительный расчет значений резисторов:

$$R1 = (U_{vh} - U_{БЭ VT1} - U_{vyh}) \cdot 2 \cdot \beta_{VT1} / I_H, \text{ Ом},$$

где $U_{БЭ VT1} = 0,7, \text{ В}$,

$$I_H = U_{vyh} / Rn, \text{ А}.$$

$$R2 = 2 \cdot (U_{vyh} - U_{ст}) / I_{стmax}, \text{ Ом}.$$

$$R3 = (U_{vyh} - U_{ст} - U_{БЭ VT2}) / 0,01, \text{ Ом},$$

$$R4 = (U_{ст} + U_{БЭ VT2}) / 0,01, \text{ Ом},$$

где $U_{БЭ VT2} = 0,7 \text{ В}$.

3.3. Создаем в соответствии с вариантом задания модели транзисторов по табл. 3.1.

Для этого нужно щелкнуть два раза кнопкой мыши на изображении транзистора и выбрать в появившемся окне NPN Transistor Properties в разделе Library библиотеку default, а затем в разделе Model – тип транзистора ideal. Выбрать последовательно кнопкой мыши кнопки Copy и Paste, записать латинскими буквами в по-

явившемся окне тип транзистора в соответствии с вариантом задания и нажать кнопку **ОК**. В результате в разделе Model добавится новый тип транзистора. Для корректировки его параметров нажать кнопку Edit и установить значения параметров Forward current gain coefficient [BF] (коэффициент усиления β), Base ohmic resistance [RB] (сопротивление базы R_6), Emitter ohmic resistance [RE] (сопротивление эмиттера R_3), Collector ohmic resistance [RC] (сопротивление коллектора R_k) в соответствии с табл. 3.1. Значения других параметров оставить без изменения.

Таблица 3.1

| № варианта | Обозначение транзистора | Тип транзистора | β (BF) | R_6 , Ом (RB) | R_3 , Ом (RE) | R_k , Ом (RC) |
|------------|-------------------------|-----------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | VT1 | КТ815А | 40 | 2,1 | 0,9 | 0,4 |
| | VT2 | КТ315Б | 60 | 5 | 2 | 1 |
| 2 | VT1 | КТ815Б | 40 | 2 | 0,9 | 0,4 |
| | VT2 | КТ3102Ж | 100 | 3 | 1 | 0,6 |
| 3 | VT1 | КТ815В | 40 | 2 | 0,9 | 0,4 |
| | VT2 | КТ315Г | 60 | 5 | 2 | 1 |
| 4 | VT1 | КТ815Г | 30 | 2,1 | 0,9 | 0,4 |
| | VT2 | КТ3102А | 100 | 3 | 1 | 0,6 |
| 5 | VT1 | КТ817А | 25 | 1,5 | 0,7 | 0,3 |
| | VT2 | КТ3102Д | 200 | 3 | 1 | 0,6 |
| 6 | VT1 | КТ817Б | 25 | 1,5 | 0,7 | 0,3 |
| | VT2 | КТ315Е | 50 | 5 | 2 | 1 |
| 7 | VT1 | КТ817В | 25 | 1,5 | 0,7 | 0,3 |
| | VT2 | КТ3102А | 100 | 3 | 1 | 0,6 |
| 8 | VT1 | КТ817Г | 25 | 1,5 | 0,7 | 0,3 |
| | VT2 | КТ503Б | 80 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 9 | VT1 | КТ831А | 25 | 1,8 | 0,6 | 0,3 |
| | VT2 | КТ3102В | 200 | 3 | 1 | 0,6 |
| 10 | VT1 | КТ831Б | 25 | 1,5 | 0,7 | 0,3 |
| | VT2 | КТ503Г | 80 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 11 | VT1 | КТ698А | 20 | 1 | 0,5 | 0,2 |
| | VT2 | КТ503Д | 40 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 12 | VT1 | КТ698Б | 30 | 1 | 0,5 | 0,2 |
| | VT2 | КТ503Е | 40 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 813 | VT1 | КТ698В | 50 | 1 | 0,5 | 0,2 |
| | VT2 | КТ3102А | 100 | 3 | 1 | 0,6 |

Окончание табл. 3.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-----|---------|-----|-----|-----|-----|
| 14 | VT1 | КТ698Г | 50 | 1 | 0,5 | 0,2 |
| | VT2 | КТ3102Б | 200 | 3 | 1 | 0,6 |
| 15 | VT1 | КТ6117А | 80 | 1,9 | 0,8 | 0,5 |
| | VT2 | КТ3102В | 200 | 3 | 1 | 0,6 |
| 16 | VT1 | КТ6114А | 80 | 1,5 | 0,8 | 0,4 |
| | VT2 | КТ503Б | 80 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 17 | VT1 | КТ6110В | 70 | 1,8 | 0,9 | 0,5 |
| | VT2 | КТ3102А | 100 | 3 | 1 | 0,6 |
| 18 | VT1 | КТ639А | 40 | 2,4 | 1,5 | 0,7 |
| | VT2 | КТ3102В | 200 | 3 | 1 | 0,6 |
| 19 | VT1 | КТ815Б | 40 | 2 | 0,9 | 0,4 |
| | VT2 | КТ503Г | 80 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 20 | VT1 | КТ6117А | 80 | 1,5 | 0,7 | 0,3 |
| | VT2 | КТ315А | 30 | 5 | 2 | 1 |
| 21 | VT1 | КТ6117А | 80 | 1,9 | 0,8 | 0,5 |
| | VT2 | КТ503Б | 80 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 22 | VT1 | КТ639А | 40 | 2,4 | 1,5 | 0,7 |
| | VT2 | КТ315А | 30 | 5 | 2 | 1 |
| 23 | VT1 | КТ6110В | 70 | 1,8 | 0,9 | 0,5 |
| | VT2 | КТ503Е | 40 | 2,5 | 1,2 | 0,5 |
| 24 | VT1 | КТ698Б | 30 | 1 | 0,5 | 0,2 |
| | VT2 | КТ3102В | 200 | 3 | 1 | 0,6 |

Создаем в соответствии с вариантом задания модель стабилитрона по табл. 3.2. Для этого нужно щелкнуть два раза кнопкой мыши на изображении стабилитрона и выбрать в появившемся окне Zener Diode Properties в разделе Library библиотеку default, а затем в разделе Model – тип стабилитрона ideal. Выбрать последовательно кнопкой мыши кнопки Copy и Paste, записать латинскими буквами в появившемся окне тип стабилитрона в соответствии с вариантом задания и нажать кнопку ОК. В результате в разделе Model добавится новый тип стабилитрона. Для корректировки его параметров нажать кнопку Edit и установить значения параметров Zener test voltage at $|ZT|$ [VZT] (напряжение стабилизации $U_{ст}$), Zener test current [I_ZT] (максимальный ток стабилизации $I_{ст\ max}$), Ohmic resistance [RS] (дифференциальное сопротивление R_d) в соответствии с табл. 3.2. Значения других параметров оставить без изменения.

Таблица 3.2

| № в а р и а н т а | Тип стабилитрона | $U_{ст}$, В (VZT) | $I_{ст\ max}$, А (IZT) | $R_{д}$, Ом (RS) |
|----------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------|
| 1 | КС133А | 3,3 | 0,081 | 65 |
| 2 | КС139А | 3,9 | 0,07 | 60 |
| 3 | КС147А | 4,7 | 0,058 | 52 |
| 4 | КС156А | 5,6 | 0,055 | 46 |
| 5 | КС162А | 6,2 | 0,022 | 35 |
| 6 | КС168А | 6,8 | 0,02 | 28 |
| 7 | КС170А | 7,0 | 0,018 | 20 |
| 8 | КС175А | 7,5 | 0,018 | 16 |
| 9 | КС182А | 8,2 | 0,017 | 14 |
| 10 | КС191А | 9,1 | 0,015 | 18 |
| 11 | КС210Б | 10,0 | 0,014 | 22 |
| 12 | КС211И | 11,0 | 0,013 | 23 |
| 13 | КС212В | 12,0 | 0,012 | 24 |
| 14 | КС213Б | 13,0 | 0,01 | 25 |
| 15 | КС215Ж | 15,0 | 0,01 | 60 |
| 16 | КС216Ж | 16,0 | 0,0094 | 60 |
| 17 | КС218Ж | 18,0 | 0,0083 | 60 |
| 18 | КС220Ж | 20,0 | 0,0075 | 60 |
| 19 | КС222Ж | 22,0 | 0,0068 | 60 |
| 20 | КС224Ж | 24,0 | 0,0062 | 60 |
| 21 | КС210Б | 10,0 | 0,014 | 22 |
| 22 | КС211И | 11,0 | 0,013 | 23 |
| 23 | КС212В | 12,0 | 0,012 | 24 |
| 24 | КС213Б | 13,0 | 0,01 | 25 |

3.4. Устанавливаем в соответствии с вариантом напряжение на входе стабилизатора (U_{vh}) и сопротивление нагрузки (R_n) по табл. 3.3.

Таблица 3.3

| № в а р и а н т а | $U_{вх}$ (U_{vh}), В | $U_{вых}$ (U_{vyh}), В | R_n (R_n), Ом |
|----------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 15 | 8 | 130 |
| 2 | 15 | 9 | 150 |
| 3 | 16 | 10 | 160 |
| 4 | 16 | 11 | 180 |

Окончание табл. 3.3

| | | | |
|----|----|----|-----|
| 1 | | | 4 |
| 5 | 18 | 12 | 200 |
| 6 | 18 | 13 | 220 |
| 7 | 20 | 14 | 240 |
| 8 | 22 | 15 | 270 |
| 9 | 22 | 16 | 300 |
| 10 | 24 | 17 | 330 |
| 11 | 27 | 18 | 360 |
| 12 | 27 | 20 | 390 |
| 13 | 30 | 22 | 430 |
| 14 | 30 | 24 | 470 |
| 15 | 33 | 26 | 510 |
| 16 | 33 | 27 | 560 |
| 17 | 36 | 30 | 620 |
| 18 | 38 | 32 | 680 |
| 19 | 40 | 34 | 750 |
| 20 | 42 | 36 | 820 |
| 21 | 20 | 14 | 240 |
| 22 | 22 | 14 | 270 |
| 23 | 22 | 16 | 300 |
| 24 | 24 | 17 | 330 |

Устанавливаем значения резисторов R1–R4 в соответствии с предварительным расчетом.

Экспериментально уточняем значение сопротивления резистора R3, при котором значение выходного напряжения стабилизатора U_{vyh} будет соответствовать табл. 3.3.

Изменяя значения входного напряжения U_{vh} , измеряем выходное U_{vyh} напряжение, заносим в таблицу и строим график зависимости U_{vyh} от U_{vh} .

3.5. Для исследования коэффициента стабилизации компенсационного стабилизатора напряжения величину входного напряжения U_{vh} изменяем в диапазоне от 0,9 до 1,3 исходного значения U_{vh} из табл. 3.3, рассчитываем коэффициент стабилизации $K_{стU}$. Результаты заносим в таблицу. Строим график зависимости $K_{стU}$ от U_{vh} . Определяем среднее значение коэффициента стабилизации $K_{стU}$.

3.6. Для исследования нагрузочной характеристики стабилизатора значение сопротивления нагрузки R_n последовательно задаем

равным $0,4R_n, 0,6R_n, 0,8R_n, R_n, 1,2R_n, 1,4R_n, 1,6R_n, 2R_n$. Измеряем соответствующие U_{yh} , результаты заносим в таблицу и строим график зависимости выходного напряжения U_{yh} от сопротивления нагрузки R_n .

Методические пояснения

Стабилизация среднего значения выходной электрической величины осуществляется с помощью дополнительного звена, коэффициент передачи которого по постоянной составляющей изменяется таким образом, чтобы уменьшить или полностью исключить отклонение выходной электрической величины от заданного значения. Звено, выполняющее данную функцию, называется *стабилизатором*. Существующие стабилизаторы непрерывного типа могут быть разделены на два класса: *параметрические и компенсационные*.

Параметрический стабилизатор обеспечивает поддержание выходного напряжения за счет собственной нелинейности используемого полупроводникового элемента.

Компенсационный стабилизатор является замкнутой системой автоматического регулирования (САР), в которой коэффициент передачи звена, включенного в цепь передачи электрической величины, зависит от разности входного и некоторого эталонного сигнала. Это типичный пример устройства, содержащего цепь обратной отрицательной связи (ООС).

В зависимости от стабилизируемой электрической величины различают стабилизаторы напряжения, тока или мощности.

Изменение коэффициента передачи стабилизатора в зависимости от изменения электрической величины в нагрузке происходит за счет включения в него одного или нескольких элементов с регулируемым коэффициентом передачи.

По способу управления стабилизаторы делятся на *непрерывные и ключевые*. Стабилизаторы непрерывного типа используют активный режим работы биполярного или полевого транзистора, в то время как стабилизаторы импульсного или релейного типов — ключевой режим работы полупроводниковых приборов.

Основным параметром стабилизатора, характеризующим стабильность среднего значения его выходной электрической величины, является коэффициент стабилизации

$$K_{стU} = (\Delta U_{вх} / U_{вх ном}) / (\Delta U_{вых} / U_{вых ном}).$$

В зависимости от стабилизируемой электрической величины различают коэффициенты стабилизации по напряжению $K_{стU}$, току $K_{стI}$ или мощности $K_{стP}$.

Структурная схема компенсационного стабилизатора приведена на рис. 3.2.

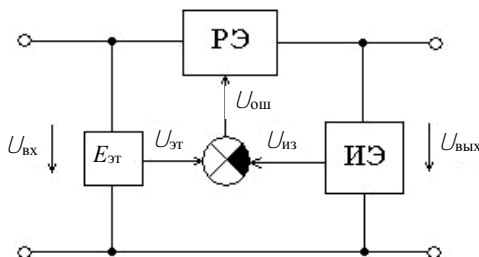


Рис. 3.2. Структурная схема стабилизатора

Принцип работы компенсационного стабилизатора основан на использовании цепи ООС. Для реализации указанного принципа устройство кроме регулирующего (исполнительного) элемента (РЭ) должно содержать измерительный элемент (ИЭ), элемент сравнения и источник эталонного напряжения $U_{эт}$. Выходное напряжение измерительного элемента, пропорциональное стабилизируемому параметру, сравнивается в элементе сравнения с эталонным напряжением, и полученный сигнал ошибки

$$U_{ош} = U_{эт} - U_{из}$$

управляет коэффициентом передачи РЭ. Увеличение $U_{ош}$, вызванное уменьшением выходного параметра, увеличив коэффициент передачи РЭ, что ведет к восстановлению исходного значения выходного напряжения. И наоборот, увеличение выходного напряжения, уменьшая сигнал ошибки, уменьшает коэффициент передачи РЭ. Если выходное напряжение ИЭ пропорционально выходному напряжению устройства, то реализуется режим стабилизации напряжения (соответственно при измерении тока или выходной мощности можно получить стабилизаторы тока и мощности).

Параметрический стабилизатор напряжения использован в схеме на рис. 3.1 в качестве источника опорного напряжения ($R2$, $VD1$). Выходным напряжением источника опорного напряжения является падение напряжения на стабилитроне $VD1$. Стабилитрон работает в режиме обратимого обратного пробоя при токе, ограниченном резистором $R2$. Стабилитроны выпускаются на очень широкий диапазон стабилизируемых напряжений (от 3,3 до 200 В) и допускаемых токов (от 5 мА до сотен мА).

Контрольные вопросы и задания

3.1. Приведите схему параметрического стабилизатора напряжения и поясните принцип работы.

3.2. Поясните принцип работы и назначение элементов компенсационного стабилизатора напряжения по схеме рис. 3.1.

3.3. Для чего используют последовательное и параллельное соединение стабилитронов?

Вопросы для самопроверки

3.1. Поясните с каким значением динамического сопротивления (высоким или низким) лучше использовать стабилитрон для стабилизации напряжения?

3.2. Какой марки стабилитрон имеет наилучшее значение динамического сопротивления для использования в стабилизаторах?

3.3. Приведите формулу для расчета коэффициента стабилизации.

3.4. Укажите факторы, вызывающие изменение выходного напряжения стабилизатора.

3.5. Как изменяются характеристики полупроводниковых стабилитронов при их нагревании?

3.6. Укажите маркировку отечественных стабилитронов.

3.7. Как изменяется ВАХ стабилитронов при их параллельном и последовательном соединении?

Дополнительная литература

3.1. http://window.edu.ru/window_catalog/pdf2txt?p_id=26373 – моделирование электронных устройств в системе Electronics Workbench: методические указания к лабораторным работам по курсу «Электроника». – Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета, 2006. – 111 с.

Лабораторная работа № 4

RC-ГЕНЕРАТОРЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Цель

Изучить принципы работы операционных усилителей и создания на их базе гармонических и негармонических RC-генераторов.

Задание

4.1. Составить схему инвертирующего масштабирующего усилителя на базе ОУ с коэффициентом передачи по напряжению

$$K_u = \langle \text{номер варианта} \rangle \times 10.$$

В Workbench определить коэффициент передачи K_u , сравнить его с расчетным значением. Построить амплитудную характеристику – зависимость выходной амплитуды $A_{\text{вых}}$ сигнала от входной $A_{\text{вх}}$.

4.2. Собрать схему гармонического генератора на ОУ: для варианта с нечетным номером генератора – с фазосдвигающей CR-цепочкой, а для варианта с четным номером – с мостом Вина. Обеспечить квазирезонансную частоту

$$F_K = \langle \text{номер варианта} \rangle \times 10 + 100, \text{ Гц.}$$

Определить погрешность (в процентах) по отношению к расчетному значению.

4.3. Собрать схему негармонического генератора – мультивибратора на ОУ. Обеспечить изменением параметров компонентов генератора в Workbench заданную частоту генерации

$$F = \langle \text{номер варианта} \rangle \times 10 + 100, \text{ Гц.}$$

4.4. В отчете привести принципиальные схемы, расчеты и осциллограммы генерируемых сигналов.

4.5. Сделать выводы.

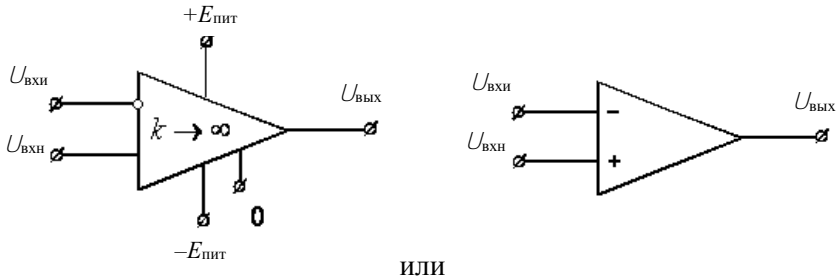
Общие сведения и порядок выполнения работы

4.1. В части 1 практикума [4.1] в лабораторной работе №6 «Изучение схем на операционном усилителе» описаны общие сведения об

операционных усилителях (ОУ), принципах их работы и использования в электронной автоматике. Использование программы Workbench позволяет ускорить исследование различных устройств с ОУ.

Термин *операционный усилитель* (ОУ) относится к усилителям постоянного тока с большим коэффициентом усиления ($K \rightarrow \infty$), имеющим дифференциальный вход (для введения обратной связи) и один общий выход. Название этих усилителей связано с первоначальным их применением главным образом для выполнения различных операций над аналоговыми величинами (сложение, вычитание, интегрирование и др.). В настоящее время операционные усилители играют роль многоцелевых элементов при построении аппаратуры самого различного назначения. Они применяются в усилительной технике, устройствах генерации сигналов синусоидальной и импульсной форм, в стабилизаторах, активных фильтрах и т.д.

Условное обозначение ОУ в отечественном стандарте – в виде прямоугольника, а в Workbench – в виде треугольника (цепи питания для простоты не показывают):

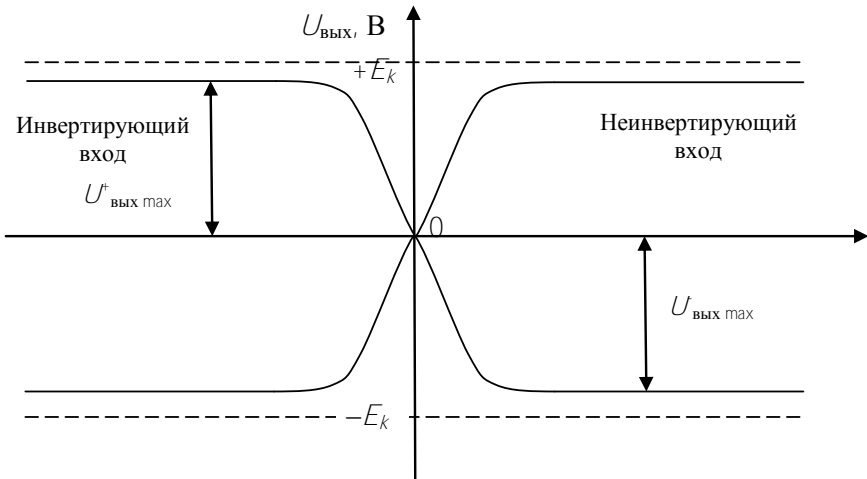


Изготавливаются ОУ, как правило, в интегральном исполнении. Принцип работы основан на следующем соотношении:

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \cdot (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}).$$

Один из входов усилителя ($U_{\text{ВХ1}}$, «+») называется *неинвертирующим*, а второй ($U_{\text{ВХ2}}$, «-») – *инвертирующим*. При подаче сигнала на неинвертирующий вход приращение выходного сигнала совпадает по знаку с приращением входного сигнала. Если же сигнал подан на инвертирующий вход, то приращение выходного сигнала

имеет обратный знак по сравнению с приращением входного сигнала. Инвертирующий вход часто используют для введения в операционный усилитель внешних отрицательных обратных связей.



Важнейшими характеристиками ОУ являются его *амплитудные характеристики*. Их представляют в виде двух кривых, относящихся соответственно к инвертирующему и неинвертирующему входам. Характеристики снимают при подаче сигнала на один из входов при нулевом сигнале на другом. Горизонтальные участки кривых соответствуют режиму полностью открытого либо закрытого транзистора выходного каскада. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках выходное напряжение усилителя остается без изменения и определяется напряжениями $U_{\text{вых max}}^+$, $U_{\text{вых max}}$, близкими к напряжению E_k источников питания.

Наклонному участку кривых соответствует пропорциональная зависимость выходного напряжения от входного. Угол наклона участка определяется *коэффициентом усиления* $K_U = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}}$ операционного усилителя. Значение $K_{\text{ОУ}}$ зависит от типа ОУ и может составлять от нескольких сотен до тысяч и более. Большие значения $K_{\text{ОУ}}$ позволяют при охвате таких усилителей глубокой отрицательной обратной связью получать схемы со свойствами, которые зависят только от параметров цепи отрицательной обратной связи.

Основные параметры и характеристики усилителей.

Коэффициенты усиления по напряжению, току, мощности соответственно:

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}} \quad K_P = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = K_I \cdot K_U.$$

Для удобства вводят представление в децибелах: $K_P = 10 \lg K_P$, $K_{I,U} = 20 \lg K_I \cdot K_U$.

$$\text{Выходная мощность усилителя } P_{\text{ВЫХ}} = \frac{U^2_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{Н}}}.$$

КПД усилителя

$$\eta = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{Общ}}} \cdot 100\%.$$

Частотная характеристика – зависимость какого-либо параметра от частоты. Полоса пропускания Δf – ширина диапазона частот, где коэффициент усиления больше определенного значения, обычно больше 0,7 от максимального значения.

Коэффициент нелинейных искажений отношение – коэффициента усиления на данной частоте к коэффициенту усиления на средней частоте.

Амплитудная характеристика – это зависимость амплитуды выходного сигнала $A_{\text{ВЫХ}}$ от входного $A_{\text{ВХ}}$.

Для выполнения задания на рис. 4.1 показаны принципиальные схемы с неавтоматизированным и автоматизированным изменением входного напряжения.

Величину сопротивлений R_0 и R_1 выбираем произвольно в диапазоне 1 кОм–10 МОм так, чтобы обеспечить требуемый по варианту коэффициент усиления $K_U = R_0 / R_1$.

Изменяя входное напряжение $A_{\text{ВХ}}$, измеряем выходное $A_{\text{ВЫХ}}$, заносим в таблицу и строим амплитудную характеристику – графическую зависимость $A_{\text{ВЫХ}}$ от $A_{\text{ВХ}}$.

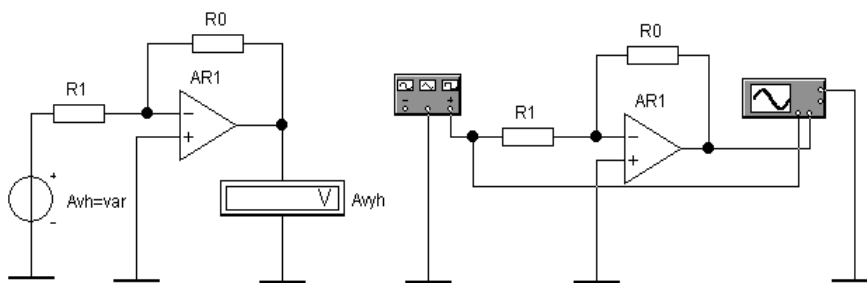


Рис. 4.1. Схемы измерения характеристик масштабирующего усилителя на ОУ

Рассчитываем коэффициенты передачи по напряжению K_u для каждой точки измерения и находим среднее значение $K_{u\text{ ср}}$.

4.2. Если на ОУ по рис. 4.1 подать обратную положительную связь и выполнить условия генерации [4.2] только для одной частоты, получим гармонический (синусоидальный) генератор. Значит, генераторы гармонических сигналов должны содержать частотно-зависимые элементы. В диапазоне высоких частот такими частотно-зависимыми элементами являются LC-контур. В диапазоне низких частот величины и габариты LC-элементов становятся слишком большими и используют RC-элементы. Поэтому низкочастотные гармонические генераторы в основном являются RC-генераторами.

Если условия генерации выполняются для некоторого диапазона частот, форма колебаний будет отличаться от синусоидальной, приближаясь к прямоугольной. При выполнении условий генерации для всего спектра частот (от 0 до ∞) получим генератор прямоугольных колебаний – мультивибратор.

Собираем схему генератора с фазосдвигающей CR-цепочкой. (Запуск по нажатию переключателя – клавишей «Пробел».)

Расчетные соотношения [4.5]:

Для генерации коэффициент усиления должен иметь значение $K_u = 29$.

Частота генерируемого сигнала $f = 1/(2\pi\sqrt{6} \cdot R \cdot C)$.

Связь частоты с периодом $f = 1/(2 \cdot \pi \cdot T)$.

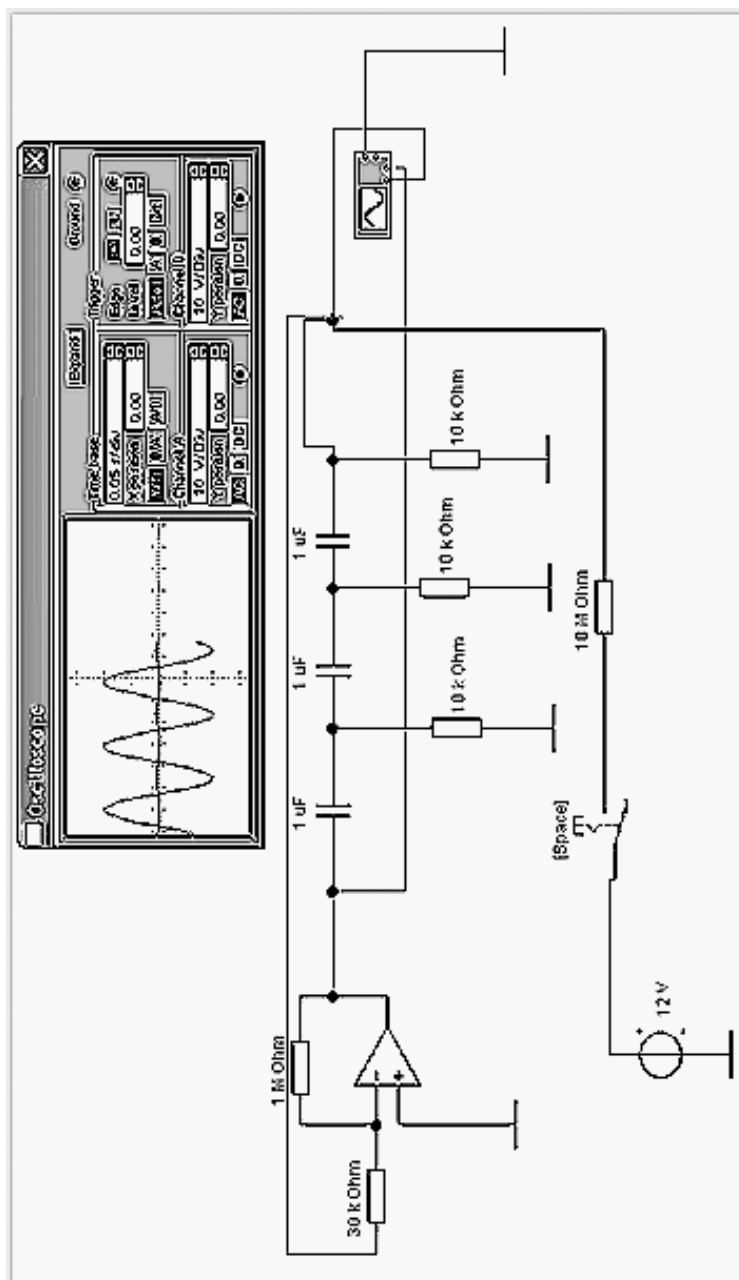
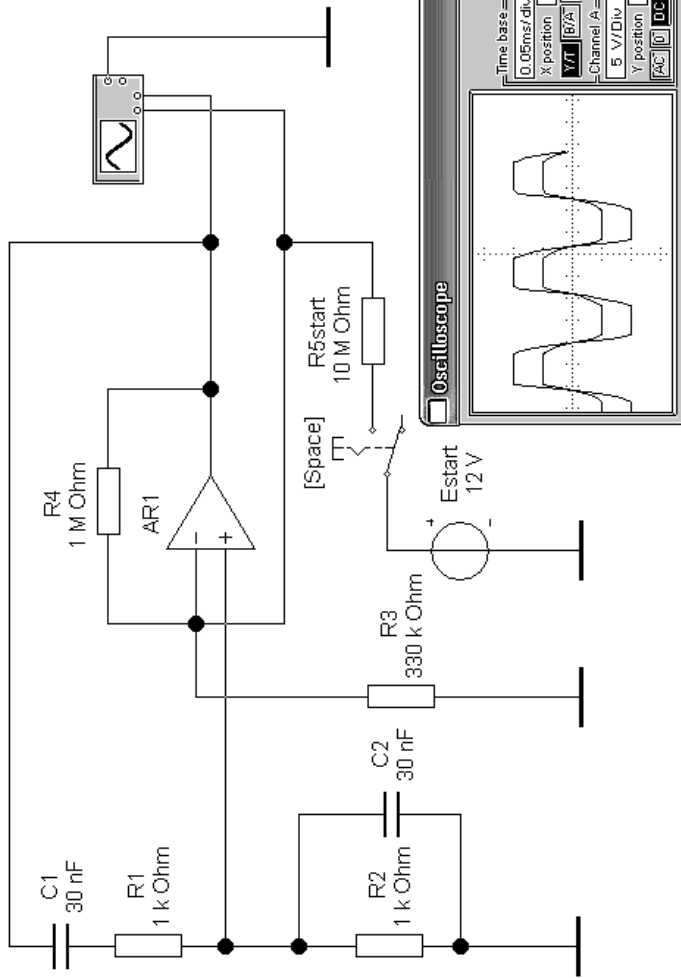


Схема генератора с мостом Вина:



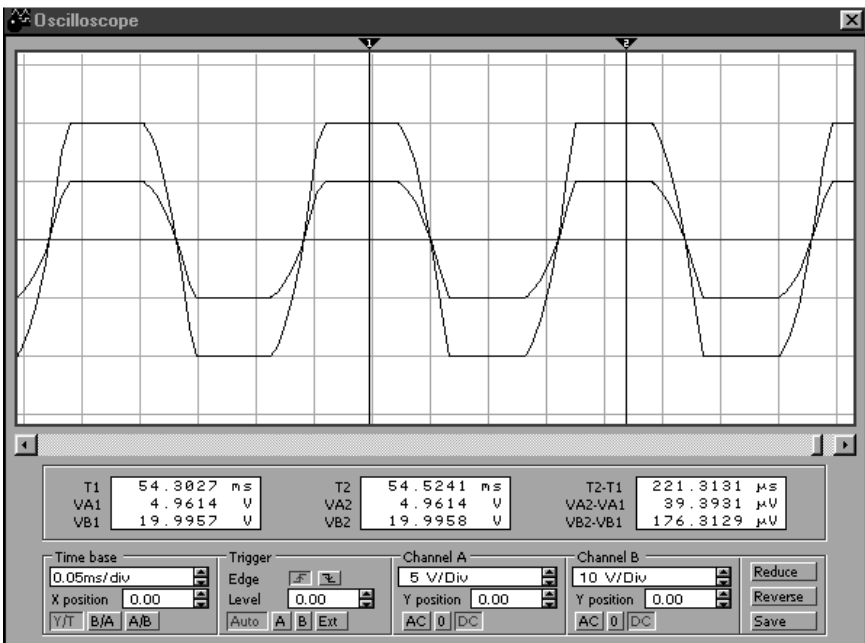
Расчетные соотношения:

Для генерации коэффициент усиления должен иметь значение:
 $K_u = 3$.

Частота генерируемого сигнала $f = 1/(2\pi\sqrt{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2})$.

Связь частоты с периодом $f = 1/(2 \cdot \pi \cdot T)$.

Запустив схему, нужно получить и отрегулировать изображение на экране осциллографа (особенности работы пояснены в прил. 1). Затем, перемещая маркеры в желаемую позицию, снять конкретные значения напряжений входного А и выходного В сигналов (окна под экраном показывают время и изменение сигнала в позициях первого и второго маркеров, а также разницу между этими точками). Определив период T для одного колебания, рассчитывают частоту f колебаний.



4.3. Для изучения RC-генераторов негармонических сигналов собираем схему мультивибратора на ОУ [4.3] (рис. 4.2)

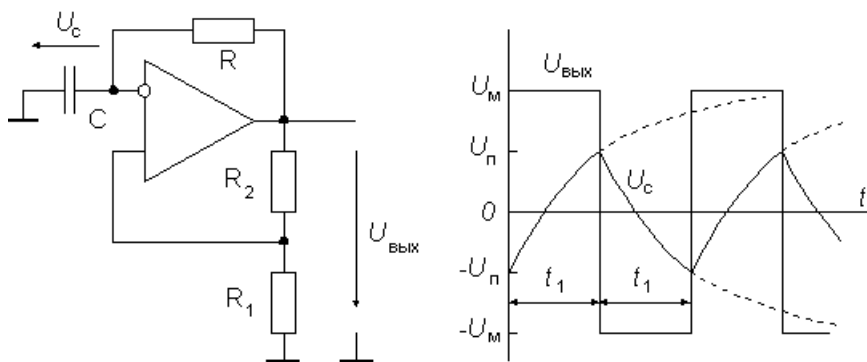


Рис. 4.2. Схема мультивибратора (а) и временная диаграмма его работы (б)

Когда напряжение U_C достигает порога срабатывания, так называемого триггера Шмитта на ОУ, схема переключается и ее выходное напряжение скачком принимает противоположное значение. При этом конденсатор C начинает перезаряжаться в противоположном направлении, пока его напряжение не достигнет другого порога срабатывания. Схема переключается в первоначальное состояние (рис. 4.2, б).

Период колебаний мультивибратора равен

$$T = 2t_1 = 2RC \ln[1 + 2R_1/R_2].$$

Как видно из последней формулы, период колебаний мультивибратора не зависит от напряжения U_M , которое, в свою очередь, определяется напряжением питания $U_{пит}$. Поэтому частота колебаний мультивибратора на ОУ мало зависит от питающего напряжения.

Собрав схему в Workbench, нужно, изменяя значения компонентов из последнего выражения, обеспечить колебания с требуемой частотой $f = 1 / T$.

Контрольные вопросы и задания

4.1. Что такое условия генерации? Запишите условия генерации в виде математических выражений.

4.2. Какие элементы используют для генераторов гармонических колебаний низких, высоких и сверхвысоких частот?

4.3. Для чего используют тумблер «Старт» в гармонических генераторах?

Вопросы для самопроверки

4.1. Укажите маркировку отечественных операционных усилителей.

4.2. Как улучшить форму гармонического сигнала, приблизив ее к синусоидальной?

4.3. Какой параметр усилителя характеризует «синусоидальность» сигнала?

4.4. Какое отклонение от чистой синусоидальной формы генератора звуковых частот заметно на слух?

Литература

4.1. Электронная автоматика и техника: лабораторные работы (практикум): в 2 ч. – Минск: БНТУ, 2004. – 60 с.

4.2. Основы промышленной электроники / под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1986.

4.3. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_14_1_1.htm – автоколебательный мультивибратор на ОУ.

4.4. http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/doc/op/funop_14_2_2.htm – RC-генераторы на ОУ.

4.5. http://ru.wikipedia.org/wiki/Фазосдвигающий_генератор – фазосдвигающий генератор. Материал из Википедии – свободной энциклопедии.

Лабораторная работа № 5

МИНИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

Цель

Изучить работу и принципы минимизации цифровых логических устройств аналитическим способом и с помощью компьютерного программного моделирования.

Задание

Необходимо минимизировать логическую функцию по заданному варианту аналитически и с помощью Workbench. Номер варианта для заочной формы обучения определяется как остаток от целочисленного деления числа, состоящего из двух последних цифр зачетной книжки, на 20. Например, для номера зачетной книжки, заканчивающегося на 21, получим вариант 1, а для 53 – 13, для 20 – 0, для 80 – 0.

5.1. Аналитическая минимизация использует аксиомы и тождества алгебры логики и включает следующие этапы работы:

5.1.1. Составить принципиальную схему для реализации исходной логической функции на логических элементах в любом из двух базисов (на элементах И, ИЛИ, НЕ или И–НЕ, ИЛИ–НЕ) и соответствующую исходную таблицу истинности.

5.1.2. Упростить (минимизировать) исходную логическую функцию.

5.1.3. Составить принципиальную схему и таблицу истинности для упрощенной (минимизированной) логической функции.

5.1.4. Провести минимизацию на другом минимально-полном наборе элементов.

5.2. Компьютерная минимизация выполняется в среде Workbench и включает этапы, аналогичные этапам раздела 5.1.

5.3. Сопоставить полученные результаты и результаты расчетов, выполненных аналитическим и компьютерным способами, и сделать выводы.

Варианты заданий

$$0. F = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} + x_1 \cdot \overline{x_2} + x_1 + x_1 \cdot x_2 + x_3$$

1. $F = \overline{x_1} \cdot (\overline{x_1} + x_2) + \overline{x_2} \cdot (x_2 + x_3) + x_3$
2. $F = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3$
3. $F = \overline{x_1} \cdot x_2 + \overline{x_1} \cdot x_3 + \overline{x_2} \cdot x_4$
4. $F = \overline{x_1} \cdot x_2 + x_1 \cdot \overline{x_2} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2}$
5. $F = \overline{x_1} \cdot x_2 + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} + x_1 \cdot x_2$
6. $F = (x_1 + x_2) \cdot (x_1 + \overline{x_2}) \cdot (\overline{x_1} + x_2)$
7. $F = \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} + \overline{x_1} \cdot x_2 + x_3$
8. $F = \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_2 \cdot \overline{x_3}$
9. $F = \overline{x_1} + \overline{x_2} + (x_3 + x_1 \cdot x_2) \cdot (x_2 + x_4)$
10. $F = x_1 \cdot x_2 + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3$
11. $F = (x_1 \cdot \overline{x_2} + x_3) \cdot (\overline{x_1} + x_2) \cdot \overline{x_3}$
12. $F = x_1 \cdot \overline{x_2} + x_3 + (\overline{x_1} + x_2) \cdot \overline{x_3}$
13. $F = (x_1 \cdot \overline{x_2} + x_3) \cdot (x_1 + \overline{x_2}) \cdot x_3$
14. $F = x_1 \cdot \overline{x_2} + x_3 + (\overline{x_1} + \overline{x_2}) \cdot x_3$
15. $F = (x_1 + \overline{x_2}) \cdot (x_2 + \overline{x_3}) \cdot (x_3 + \overline{x_1}) \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3})$
16. $F = (x_1 + x_2) \cdot (x_2 \cdot x_3 + x_1 \cdot x_4)$
17. $F = x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + x_3(\overline{x_1} + x_2)$
18. $F = (x_1 + x_2) \cdot (x_3 + x_4) \cdot (x_2 \cdot x_4)$
19. $F = (x_1 \cdot x_2 + \overline{x_1} \cdot x_3 + x_2 \cdot x_3) \cdot x_1 \cdot \overline{x_3}$

Общие сведения и методические указания по выполнению заданий

В основе техники передачи информации дискретными сигналами, а также цифровой вычислительной техники и автоматики лежит применение так называемых логических или переключательных схем. Логические схемы в общем случае представляют собой совокупность логических элементов и элементов памяти. Как правило, состояниям логических элементов соответствуют электрические сигналы, которые могут принимать два дискретных значения, условно обозначаемых 0 или 1.

Существуют два класса логических схем: 1) комбинационные схемы, в которых значение выходной переменной зависит только от значений входных переменных в данный момент времени; 2) последовательностные схемы, в которых значение выходной переменной зависит не только от значений входных переменных в данный момент времени, но и от состояний элементов памяти. Такие схемы имеют, как правило, обратные или перекрестные связи, когда выход последующего элемента связан со входом предыдущего элемента.

Будем рассматривать комбинационные логические схемы.

В теории логических схем логика работы элементов и всех систем в целом отображается алгебраическими формулами, базирующимися на так называемой алгебре Буля или булевой алгебре (алгебре логики), разработанной английским математиком Дж. Булем для использования в формальной логике. Это дает возможность прежде всего произвести анализ заданной логической системы, т.е. определить значения выходных двоичных переменных при всех возможных комбинациях входных двоичных переменных в этой схеме. При этом удобно использовать *таблицы истинности*, куда заносятся все возможные комбинации входных состояний и соответствующие выходные.

Другой, наиболее важной, задачей является синтез логической схемы по заданной каким-либо образом логике ее работы. При этом вначале схема описывается логическими уравнениями (как алгебраическими формулами). Затем эти уравнения преобразуются к виду, которому соответствует наиболее простая логическая схема, чаще всего имеющая минимальное число элементов, поэтому такие преобразования называются минимизацией уравнений и соответствующих им схем.

В табл. 5.1 приведены основные логические операции над двоичными переменными, правила их выполнения и обозначения соответствующих логических элементов.

При минимизации удобно использовать следующие закономерности булевой алгебры – **логические тождества**:

$$1) x + y = y + x;$$

$$2) x \cdot y = y \cdot x;$$

$$3) (x + y) \cdot z = x \cdot z + y \cdot z;$$

$$4) x \cdot (y + z) = (x \cdot y) + (x \cdot z);$$

$$5) x + x \cdot y = x;$$

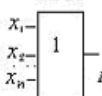

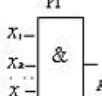

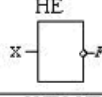

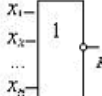

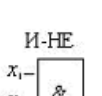

$$6) x \cdot (x + y) = x;$$

правила де Моргана: 7) $\overline{x+y} = \bar{x} \cdot \bar{y}$; 8) $\overline{x \cdot y} = \bar{x} + \bar{y}$;

- 9) $\bar{\bar{x}} = x$ 10) $\bar{x} \cdot x = 0$ 11) $\bar{\bar{x}} + x = /$
 12) $x \cdot / = x$ 13) $0 + x = x$ 14) $x + / = /$
 15) $x \cdot 0 = 0$ 16) $\bar{0} = /$ 17) $\bar{1} = 0$
 18) $x \cdot x = x$ 19) $x + x = x$

Таблица 5.1

Основные логические операции

| № п/п | Название логической операции | Обозначен. | Запись в булевой алгебре | Правила выполнения для 2-х переменных | Обозначен. в Workbench |
|-------|-------------------------------------|---|---|--|---|
| 1 | Дизъюнкция или логическое сложение | ИЛИ  | $F = x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n$ или $F = x_1 + x_2 + \dots + x_n$ | $0+0=0$ $0+1=1$ $1+0=1$ $1+1=1$ |  |
| 2 | Конъюнкция или логическое умножение | И  | $F = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n$ или $F = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$ | $0 \cdot 0 = 0$ $0 \cdot 1 = 0$ $1 \cdot 0 = 0$ $1 \cdot 1 = 1$ |  |
| 3 | Инверсия | НЕ  | $F = \bar{x}$ | $\bar{0} = 1$ $\bar{1} = 0$ |  |
| 4 | Операция ИЛИ-НЕ или стрелка Пирса | ИЛИ-НЕ  | $F = \overline{x_1 \vee x_2 \vee \dots \vee x_n}$ или $F = \overline{x_1 + x_2 + \dots + x_n}$ (или $F = x_1 \downarrow x_2 \downarrow \dots \downarrow x_n$) | $\overline{0+0}=1$ $\overline{0+1}=0$ $\overline{1+0}=0$ $\overline{1+1}=0$ |  |
| 5 | Операция И-НЕ или функция Шэффера | И-НЕ  | $F = x_1 \wedge x_2 \wedge \dots \wedge x_n$ или $F = x_1 \cdot x_2 \cdot \dots \cdot x_n$ (или $F = x_1 x_2 \dots x_n$) | $\overline{0 \cdot 0} = 1$ $\overline{0 \cdot 1} = 1$ $\overline{1 \cdot 0} = 1$ $\overline{1 \cdot 1} = 0$ |  |

Минимизацию сложных логических функций проводят также другими методами, в частности с помощью диаграмм Карно [5.1–5.3] и с помощью компьютерного анализа и синтеза, что и проделаем далее в подразделе 5.2.

Пример минимизации

Пусть требуется минимизировать логическую функцию

$$F(x) = \bar{x}_1 \cdot x_2 + x_1 \cdot x_2 + \bar{x}_1 \cdot \bar{x}_2.$$

5.1. Будем вначале минимизировать аналитическим способом.

5.1.1. Составляем принципиальную схему для реализации заданной функции в базисе элементов И, ИЛИ, НЕ (табл. 5.1, строки 1, 2, 3). Схема приведена на рис. 5.1 и содержит 6 элементов логики.

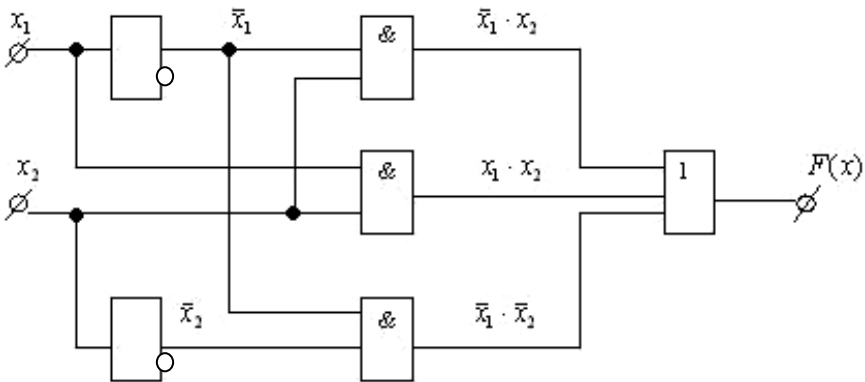


Рис. 5.1. Реализация исходной логической функции

На схеме (рис. 5.1) для пояснения на выходах элементов указаны полученные логические функции.

Составляем таблицу истинности (табл. 5.2).

При составлении таблицы истинности записываются все возможные комбинации входных переменных X_1 и X_2 , последовательно определяются по правилам, указанным в табл. 5.1, соответствующие значения для всех выходов.

Таблица 5.2

Таблица истинности исходной логической функции

| № п/п | X_1 | X_2 | $\overline{X_1}$ | $\overline{X_2}$ | $\overline{X_1} X_2$ | $X_1 X_2$ | $\overline{X_1} \overline{X_2}$ | $F = \overline{X_1} X_2 + X_1 X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2}$ |
|-------|-------|-------|------------------|------------------|----------------------|-----------|---------------------------------|--|
| 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 |

5.1.2. Минимизируем логическую функцию. При преобразовании для пояснения будем указывать номер используемых логических тождеств алгебры, приведенных выше.

$$\begin{aligned}
 F(X) &= \overline{X_1} X_2 + X_1 X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2} && (3) \\
 &= && = \\
 &= X_2(\overline{X_1} + X_1) + \overline{X_1} \overline{X_2} && (11,12) \\
 &= X_2 + \overline{X_1} \overline{X_2} && (8,9) \\
 &= X_2 + \overline{X_1 + X_2} && (7,9) \\
 &= \overline{\overline{X_2}(X_1 + X_2)} && (5) \\
 &= \overline{X_2 X_1 + X_2 X_2} && (10) \\
 &= \overline{X_2 X_1} && (8) \\
 &= X_2 + \overline{X_1}
 \end{aligned}$$

5.1.3. Составляем схему реализации минимизированной логической функции. На рис. 5.2 показаны два варианта реализации полученной функции в различных базисах, т.е. реализованные на различных логических элементах.

Оба варианта реализации (см. рис. 5.2) следуют из двух последних преобразований при минимизации функции на этапе 5.1.2 данного примера. Минимизированное устройство реализовано на 2 элементах в каждом из наборов. Для других логических устройств количество элементов после минимизации может быть разным для разных наборов.

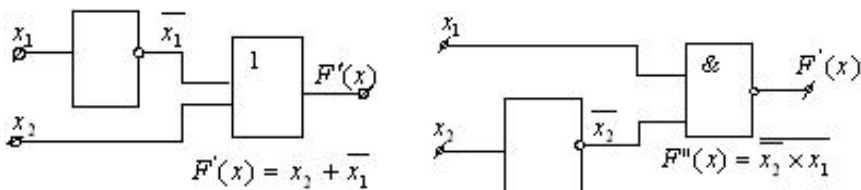


Рис. 5.2. Схема реализации минимизирования функции:
a – в базисе И, ИЛИ, НЕ; *б* – в базисе И-НЕ, ИЛИ-НЕ

Строим таблицу истинности для минимизированной функции.

Значения логических функций F' и F'' при всех комбинациях входных переменных до минимизации (см. табл. 5.2) и после нее (табл. 5.3) полностью совпали. Это подтверждает, что преобразования проведены верно и минимизация правильная. После минимизации количество реализующих функцию элементов (см. рис. 5.2) уменьшилось до двух.

Таблица 5.3



Таблица истинности после минимизации

| № п/п | x_1 | x_2 | $F'(x), F''(x)$ |
|-------|-------|-------|-----------------|
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 2 | 0 | 1 | 1 |
| 3 | 1 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 1 | 1 |

Примечание. Два набора реализации отличаются тем, что в одном все элементы (кроме элемента НЕ) не имеют инверсии, а в другом – все элементы имеют инверсию (с кружками на выходе в условных обозначениях). При этом для последующей минимизации на другом наборе элементов часто достаточно применить к полученному результату правило де Моргана (см. логические тождества), часто неоднократно.

5.2. Перейдем к компьютерной минимизации в среде Workbench.

5.2.1. Принципиальная схема для реализации заданной функции уже была составлена на этапе 5.1.1 (см. рис. 5.1), собираем ее в среде Workbench.

Для этого открываем программу Workbench и на рабочем пространстве размещаем необходимые элементы схемы. Общие элементы (например, Connector – точка подключения) расположены на панели инструментов «Basic», открываются при нажатии на кнопку ; элементы логических устройств находятся на панели инструментов «Logic Gates», открываются при нажатии на кнопку  в верхнем меню программы.

Дальнейшее построение ведется путем «перетаскивания» требуемых элементов на рабочее пространство. Ко входам и выходам устройства рекомендуется подключать вместо клемм, показанных на исходной схеме (см. рис. 5.1), элементы Connector – точки подключения (показано стрелками слева на рис. 5.3). Располагаем логические элементы в порядке их следования, как на исходной схеме. После этого соединяем входы и выходы элементов друг с другом. Для этого необходимо подвести указатель мыши к одному из контактов соединяемых элементов, указатель мыши примет форму черной жирной точки. После этого щелкнуть по этой точке левой кнопкой мыши и, не отпуская кнопку, вести указатель мыши («протягивать» линию) до второго контакта и после появления там жирной точки отпустить левую кнопку мыши.

Внимание! Workbench не создает узловые соединения вблизи мест «пайки» электронных элементов, поэтому узлы следует размещать с некоторым отступом от выводов элементов.

Для создания трехвходового элемента OR–ИЛИ берем двухвходовый элемент ИЛИ и дважды щелкаем на нем левой кнопкой мыши – в появившемся меню свойств выбираем Number of Inputs (количество входов) и отмечаем 3. Аналогично можно сделать по нажатию правой кнопки мышки, выбрав сначала в появившемся альтернативном меню раздел Component properties – свойства компонента.

В результате должна появиться следующая схема (рис. 5.3). Названия элементов NOT, AND и OR подписаны дополнительно в свойствах элемента в разделе Label – метка (по двойному щелчку левой кнопки мыши на каждом элементе) и выведены на индикацию в разделе Display.

Для получения исходной таблицы истинности можно подключить ко входам логического устройства источники питания и изменять их значения на 0 или +5 В для перебора всех состояний.

Выходное состояние оценивать либо по вольтметру, подключенному к выходу, либо с помощью светодиодного индикатора. Такой способ удобен для предварительной отладки схемы.

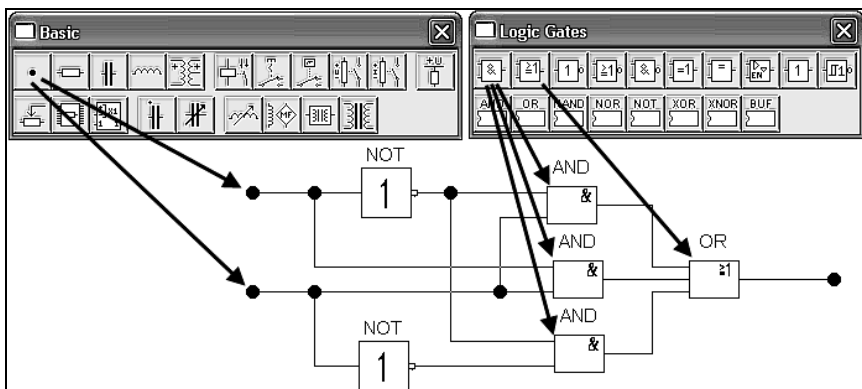


Рис. 5.3. Набор схемы устройства в среде Workbench

Будем использовать более быстрый способ с автоматическим построением таблицы истинности и минимизацией с помощью специального устройства Logic Converter – логического преобразователя. Основные элементы управления показаны на рис. 5.4.

Выносим элемент на рабочее поле и соединяем соответствующие входы и выходы (рис. 5.5). После чего нажимаем два раза левой кнопкой мыши на добавленный элемент Logic Converter – откроется его окно. Дальнейшее управление моделированием осуществляется кнопками в области Conversions – преобразования. Для автоматического построения таблицы истинности нажимаем на верхнюю кнопку – появляется построенная исходная таблица истинности. На рис. 5.5 это действие пояснено стрелкой с надписью 1. Стрелка с надписью 2 иллюстрирует минимизацию цифрового логического устройства по нажатию соответствующей кнопки. В итоге в окне результатов (на него указывает стрелка 2) появляется минимизированная логическая функция в виде $A' + B$. К выводу A конвертера подключен вход $X1$ логического устройства, а к выводу B – вход $X2$. Поэтому полученный результат означает, что минимизированная функция в исходных обозначениях выглядит

$$F = \overline{X1} + X2.$$

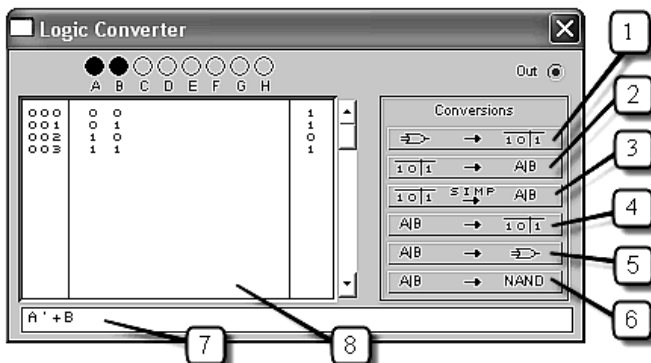


Рис. 5.4. Элементы управления устройством Logic converter:

1 – Получение исходной таблицы истинности для логического устройства; 2 – получение по исходной таблице истинности исходной логической функции; 3 – получение по таблице истинности минимизированной логической функции; 4 – построение по записанной логической функции таблицы истинности; 5 – по записанному логическому выражению строится схема устройства на минимально полном наборе элементов И, ИЛИ, НЕ; 6 – по записанному логическому выражению строится схема устройства на другом минимально полном наборе элементов И–НЕ, ИЛИ–НЕ; 7 – поле для записи логической функции; 8 – поле для записи таблицы истинности

Нажатие следующей ниже кнопки (кнопка 5 на рис. 5.4) приводит к построению и выводу принципиальной схемы минимизированного логического устройства. На рис. 5.5, а) это пояснено стрелкой с надписью 3.

Нажатие последней снизу кнопки (кнопка 6 на рис. 5.4) приводит к минимизации на другом минимально полном наборе элементов И–НЕ, ИЛИ–НЕ и выводу соответствующей принципиальной схемы. На рис. 5.5 это показано стрелкой с надписью 4 и схемой, обозначенной как б. Для последнего случая результирующая функция выглядит так:

$$F = \overline{X1 \cdot \overline{X2}}.$$

Все полученные результаты совпали с соответствующими, полученными при аналитической минимизации в подразделе 5.1 (сравни, например, рис. 5.2 с рис. 5.5, а и б). Следовательно, минимизации выполнены корректно.

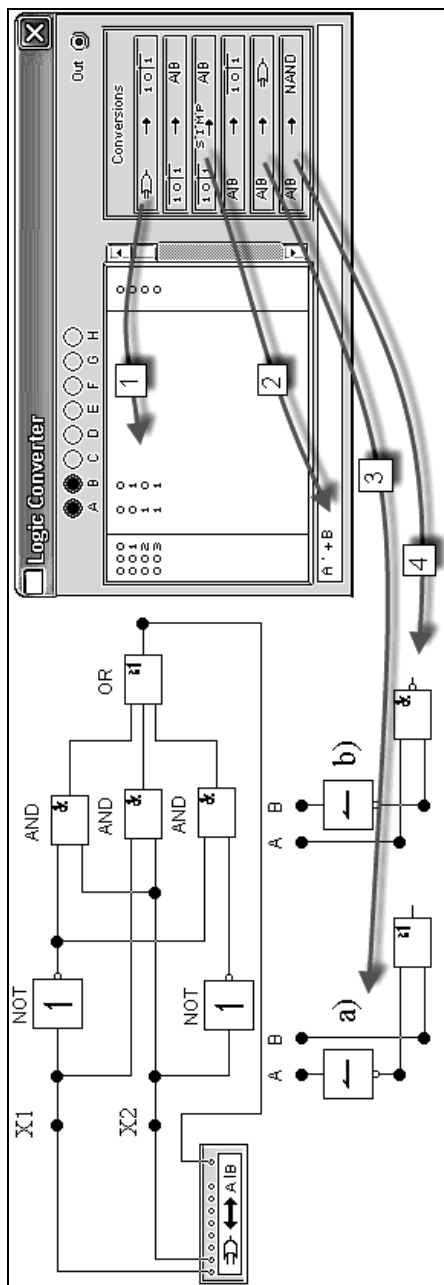


Рис. 5.5. Минимизация в среде Workbench

Контрольные вопросы и задания

5.1. Что такое минимально-полный набор логических элементов и из каких элементов состоят минимально-полные наборы?

5.2. На основании правила де Моргана для двух логических переменных запишите правило де Моргана для трех логических переменных и докажите его корректность.

5.3. Как выглядит принципиальная схема логического устройства, если при минимизации был получен результат $F = 1$?

Вопросы для самопроверки

5.1. Укажите маркировку отечественных логических микросхем.

5.2. Составьте схему для определения таблицы истинности без применения логического преобразователя.

5.3. Какие уровни напряжения соответствуют значениям логическим 0 и 1?

5.4. С каким максимальным количеством логических переменных может производить минимизацию логический преобразователь Logic?

Литература

5.1. Захаров, В.Н. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация / В.Н. Захаров, Д.А. Поспелов, В.Е. Хазацкий. – М.: Энергия, 1977. – 424 с.

5.2. Рогинский, В.Н. Основы дискретной автоматики / В.Н. Рогинский. – М.: Связь, 1975.

5.3. Основы импульсной и цифровой техники: учебное пособие для вузов / В.В. Гусев [и др.]. – М.: Советское радио, 1975. – 440 с.

Лабораторная работа № 6

ЦИФРОВЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ

Цель

Изучить работу цифровых счетчиков-делителей, принципы и схемы их построения.

Задание

Составить схему счетчика-делителя на N , где $N = \langle \text{№ варианта} \rangle + 5$.

6.1. Составить принципиальную схему счетчика-делителя на N на базе D-триггеров или JK-триггеров для своего варианта работы.

6.2. Смоделировать электрическую функциональную схему счетчика в среде Electronics Workbench.

6.3. Включить схему и, подавая на вход схемы тактовые импульсы, убедиться в правильности работы счетчика.

6.4. Получить временные диаграммы входных и выходных сигналов для смоделированного счетчика с помощью логического анализатора Logic Analyzer и двухлучевого осциллографа.

Общие сведения и методические указания по выполнению заданий

Цифровые устройства, в которых выходное состояние зависит не только от того, какие сигналы присутствуют на его входах в данный момент времени, но и в предшествующие моменты, называются *последовательностными*, или *многотактными автоматами*. Типичным таким устройством является *триггер*.

Триггер – это последовательностная схема с двумя устойчивыми состояниями. Каждому из этих состояний ставится в соответствие логическое значение, которое хранит триггер (логическая 1 или логический 0 в зависимости от уровня выходного сигнала).

Несмотря на большое разнообразие триггеров, практически все они строятся на базе простейших базовых RS-триггеров (рис. 6.1).

Один из входов триггера называется установочным входом и обозначается буквой S (от слова Set), а другой – входом сброса и обозначается буквой R (от слова Reset). Триггер имеет два симметричных выхода: прямой и инверсный.

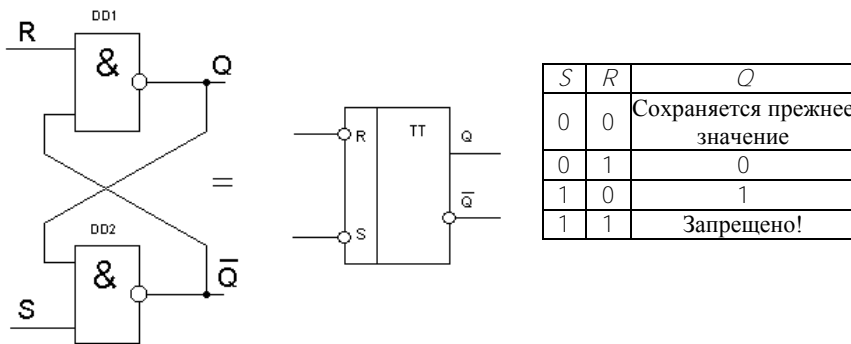


Рис. 6.1. RS-триггер и его таблица состояний

По способу записи информации различают триггеры синхронные и асинхронные (тактируемые). В асинхронных триггерах запись информации осуществляется непосредственно с поступлением информации на вход, в синхронных – только при подаче синхронизирующего импульса. Условие четкой работы такого триггера – это временное совпадение синхроимпульсов и подаваемой на входы R и S информации. В противном случае возможна потеря информации.

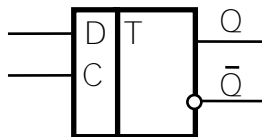


Рис. 6.2. D-триггер

Для устранения такого недостатка применяются D-триггеры (Delay – задержка). При работе такого триггера происходит задержка выходного сигнала на один рабочий такт, что исключает потерю информации. D-триггер имеет один информационный вход D , вход синхронизации C и два выхода прямой Q и инверсный \bar{Q} (рис. 6.2).

T-триггеры (Toggle – кувыркатся) применяются для построения счетчиков импульсов, они, как правило, имеют счетный вход и два выхода прямой Q и инверсный \bar{Q} (рис. 6.3).

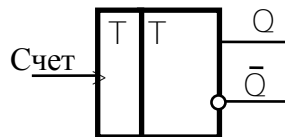


Рис. 6.3. T-триггер

При поступлении каждого сигнала на счетный вход триггера его выходы меняют свое состояние на противоположное.

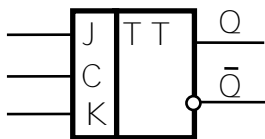


Рис. 6.4. JK-триггер

В интегральном исполнении применяется обычно синхронный, универсальный JK-триггер, который имеет два информационных входа J и K, вход синхронизации C и два выхода прямой Y и инверсный \bar{Y} (рис. 6.4).

Применяя входную логику, на основе JK-триггера можно построить любой тип из ранее рассмотренных триггеров (RS-, D- и T-триггеры).

Каждый из триггеров дополнительно имеет, как правило, R и/или S установочные входы.

Следует отметить, что самостоятельно RS-триггеры в устройствах цифровой техники практически не используются из-за их низкой помехоустойчивости. Например, короткие импульсы помехи, попадающие на R и S входы, могут изменить состояние триггера.

Для повышения помехоустойчивости и устранения так называемых «состязаний» используют синхронный RS-триггер, который изменяет свое состояние только в те моменты времени, когда на специальный синхровход триггера C поступает разрешающий тактирующий импульс.

Рассмотренные выше RS-триггеры нельзя использовать в цифровых устройствах с обратными связями, так как изменения на входах и выходах происходят практически одновременно, что может привести к неопределенностям.

Для устойчивой работы RS-триггера, в том числе и в схемах с обратными связями, необходимо, чтобы сигналы на выходах изменялись только тогда, когда его входы заперты, т.е. синхросигнал уже прекратился. Это требование выполняется в двухступенчатых триггерах (MS-триггерах).

MS-триггер состоит из двух секций, соединенных каскадно. Для ведущего триггера используется обычная синхронизация, в то время как для ведомого триггера импульс синхронизации инвертируется. Изменение состояния выхода ведущего триггера будет происходить в момент появления положительного импульса синхронизации, и эти изменения будут переданы на входы ведомого триггера. Однако никакие изменения на выходе ведомого триггера не будут происходить до тех пор, пока не появится отрицательный фронт исходного синхроимпульса. Такая синхронизация называется динамической. Динамические триггеры могут переключаться как передним, так и задним фронтом тактирующих импульсов.

Одним из самых широко используемых триггеров является D-триггер, который называют информационным триггером, а также триггером задержки. Он бывает только синхронным. Может управляться как уровнем тактирующего импульса, так и его фронтом. По синхроимпульсу D-триггер принимает то состояние, которое имеет входная линия D. Обычно в одном корпусе ИМС содержатся два D-триггера, управляемых фронтом. D-триггеры в интегральном исполнении имеют также дополнительные асинхронные входы управления S и R (входы «предустановки» и «очистки»).

Среди триггеров особое место занимают JK-триггеры, имеющие более широкие функциональные возможности. Упрощенная таблица состояний JK-триггера содержит четыре строки.

| J | K | Q |
|---|---|---|
| 0 | 0 | Q |
| 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | Q |

Выпускаемые промышленностью ИМС JK-триггеры могут иметь несколько входов (до трех) J и такое же количество входов K, объединенных схемами конъюнкций. T-триггер – это счетный триггер. Он имеет один вход, куда подают тактирующие (счетные) импульсы. Каждый синхроимпульс меняет состояние T-триггера на обратное (аналогично состоянию JK-триггера при комбинации входных переменных $J = 1$ и $K = 1$). Частота следования импульсов на выходе счетного триггера в два раза меньше частоты входных синхроимпульсов, что позволяет их использовать в качестве делителей частоты. Для реализации делителя частоты на четыре потребуются два триггера, соединенных последовательно и т.д. T-триггеры строятся только на базе двухступенчатых (RS, D, JK) триггеров.

Счетчики импульсов

На базе счетных триггеров можно построить цифровое устройство, получившее название электронного счетчика, которое позволяет вести подсчет электрических импульсов, поступивших на их вход. Счетчики импульсов – неотъемлемые узлы микропроцессоров, микрокалькуляторов, электронных часов, таймеров частотомеров и многих других устройств цифровой техники. Основу их составляют триггеры со счетным входом.

Простейшим одноразрядным счетчиком импульсов является JK-триггер или D-триггер, работающий в счетном режиме. Он считает входные импульсы по модулю 2: каждый импульс переключает триггер в противоположное состояние. Результат счета формируется

в заданном коде, который может храниться в памяти счетчика или быть считанным другим устройством цифровой техники – дешифратором.

На рис. 6.5 приведена схема трехразрядного двоичного счетчика импульсов.

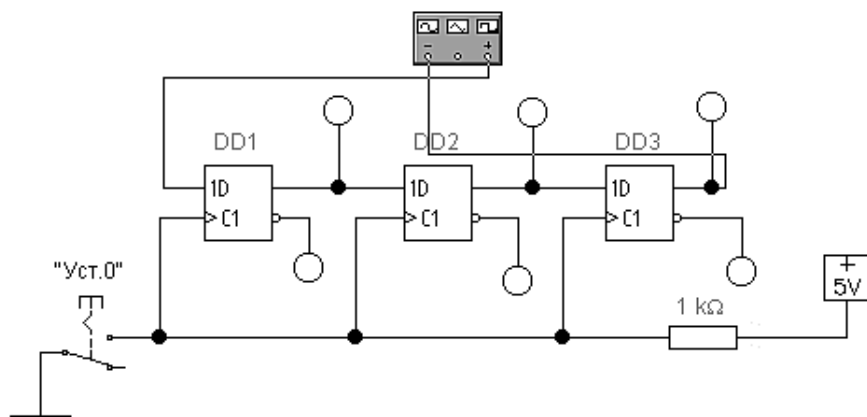


Рис. 6.5. Трехразрядный двоичный счетчик

Если в начальный момент все триггеры счетчика находились в нулевом состоянии (можно установить кнопочным выключателем «Уст.0», подавая на R входы триггеров напряжение низкого уровня), по спаду первого импульса триггер DD1 переключится в единичное состояние – на его прямом выходе появится высокий уровень напряжения. Второй импульс переключит триггер DD1 в нулевое состояние, а триггер DD2 – в единичное. По спаду третьего импульса триггеры DD1 и DD2 окажутся в единичном состоянии, а триггер DD3 все еще будет в нулевом. Четвертый импульс переключит первых два триггера в нулевое состояние, а третий – в единичное. Восьмой импульс переключит все триггеры в нулевое состояние, начнется следующий цикл работы счетчика импульсов. Число различных состояний N-разрядного счетчика 2^N .

Счетчики-делители считают входные импульсы до некоторого задаваемого коэффициентом счета состояния, а затем формируют сигнал сброса триггеров в нулевое состояние, вновь начинают счет входных импульсов до задаваемого коэффициента счета и т.д. Ко-

эффицент деления счетчика, состоящего из N -триггеров типа Т, составляет 2^N ; здесь N – число двоичных разрядов счетчика. Коэффициент деления счетчика может быть либо постоянным, либо переключаемым. Основой любой из счетной схем служит линейка из нескольких триггеров. Разные варианты счетных схем (синхронные и асинхронные; однонаправленные, только с увеличением счета, и двунаправленные, счет в которых может увеличиваться или уменьшаться) различаются схемой управления этими триггерами. Между триггерами добавляются логические связи, назначение которых – запретить прохождение в цикле счета лишним импульсам. К примеру, четырехтриггерный счетчик может делить исходную частоту на 16, так как $2^4=16$. Получим минимальный выходной код 0000, а максимальный 1111. Чтобы построить счетчик-делитель на 10, трех триггеров не достаточно ($10 > 2^3$), поэтому десятичный счетчик содержит в своей основе четыре триггера, но имеет обратные связи, останавливающие счет при коде 9 = 1001. В синхронном счетчике все триггеры получают тактовый импульс одновременно, поскольку тактовые входы их соединяются параллельно. Поэтому триггеры переключаются практически одновременно. В счетчике пульсаций каждый триггер вносит в процесс счета определенную задержку, поэтому младшие разряды результирующего кода появляются на выходах триггеров неодновременно, т.е. несинхронно с соответствующим тактовым импульсом. Например, для четырехразрядного счетчика пульсаций выходной параллельный код 1111 появится на выходах триггеров уже после того, как поступит шестнадцатый тактовый импульс, кроме того, эти четыре единицы сформируются неодновременно.

Синхронная схема значительно сложнее асинхронной. На ее выходах данные от каждого разряда появляются одновременно и строго синхронно с последним входным импульсом.

Сброс данных счетчика, чтобы на всех выходах установился нулевой код, у одних схем асинхронный R, у других синхронный SR, происходит одновременно с приходом тактового импульса. Имеются счетчики с переменным коэффициентом деления. Устанавливаемый коэффициент деления зависит от кода, набранного на входах управления.

Далее приведены примеры различных счетчиков. На базе примеров разработайте свою схему и выполните задание.

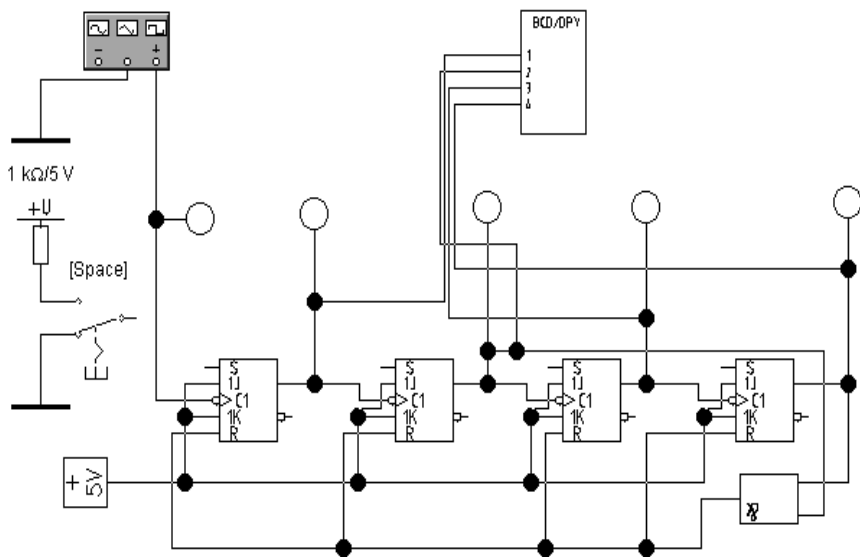


Рис. 6.6. Пример двоично-десятичного счетчика

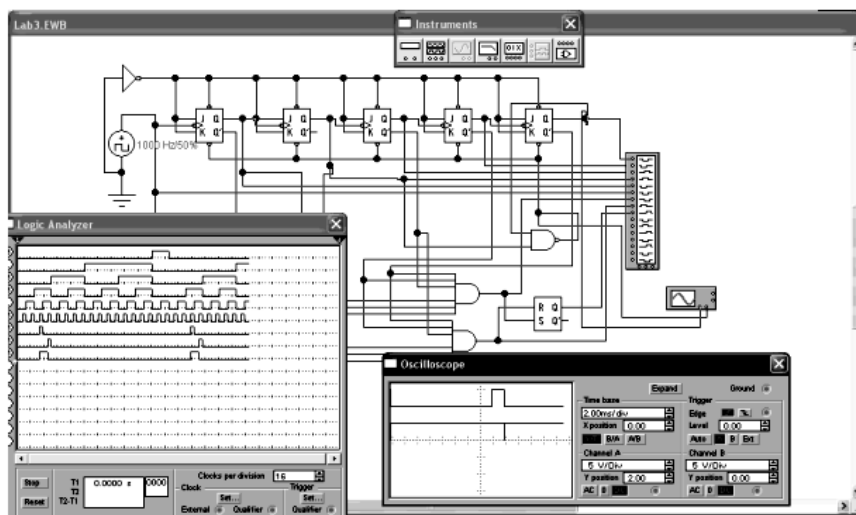


Рис. 6.7. Пример счетчика на JK-триггерах со схемой выборки и совпадения для изменения коэффициента пересчета

Контрольные вопросы и задания

- 6.1. Приведите схему подключения логического анализатора Logic Analyzer к счетчику.
- 6.2. Приведите схему выборки и совпадения для двоично-десятичного счетчика.
- 6.3. Почему RS-триггер имеет низкую помехозащищенность?

Вопросы для самопроверки

- 6.1. Какой максимальный коэффициент пересчета для N-разрядного счетчика?
- 6.2. Почему JK-триггер называют универсальным?
- 6.3. Можно ли на трехразрядном счетчике получить коэффициент деления 9?
- 6.4. Поясните принцип работы делителя частоты.

Литература

- 6.1. Методические указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Информационно-измерительная техника и электроника». – М.: МИЭЭ, 2006. – 24 с.
- 6.2. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Триггер> – материал по триггерам из Википедии.
- 6.3. <http://www.tstu.ru/education/elib/pdf/2005/chernva.pdf> – счетчики импульсов.
- 6.4. <http://naf-st.ru/articles/digit/count/> – цифровые счетчики.
- 6.5. <http://venec.ulstu.ru/lib/disk/2007/137.pdf> – Вычислительная техника и информационные технологии: сборник лабораторных работ. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – Ч. 1: Цифровая схемотехника. – 30 с.

Лабораторная работа № 7

РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

Цель

Изучить способы анализа систем автоматического регулирования (САР) путем расчета и построения частотных и переходных характеристик.

Задание

Требуется выполнить указанные ниже этапы работы. Вариант работы назначается или выбирается по номеру зачетной книжки как в лабораторной работе №5.

7.1. Для каждого из звеньев, указанных на рис. 7.1 и выполненных на базе операционного усилителя, найти передаточную функцию. Указать к какому типу типовых звеньев относится данное звено.

7.2. Составить структурную схему с указанием передаточных функций каждого звена и определить общую передаточную функцию всей системы W_0 .

7.3. Построить амплитудно-фазовую (годограф), амплитудно-частотную, фазочастотную и логарифмическую частотную характеристики.

7.4. По виду передаточной функции W_0 построить логарифмическую асимптотическую частотную характеристику (ЛАЧХ).

7.5. Построить график переходного процесса (переходную характеристику) при единичном входном ступенчатом воздействии и определить время переходного процесса – время регулирования T_p – с погрешностью $\delta = 5\%$.

7.6. Проверить полученные результаты моделированием в среде Workbench.

В отчете привести расчеты, табличные и графические результаты.


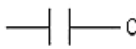

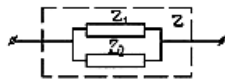
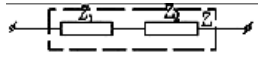
Методические указания и пример расчета

В общем виде типовые элементы электронной автоматики, выполненные на базе операционного усилителя, имеют структуру, показанную на рис. 7.3. На этом рисунке операционный усилитель (ОУ) имеет внешние цепи с комплексным сопротивлением Z_0 и Z_1 , причем Z_1 – сопротивление на входе элемента, а Z_0 – сопротивление цепи обратной связи.

Сопротивления Z_0 и Z_1 комплексные, т.к. в общем случае содержат, кроме резисторов с активным сопротивлением, емкостные и индуктивные элементы цепей с соответствующими реактивными сопротивлениями. Именно поэтому расчет схем на базе операционных усилителей удобно выполнять в комплексной форме с использованием преобразования Лапласа.

Комплексные сопротивления отдельных элементов электронных цепей приведены в табл. 7.1 (позиции 1–3). Там же приведены выражения для полных комплексных сопротивлений при параллельном (позиция 4) и последовательном (позиция 5) соединении элементов с комплексными сопротивлениями Z_1 и Z_2 .

Таблица 7.1

| № | Элемент цепи | Комплексное сопротивление |
|---|---|--|
| 1 |  | $Z(p) = R$ |
| 2 |  | $Z(p) = \frac{1}{pC}$ |
| 3 |  | $Z(p) = pL$ |
| 4 |  | $Z(p) = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$ |
| 5 |  | $Z(p) = Z_1 + Z_2$ |

Пользуясь приведенными в табл. 7.1 соотношениями, можно определить полное комплексное сопротивление любой электронной цепи и рассчитать, в частности, сопротивления Z_0 и Z_1 схемы, показанной на рис. 7.3. Для этого вместо каждого электронного элемента цепи записывается его комплексное сопротивление в соответствии с позициями 1–3, табл. 7.1, а полное сопротивление рассчитывается в соответствии с позициями 4–5.

Расчет сопротивлений Z_0 и Z_1 , определяют передаточную функцию $W(p)$ звена по следующей формуле:

$$W(p) = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ВХ}}(p)} = -\frac{Z_0(p)}{Z_1(p)}. \quad (7.1)$$

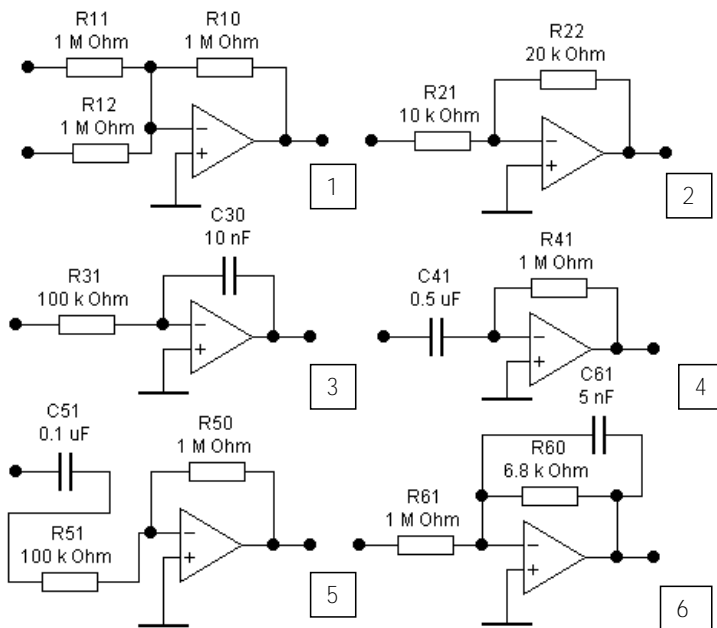


Рис. 7.1. Схемы звеньев САР на базе операционного усилителя

Варианты схем САР приведены на рис. 7.2:

Знак « \leftrightarrow » в формуле (7.1) ставится тогда, когда операционный усилитель является инвертирующим, т.е. его выходное напряжение имеет противоположный знак по отношению ко входному. Это условие выполняется практически наиболее часто. Когда же выходное сопротивление неинвертировано – знак « \leftrightarrow » опускается.

Дальнейший путь расчета и исследования электронных схем автоматки – приведение выражения (7.1) к виду

$$W(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

$$\text{где } F_{1,2}(p) = T^k p^m (1 + pT_1)(1 + pT_2) \dots (1 + pT_n) = T^k p^m \sum_{i=1}^n (1 + pT_i).$$

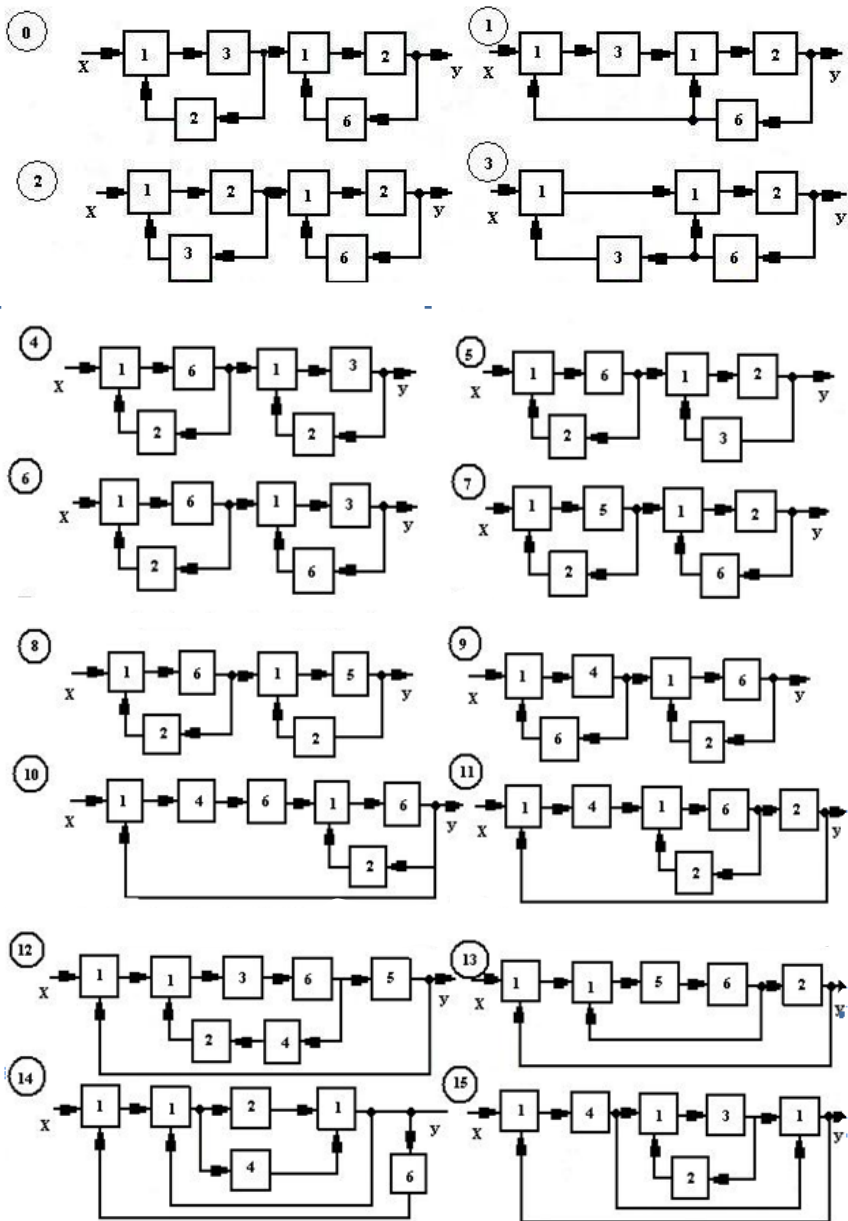
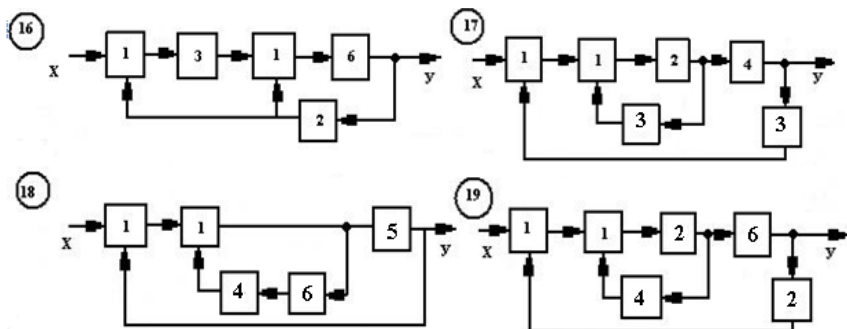


Рис. 7.2. Варианты схем систем автоматического регулирования



Окончание рис. 7.2

Затем определяют известными из теории автоматического управления методами характеристики САУ, влияющие на эффективность и качество ее функционирования.

На практике часто встречаются типовые динамические звенья (табл. 7.2), описываемые дифференциальными уравнениями не выше второго порядка.

Для улучшения характеристик в электронные системы автоматического управления (САУ) вводят обратные связи, которые обеспечивают воздействие выходного сигнала на входной. Для этого может быть использован сумматор (звено 1 на рис. 7.1), на вход которого поступают входной сигнал и сигнал обратной связи. Если сигнал обратной связи является неинвертированным, или синфазным, по отношению к входному сигналу, то образуется положительная обратная связь, так как указанные сигналы суммируются с одинаковыми знаками, а если инвертированным – то отрицательная.

Например, в варианте 0 на рис. 7.2 к сумматору подводится сигнал обратной связи, сформированный при прохождении через нечетное количество инвертирующих усилителей. Обратная связь в таком случае является отрицательной. Отрицательная (ООС) и положительная (ПОС) обратная связь на структурных схемах изображается следующими знаками соответственно:



После определения вида обратной связи расчеты проводят по выражениям (7.4) или (7.5), но уже без учета инвертирования входящими ОУ, т.е. по модулю.

Приведем пример начального расчета задания для звена на базе ОУ, показанного на рис. 7.3.

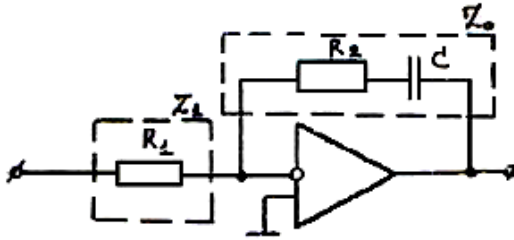


Рис. 7.3. Пример звена для расчета

Определим передаточную функцию:

$$W(p) = \frac{z_0(p)}{z_1(p)}.$$

Комплексное сопротивление z_0 определим в соответствие с табл. 7.1. (позиции 1, 2, 5):

$$z_0(p) = R_2 + \frac{1}{pC}; \quad z_1(p) = R_1,$$

где $k_1 = \frac{R_2}{R_1}$, $k_2 = \frac{1}{CR_1}$.

Полученная передаточная функция является суммой передаточных функций типового безынерционного звена (табл. 7.2, позиция 1) и идеального интегратора (табл. 7.2, позиция 5).

После определения передаточных функций, всех звеньев в варианте задания и вида обратных связей составляют структурную схему. На рис. 7.4 показана составленная для примера структурная схема.

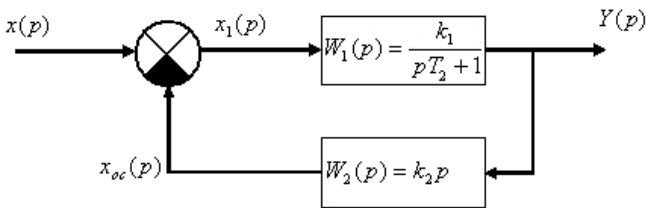


Рис. 7.4. Пример представления структурной схемы

Таблица 7.2

Типовые динамические значения

| № п/п | Тип звена | Вид передаточной функции | Вид дифференциального уравнения |
|-------|------------------------------|--|---|
| 1 | Безынерционное | $W(p) = k$ | $y = kx$ |
| 2 | Апериодическое 1 порядка | $W(p) = \frac{k}{Tp+1}$ | $T\dot{y} + y = kx$ |
| 3 | Апериодическое 2 порядка | $W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}$ ($0 \leq \xi \leq \infty$) | $T^2 \ddot{y} + 2\xi T\dot{y} + y = kx$ |
| 4 | Колебательное | $W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\xi Tp + 1}$ ($0 < \xi < 1$) | $T^2 \ddot{y} + 2\xi T\dot{y} + y = kx$ |
| 5 | Идеальное интегрирующее | $W(p) = \frac{k}{p}$ | $y = k \int_0^t x dt$ |
| 6 | Инерционное интегрирующее | $W(p) = \frac{k}{p(Tp+1)}$ | $T\dot{y} + y = k \int_0^t x dt$ |
| 7 | Идеальное дифференцирующее | $W(p) = kp$ | $y = k\dot{x}$ |
| 8 | Инерционное дифференцирующее | $W(p) = \frac{kp}{Tp+1}$ | $T\dot{y} + y = k\dot{x}$ |

Передаточная функция всей системы $W_0(p)$ определяется с учетом соединений ее звеньев по следующим правилам:
при последовательном соединении звеньев

$$W_0(p) = W_1(p) \cdot W_2(p); \quad (7.2)$$

при параллельном соединении звеньев

$$W_0(\rho) = W_1(\rho) + W_2(\rho); \quad (7.3)$$

при отрицательной обратной связи

$$W_0(\rho) = \frac{W_1(\rho)}{1 + W_1(\rho) \cdot W_{0c}(\rho)}; \quad (7.4)$$

при положительной обратной связи

$$W_0(\rho) = \frac{W_1(\rho)}{1 - W_1(\rho) \cdot W_{0c}(\rho)}. \quad (7.5)$$

Определим, например, передаточную функцию системы, показанной на рис. 7.4. Пользуясь выражением для соединения с отрицательной обратной связью (7.4), получим

$$\begin{aligned} W(\rho) &= \frac{W_1(\rho)}{1 + W_1(\rho)W_2(\rho)} = \frac{k_1}{(\rho T_1 + 1) \left(1 + \frac{k_1}{\rho T_1 + 1} \cdot k_2 \rho \right)} = \\ &= \frac{k_1}{\rho T_1 + 1 + k_1 k_2 \rho} = \frac{k_1}{\rho(T_1 + k_1 k_2) + 1} = \frac{k_1}{\rho T_2 + 1}, \end{aligned}$$

где $T_2 = T_1 + k_1 k_2$.

Для определения частотных характеристик системы переходят от передаточной функции $W(\rho)$ к комплексной частотной передаточной функции $W(i\omega)$ путем формальной замены переменной ρ на $(i \cdot \omega)$, где $i = \sqrt{-1}$.

Далее выделяют в функции $W(i\omega)$, вещественную часть и мнимую, содержащую i :

$$W(i\omega) = P(\omega) + iQ(\omega),$$

где $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ – вещественная и мнимая частотная характеристики, соответственно.

Например, для рассматриваемого примера находим частотную передаточную функцию и ее вещественную и мнимую части:

$$W(p) = \frac{k_1}{pT_2 + 1}; \quad W(i\omega) = \frac{k_1}{i\omega T_2 + 1};$$

$$W(i\omega) = \frac{k_1(i\omega T_2 - 1)}{(i\omega T_2 + 1) \cdot (i\omega T_2 - 1)} = \frac{k_1 i\omega T_2 - k_1}{-\omega^2 T_2^2 - 1} =$$

$$= \frac{k_1}{\omega^2 T_2^2 - 1} + i \frac{-k_1 T_2 \omega}{\omega^2 T_2^2 + 1} = P(\omega) + iQ(\omega),$$

где

$$P(\omega) = \frac{k_1}{\omega^2 T_2^2 - 1}, \quad Q(\omega) = \frac{-k_1 T_2 \omega}{\omega^2 T_2^2 + 1}. \quad (7.6)$$

При преобразованиях знаменатель и числитель домножались на комплексное выражение (комплексное число), сопряженное знаменателю, и учитывалось, что

$$(a)^2 - b^2 = a^2(\sqrt{-1})^2 - b^2 = -a^2 - b^2.$$

Амплитудно-фазовая характеристика (АФХ) строится на комплексной плоскости в координатах $P(\omega)$ и $i \cdot Q(\omega)$ для различных значений циклической частоты $\omega \in [0, \infty)$.

Например, АФХ (годограф) показана на рис. 7.5.

Зависимость от частоты отношения амплитуды выходного сигнала к амплитуде входного называется *амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ)*. Для ее построения необходимо найти модуль комплексной частотной характеристики $W(i\omega)$:

$$A(\omega) = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} = \sqrt{P(\omega)^2 + Q(\omega)^2}. \quad (7.7)$$

Зависимость от частоты фазового сдвига, получаемого сигналом после прохождения на выход, называется *фазочастотной характеристикой (ФЧХ)*. Для ее построения находят аргумент комплексной частотной функции:

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}. \quad (7.8)$$

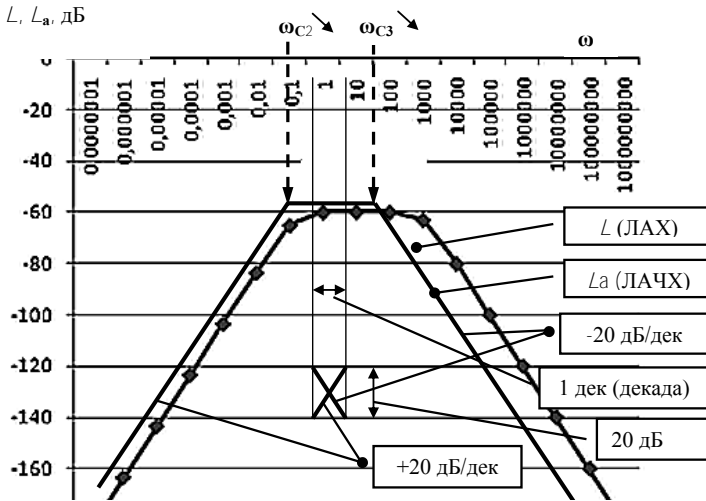


Рис. 7.5. Построение ЛАЧХ

Продолжим расчет рассматриваемой схемы. По выражениям (7.7), (7.8), используя (7.6), определим АЧХ и ФЧХ:

$$A(\omega) = \sqrt{\frac{k_1^2}{(\omega^2 \cdot T_2^2 + 1)^2} + \frac{k_1^2 \cdot \omega^2 \cdot T_2^2}{(\omega^2 \cdot T_2^2 + 1)^2}} = \frac{k_1}{\sqrt{\omega^2 \cdot T_2^2 + 1}};$$

$$\varphi(\omega) = \arctg \frac{-k_1 \cdot T_2 \cdot \omega(\omega^2 \cdot T_2^2 + 1)}{(\omega^2 \cdot T_2^2 + 1) \cdot k_1} = \arctg(-T_2 \cdot \omega) = -\arctg(T_2 \cdot \omega).$$

По результатам расчета строят графики.

Примечание. При расчетах нужно учитывать выражения для постоянной времени:

$$T[c] = R[\text{МОм}] \cdot C[\text{мкФ}]. \quad (7.9)$$

Логарифмические характеристики строятся в координатах $L(\omega) = 20 \lg A(\omega)$ и ω , причем циклическая частота откладывается в логарифмическом масштабе, но с указанием по оси абсцисс численных значений для частоты ω .

Следует отметить общую особенность построения графиков логарифмических частотных характеристик: значение $\omega = 0$ на оси абсцисс находится в $(-\infty)$ из-за логарифмического масштаба.

Частоты сопряжения $\omega_C = 1/T_C$ являются характерными точками изменения наклона асимптотической ЛАХ. В каждой из частот сопряжения $\omega_C = 1/T_C$, определяемых исходя из сомножителей $(i\omega T_k \pm 1)$ комплексной частотной передаточной функции $W(i\omega)$, происходит изменение текущего угла наклона асимптотической ЛАХ на ± 20 дБ/дек. Указанной закономерностью пользуются для построения *асимптотической* ЛАХ, непосредственно по виду передаточной функции $W(p)$. Это позволяет строить асимптотические ЛАХ без проведения достаточно сложных математических преобразований, ориентируясь лишь на вид передаточной функции.

Построение переходной характеристики для единичного ступенчатого входного воздействия основано на переходе во временную область от выражения

$$H(p) = W(p) \cdot \frac{1}{p}. \quad (7.10)$$

Выражение (7.10) описывает выходную величину $H(p)$, когда на вход САР с передаточной функцией $W(p)$ подано единичное ступенчатое воздействие, изображением которого есть $1/p$.

Переходя от выражения (7.10) во временную область, получают выражение для переходной характеристики – реакцию системы на единичное ступенчатое входное воздействие:

$$h(t) = L^{-1} \left[W(p) \cdot \frac{1}{p} \right].$$

Знак L^{-1} в выражении обозначает обратное преобразование Лапласа.

Для не очень сложных передаточных функций обратное преобразование осуществляют либо по таблицам обратных преобразований [2; 22], либо используя формулы обратных преобразований, в частности, разложение Хевисайда [22; с. 234]. Используют также аналитическая разложение соответствующего дифференциального уравнения [2].

Построив графически переходную характеристику, определяют время переходного процесса как время входа в зону с указанной погрешностью отклонения δ .

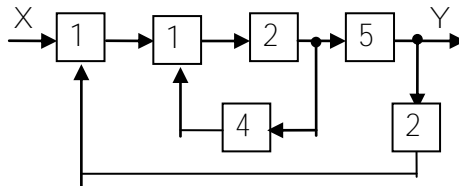
Используем для обратного преобразования Лапласа разложение Хевисайда для рациональных алгебраических функций в случае простых корней [22, с. 234] в виде

$$L^{-1}\left[\frac{D_1(p)}{D_2(p)}\right] = \sum_{k=1}^n \frac{D_1(p_k)}{D'(p_k)} \cdot \exp(p_k \cdot t),$$

где $D'(p_k)$ – знаменатель отношения многочленов, в котором опускаются сомножители вида $(p - p_k)$, для значений корней $p = p_k$.

Пример расчета

Поясним расчет на примере САР, содержащей звенья на ОУ (см. рис. 7.1), со следующей схемой:



7.1. Определяем передаточные функции для звеньев (из рис. 7.1).

Звено № 1 – сумматор.

Передаточная функция:

$$W_1(p) = -\frac{Z_0(p)}{Z_1(p)} = -\frac{R_{10}}{R_{11}} = -1.$$

Звено № 2

Передаточная функция:

$$W_2(p) = -\frac{Z_0(p)}{Z_1(p)}; \quad Z_0(p) = R_{20};$$

$$Z_1(p) = R_{21}; \quad W_2(p) = -R_{21} / R_{21} = k_2.$$

где $k_2 = -R_{21} / R_{21} = -2$.

По виду передаточной функции определяем, что звено безынерционное.

Звено № 3

Передаточная функция:

$$W_3(p) = -\frac{Z_0(p)}{Z_1(p)}; \quad Z_0(p) = -\frac{1}{p \cdot c_1}; \quad Z_1(p) = R_{31};$$

$$W_3(p) = -\frac{1}{\frac{p \cdot C_{30}}{R_{31}}} = -\frac{1}{p \cdot C_{30} \cdot R_{31}} = \frac{k_3}{p};$$

где $k_3 = \frac{1}{C_{30} \cdot R_{31}} = -1000$.

По табл. 7.2 определяем, что звено идеальное интегрирующее.

Для остальных звеньев приводим окончательные результаты.

Звено № 4:

$$W_4(p) = k_4 \cdot p,$$

где $k_4 = -0,5$ – идеальное дифференцирующее звено.

Звено № 5

$$W_5(p) = \frac{k_5 \cdot p}{p T_5 + 1},$$

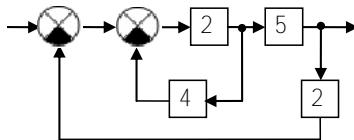
где $k_5 = -0,1$, $T_5 = 0,01$ – инерционное дифференцирующее.

Звено № 6

$$W_6(p) = \frac{k_6}{p T_6 + 1},$$

где $k_6 = -1$, $T_6 = 34 \cdot 10^{-6}$ – инерционное.

7.2. Для составления структурной схемы определяем вид обратной связи (отрицательная или положительная). Так как в цепи обратной связи 1-1-2-5-2 и 1-2-4 нечетное количество блоков с инвертирующими операционными усилителями (пять блоков и три блока соответственно), то это определяет отрицательные обратные связи (если бы было четное количество операционных усилителей, обратные связи были бы положительными). Тогда схему с учетом определения обратных связей, как отрицательных обратных связей, можно представить в виде



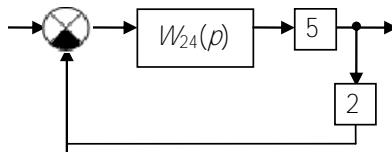
В дальнейшем расчете теперь можно использовать значения для передаточных функций всех звеньев входящих в схему по модулю (т.е. не учитывать знак минус для передаточных функций каждого звена).

Рассчитываем передаточную функцию $W_{24}(p)$ для звеньев 1_2_4, соединенных с отрицательной обратной связью, по выражению (7.4):

$$W_{24}(p) = \frac{W_2(p)}{1 + W_2(p) \cdot W_4(p)} = \frac{k_2}{1 + k_2 \cdot p \cdot k_4} = \frac{k_2}{p \cdot T_{24} + 1},$$

где $T_{24} = k_2 \cdot k_4 = 2 \cdot 0,5 = 1$.

Получаем следующую расчетную структурную схему:

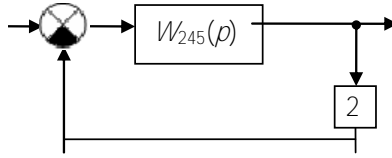


Рассчитываем передаточную функцию $W_{245}(p)$ для последовательно соединенных звеньев $W_{24}(p)$ и 5 по выражению (7.2).

$$W_{245}(p) = W_{24}(p) \cdot W_5(p) = \frac{k_2}{p \cdot T_{24} + 1} \cdot \frac{k_5 \cdot p}{1 + T_5 \cdot p} = \frac{p \cdot T_{25}}{(p \cdot T_{24} + 1) \cdot (p \cdot T_5 + 1)},$$

где $T_{25} = k_2 \cdot k_5$.

Получаем следующую расчетную структурную схему:



Рассчитываем общую передаточную функцию $W_0(p)$ для соединения с отрицательной обратной связью по выражению (7.4):

$$W_0(p) = \frac{W_{245}(p)}{1 + W_{245}(p) \cdot W_2(p)} = \frac{\rho \cdot T_{25}}{1 + (\rho \cdot T_{24} + 1) \cdot (\rho \cdot T_5 + 1) \cdot k_2}.$$

Для получения окончательного вида находим корни квадратного уравнения в знаменателе:

$$k_2 \cdot \rho^2 \cdot T_{24} \cdot T_5 + k_2 \cdot \rho \cdot (T_{24} + T_5) + (k_2 + 1) = 0;$$

$$2 \cdot \rho^2 \cdot 1 \cdot 0,01 + 2 \cdot \rho \cdot (1 + 0,01) + (2 + 1) = 0;$$

$$0,02 \cdot \rho^2 + 2,002 \cdot \rho + 3 = 0; \quad \rho_{1,2} = \frac{-2,002 \pm \sqrt{(2,002)^2 - 4 \cdot 0,02 \cdot 3}}{2 \cdot 0,02};$$

$$\rho_{1,2} = \frac{-2,002 \pm \sqrt{4,008004 - 0,24}}{0,04}; \quad \rho_{1,2} = \frac{-2,002 \pm 1,941134719\theta}{0,04};$$

$$\rho_1 = -0,152162 \quad \rho_2 = -98,5784.$$

Окончательный вид общей передаточной функции будет таким:

$$\begin{aligned} W_0(p) &= \frac{\rho \cdot T_{25}}{1 + (\rho \cdot T_{24} + 1) \cdot (\rho \cdot T_5 + 1) \cdot k_2} = \frac{\rho \cdot T_{25}}{2 \cdot (\rho + 0,152162) \cdot (\rho + 98,5784)} = \\ &= \frac{\rho \cdot T_{25}}{2 \cdot 0,152162 \cdot 98,5784 \cdot (\rho / 0,152162 + 1) \cdot (\rho / 98,5784 + 1)} = \\ &= \frac{\rho \cdot T_1}{(\rho \cdot T_2 + 1) \cdot (\rho \cdot T_3 + 1)}. \end{aligned}$$

где $T_1 = T_{25} / (2 \cdot 0,152162 \cdot 98,5784) = 0,0066667$

$$T_2 = 1/0,152162 = 6,571943$$

$$T_3 = 1/98,5784 = 0,00101442$$

Полученное выражение для передаточной функции $W_0(p)$ характеризует собой инерционное дифференцирующее звено.

Рассчитываем комплексную передаточную функцию $W(i\omega)$ и находим действительную $P(\omega)$ и мнимую $Q(\omega)$ части выражения

К комплексной передаточной функции переходим формальной заменой $p \rightarrow i \cdot \omega$:

$$W(i \cdot \omega) = \frac{T_1 \cdot i\omega}{(T_2 \cdot i\omega + 1)(T_3 \cdot i\omega + 1)}.$$

Для устранения комплексного значения i в знаменателе умножаем числитель и знаменатель на сопряженные комплексные выражения и делим действительную и мнимые части полученного выражения:

$$\begin{aligned} W(i \cdot \omega) &= \frac{T_1 \cdot i\omega}{(T_2 \cdot i\omega + 1)(T_3 \cdot i\omega + 1)} = \frac{T_1 \cdot i\omega(T_2 \cdot i\omega - 1)(T_3 \cdot i\omega - 1)}{(-T_2^2 \cdot \omega^2 - 1)(-T_3^2 \cdot \omega^2 - 1)} = \\ &= \frac{(T_1 \cdot i^2 \omega^2 - T_1 \cdot i\omega)(T_3 \cdot i\omega - 1)}{(T_2^2 \cdot \omega^2 + 1)(T_3^2 \cdot \omega^2 + 1)} = \\ &= \frac{T_1 \cdot i^3 \omega^3 T_2 T_3 - T_1 \cdot i^2 \omega^2 T_2 - T_1 \cdot i^2 \omega^2 T_3 \cdot + T_1 \cdot i\omega}{(T_2^2 \cdot \omega^2 + 1)(T_3^2 \cdot \omega^2 + 1)} = \\ &= \frac{-T_1 \cdot i\omega^3 T_2 T_3 + T_1 \cdot \omega^2 T_2 + T_1 \cdot \omega^2 T_3 \cdot + T_1 \cdot i\omega}{(T_2^2 \cdot \omega^2 + 1)(T_3^2 \cdot \omega^2 + 1)} = P(\omega) + iQ(\omega). \end{aligned}$$

После преобразований получим

$$P(\omega) = \frac{\omega^2 T_1 (T_2 + T_3)}{(T_2^2 \cdot \omega^2 + 1)(T_3^2 \cdot \omega^2 + 1)};$$

$$Q(\omega) = \frac{T_1 \omega \cdot (1 - \omega^2 T_2 T_3)}{(T_2^2 \cdot \omega^2 + 1)(T_3^2 \cdot \omega^2 + 1)}.$$

Используя полученные выражения для $P(\omega)$, $Q(\omega)$, рассчитываем остальные частотные характеристики.

АФХ (годограф) строится на комплексной плоскости в координатах $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ для различных значений циклической частоты $\omega \in [0, \infty)$.

Логарифмическая частотная характеристика (ЛЧХ) рассчитывается по выражению и строится в логарифмических координатах по оси частот по декадам, т.е. при десятикратном изменении частоты

$$L_a(\omega) = 20 \cdot \lg A(\omega), \text{ дБ.}$$

Логарифмическая частотная характеристика (ЛАЧХ) $L_a(\omega)$ строится на одном графике (совместно) с логарифмической частотной характеристикой $L(\omega)$. Для ее построения понадобятся частоты сопряжения ω_{ci} , которые определяются из скобок $(pT+1)$ выражения для общей передаточной функции $W(p)$:

$$\omega_{c1} = \frac{1}{T_2} = 0,152162 \quad \text{и} \quad \omega_{c2} = \frac{1}{T_3} = 98,5784.$$

Переходная характеристика $h(t)$ реакция системы на единичное ступенчатое воздействие и ее изображение по Лапласу $H(p)$ рассчитываются следующим образом:

$$H(p) = W(p) \cdot \frac{1}{p} = \frac{T_1 \cdot p}{p \cdot (pT_2 + 1)(pT_3 + 1)} = \frac{T_1}{T_2 T_3 \cdot (p + \frac{1}{T_2})(p + \frac{1}{T_3})}.$$

Корни характеристического выражения знаменателя:

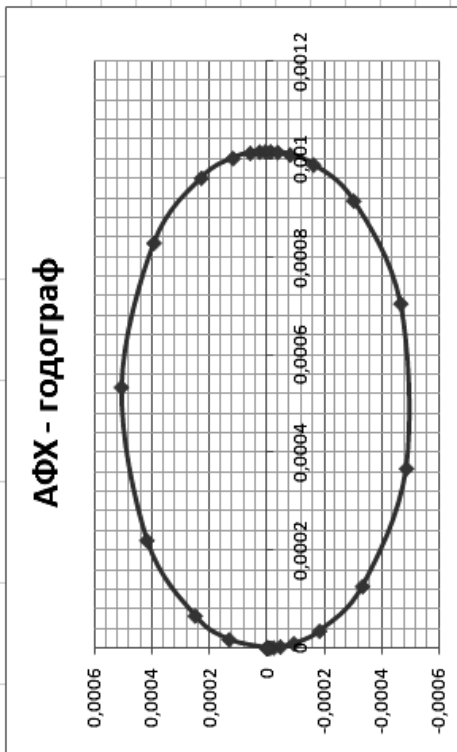
$$p_1 = -\frac{1}{T_2}; \quad p_2 = -\frac{1}{T_3}.$$

Используем для перехода от изображения к оригиналу для расчета $h(t)$ обратное преобразование Лапласа – разложение Хевисайда:

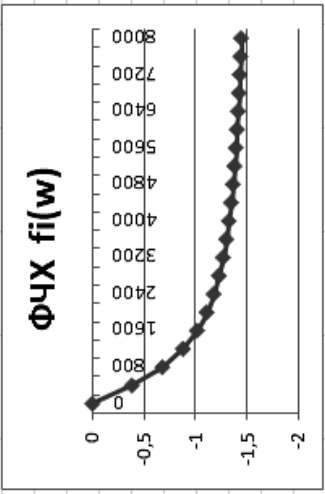
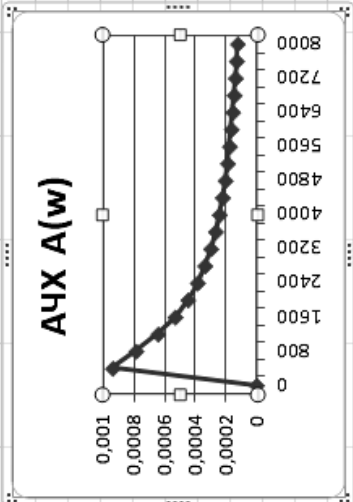
$$\begin{aligned} h(t) &= \frac{T_1}{T_2 - T_3} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}} + \frac{T_1}{T_3 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_3}} = \\ &= 0,00101446 \{ e^{-t/6,571943} - e^{-t/0,00101443} \}. \end{aligned}$$

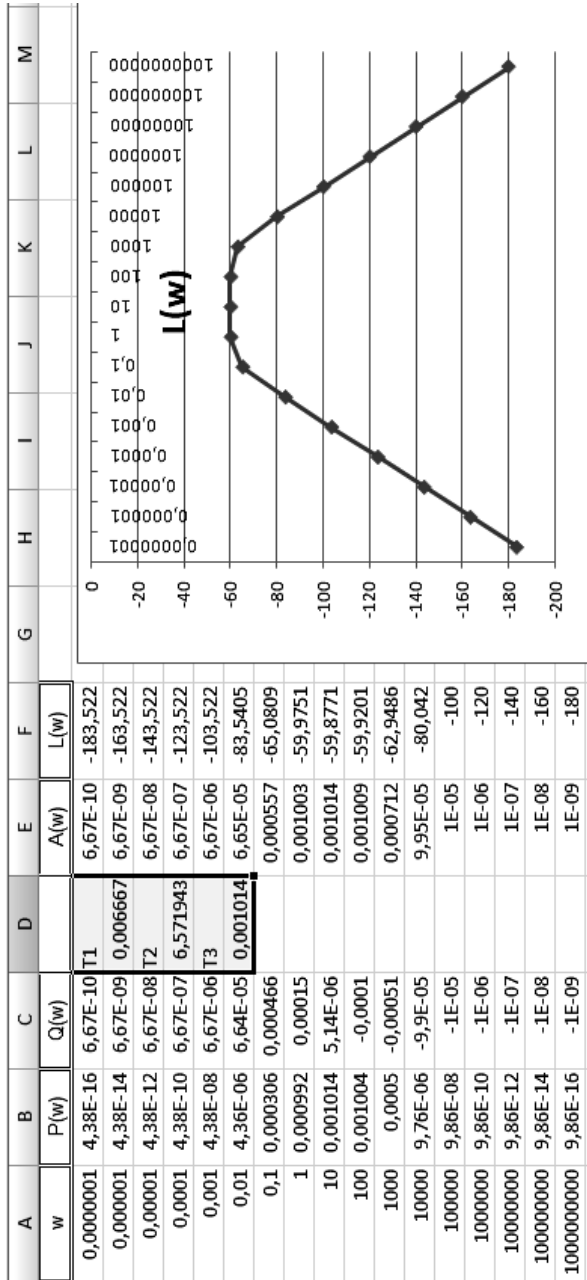
Результаты расчетов в Excel

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----|--------|-------------|-----------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | w | P(w) | Q(w) | | | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | T1 | | | | | | | | |
| 3 | 0.02 | 1,72303E-05 | 0,000131 | 0,006667 | | | | | | | | |
| 4 | 0.04 | 6,558E-05 | 0,000249 | T2 | | | | | | | | |
| 5 | 0.08 | 0,000219714 | 0,000418 | 6,571943 | | | | | | | | |
| 6 | 0.16 | 0,000532746 | 0,000506 | T3 | | | | | | | | |
| 7 | 0.32 | 0,000827477 | 0,000393 | 0,001014 | | | | | | | | |
| 8 | 0.64 | 0,000960293 | 0,000228 | | | | | | | | | |
| 9 | 1.28 | 0,001000435 | 0,000118 | | | | | | | | | |
| 10 | 2.56 | 0,001010996 | 5,75E-05 | | | | | | | | | |
| 11 | 5.12 | 0,001013652 | 2,49E-05 | | | | | | | | | |
| 12 | 10.24 | 0,001014242 | 4,53E-06 | | | | | | | | | |
| 13 | 20.48 | 0,001014081 | -1,4E-05 | | | | | | | | | |
| 14 | 40.96 | 0,001012812 | -3,8E-05 | | | | | | | | | |
| 15 | 81.92 | 0,001007613 | -8,2E-05 | | | | | | | | | |
| 16 | 163.84 | 0,000987302 | -0,000016 | | | | | | | | | |
| 17 | 327.68 | 0,000913625 | -0,00003 | | | | | | | | | |
| 18 | 655.36 | 0,000703602 | -0,000047 | | | | | | | | | |

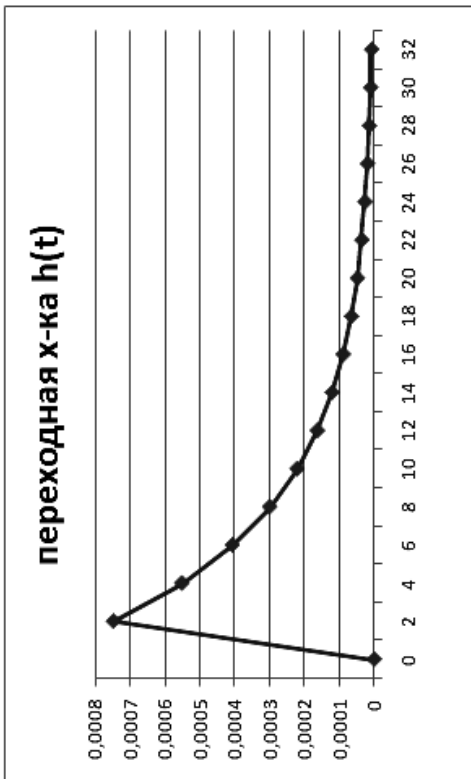


| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----|------|----------|----------|----------|----------|----------|---|---|---|---|---|---|
| 1 | w | P(w) | Q(w) | | A(w) | f(w) | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | 0 | T1 | 0 | #ДЕЛ/0! | | | | | | |
| 3 | 400 | 0,000871 | -0,00035 | 0,006667 | 0,00094 | -0,38509 | | | | | | |
| 4 | 800 | 0,000612 | -0,0005 | T2 | 0,000788 | -0,68155 | | | | | | |
| 5 | 1200 | 0,000409 | -0,0005 | 6,571943 | 0,000644 | -0,88296 | | | | | | |
| 6 | 1600 | 0,000279 | -0,00045 | T3 | 0,000532 | -1,01852 | | | | | | |
| 7 | 2000 | 0,000198 | -0,0004 | 0,001014 | 0,000448 | -1,11277 | | | | | | |
| 8 | 2400 | 0,000146 | -0,00036 | | 0,000385 | -1,181 | | | | | | |
| 9 | 2800 | 0,000112 | -0,00032 | | 0,000337 | -1,23223 | | | | | | |
| 10 | 3200 | 8,79E-05 | -0,00029 | | 0,000299 | -1,27192 | | | | | | |
| 11 | 3600 | 7,08E-05 | -0,00026 | | 0,000268 | -1,30348 | | | | | | |
| 12 | 4000 | 5,81E-05 | -0,00024 | | 0,000243 | -1,32913 | | | | | | |
| 13 | 4400 | 4,85E-05 | -0,00022 | | 0,000222 | -1,35036 | | | | | | |
| 14 | 4800 | 4,11E-05 | -0,0002 | | 0,000204 | -1,36821 | | | | | | |
| 15 | 5200 | 3,52E-05 | -0,00019 | | 0,000189 | -1,38342 | | | | | | |
| 16 | 5600 | 3,05E-05 | -0,00017 | | 0,000176 | -1,39652 | | | | | | |
| 17 | 6000 | 2,67E-05 | -0,00016 | | 0,000164 | -1,40793 | | | | | | |
| 18 | 6400 | 2,35E-05 | -0,00015 | | 0,000154 | -1,41794 | | | | | | |
| 19 | 6800 | 2,09E-05 | -0,00014 | | 0,000146 | -1,42681 | | | | | | |
| 20 | 7200 | 1,87E-05 | -0,00014 | | 0,000138 | -1,43471 | | | | | | |
| 21 | 7600 | 1,68E-05 | -0,00013 | | 0,00013 | -1,44179 | | | | | | |
| 22 | 8000 | 1,52E-05 | -0,00012 | | 0,000124 | -1,44817 | | | | | | |
| 23 | | | | | | | | | | | | |





| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|----|----|----------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | t | h(t) | | | | | | | | | | |
| 2 | 0 | 0 | T1 | | | | | | | | | |
| 3 | 2 | 0,000748 | 0,006667 | | | | | | | | | |
| 4 | 4 | 0,000552 | T2 | | | | | | | | | |
| 5 | 6 | 0,000407 | 6,571943 | | | | | | | | | |
| 6 | 8 | 0,0003 | T3 | | | | | | | | | |
| 7 | 10 | 0,000222 | 0,001014 | | | | | | | | | |
| 8 | 12 | 0,000163 | | | | | | | | | | |
| 9 | 14 | 0,000121 | | | | | | | | | | |
| 10 | 16 | 8,89E-05 | | | | | | | | | | |
| 11 | 18 | 6,56E-05 | | | | | | | | | | |
| 12 | 20 | 4,84E-05 | | | | | | | | | | |
| 13 | 22 | 3,57E-05 | | | | | | | | | | |
| 14 | 24 | 2,63E-05 | | | | | | | | | | |
| 15 | 26 | 1,94E-05 | | | | | | | | | | |
| 16 | 28 | 1,43E-05 | | | | | | | | | | |
| 17 | 30 | 1,06E-05 | | | | | | | | | | |
| 18 | 32 | 7,79E-06 | | | | | | | | | | |



Из графика $h(f)$ определяем на уровне 5% от максимального значения $h = 0,00075$ время регулирования T_p , которое примерно равно 17 с.

Построение логарифмической асимптотической частотной характеристики (ЛАЧХ) делается по виду передаточной функции и изменению текущего угла наклона ЛАЧХ в точках сопряжения. Передаточную функцию нужно перед этим привести к одному из трех возможных видов:

$$W(p) = K \frac{(\rho \cdot T_1 \pm 1) \cdot (\rho \cdot T_2 \pm 1) \cdot \dots \cdot (\rho \cdot T_l \pm 1)}{(\rho \cdot T_m \pm 1) \cdot (\rho \cdot T_n \pm 1) \cdot \dots \cdot (\rho \cdot T_z \pm 1)}; \quad (7.11)$$

$$W(p) = \rho \cdot T \cdot \frac{(\rho \cdot T_1 \pm 1) \cdot (\rho \cdot T_2 \pm 1) \cdot \dots \cdot (\rho \cdot T_l \pm 1)}{(\rho \cdot T_m \pm 1) \cdot (\rho \cdot T_n \pm 1) \cdot \dots \cdot (\rho \cdot T_z \pm 1)}; \quad (7.12)$$

$$W(p) = \frac{1}{\rho \cdot T} \cdot \frac{(\rho \pm \rho_1) \cdot (\rho \pm \rho_2) \cdot \dots \cdot (\rho \pm \rho_l)}{(\rho \pm \rho_m) \cdot (\rho \pm \rho_n) \cdot \dots \cdot (\rho \pm \rho_z)}. \quad (7.13)$$

Количество скобок вида $(\rho \pm \rho_i)$ может быть любым (от 0).

При этом начальный угловой коэффициент наклона определяется так:

– для передаточной функции $W(p)$ вида (7.11) угловой коэффициент наклона равен 0 дБ/дек (децибел на декаду), т.е. ЛАЧХ проходит горизонтально при очень низких частотах ($\omega \rightarrow 0$). Начальное положение ЛАЧХ равно $20 \cdot \lg(K)$, K – из выражения (7.11);

– для вида (7.12) угловой коэффициент наклона равен 20 дБ/дек, т.е. ЛАЧХ вначале при очень низких частотах ($\omega \rightarrow 0$) возрастает. Начальное положение ЛАЧХ неизвестно, т.е. будет построен общий характер изменения ЛАЧХ. В реальном случае кривая будет смещена по вертикали вниз или вверх. Для определения точного начального положения нужен или расчет, или ЛАЧХ проводят, приближая к рассчитанной ЛАЧХ;

– для вида (7.13) угловой коэффициент наклона равен – 20 дБ/дек, т.е. ЛАЧХ вначале при очень низких частотах ($\omega \rightarrow 0$) уменьшает-ся. Начальное положение ЛАЧХ как и в случае (7.12) неизвестно,

т.е. будет построен лишь общий характер изменения ЛАЧХ. В реальном случае кривая будет смещена по вертикали вниз или вверх. Для определения точного начального положения нужен или расчет, или ЛАЧХ проводят, приближая к рассчитанной ЛАХ.

Во всех случаях дальнейшее изменение угла наклона происходит в точках сопряжения. Они определяются для каждой из скобок вида $(\rho \cdot T_i \pm 1)$:

$$\omega_{C i} = \frac{1}{T_i}. \quad (7.14)$$

В каждой из таких частот сопряжения $\omega_{C i}$ происходит изменение текущего угла наклона на ± 20 дБ/дек, причем если скобка из которой определена частота сопряжения $\omega_{C i}$ находится в числителе передаточной функции $W(\rho)$ (7.11)–(7.13), то изменение *текущего* угла наклона ЛАЧХ происходит на $+20$ дБ/дек, а если в знаменателе – на -20 дБ/дек.

В нашем примере находим все частоты сопряжения и расставляем их на оси частот (рис. 7.5):

$$\omega_{C 2} = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{6,571943} = 0,152162 \text{ – из знаменателя,}$$

$$\omega_{C 3} = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{0,001014420} = 98,5784 \text{ – из знаменателя.}$$

Так как передаточная функция относится к виду (7.12), то ее начальный угловой коэффициент наклона равен $+20$ дБ/дек. При частоте $\omega_{C 2}$ он изменится на -20 дБ/дек, так как найден для скобки из знаменателя (показано стрелкой вниз справа от $\omega_{C 2}$), и станет равным $+20 - 20 = 0$ (дБ/дек). В точке $\omega_{C 3}$ он также изменится на -20 дБ/дек и станет равным $0 - 20 = -20$ (дБ/дек). Для построения углов наклона строим вспомогательный прямоугольник со сторонами 1 декада и 20 дБ и проводим диагонали с угловыми коэффициента-

ми наклона $+20$ и -20 дБ/дек. Параллельно этим диагоналям и проводим прямые на ЛАЧХ. Вначале с угловым коэффициентом наклона $+20$ дБ/дек до пересечения со значением частоты ω_{C2} , далее горизонтально с угловым коэффициентом 0 дБ/дек до пересечения с частотой ω_{C3} , после чего с наклоном -20 дБ/дек. Строим ЛАЧХ на графике совместно с ЛАХ (рис. 7.5).

При построении приближаем, перемещая по вертикали, ЛАЧХ к ЛАХ (на полученном рисунке кривая L_a (ЛАЧХ) незначительно смещена вверх от кривой L (ЛАХ) для удобства иллюстрации построения).

Проверяем аналитические расчеты, моделируя САР в Workbench. Для этого составляем общую электрическую принципиальную схему САР и набираем ее в Workbench. Подключаем body plotter для частотного анализа и генератор прямоугольных колебания для получения реакции на прямоугольное ступенчатое воздействие, т.е. для получения формы переходной характеристики. Для примера участок схемы одного из вариантов выглядит так (рис. 7.6).

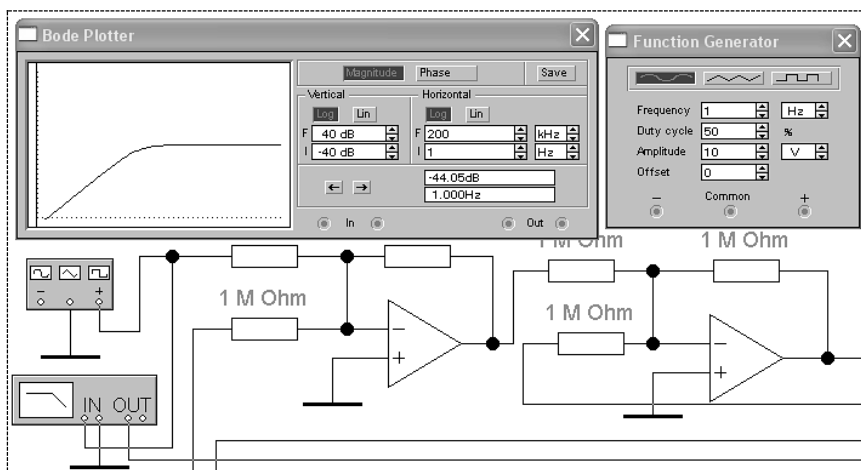


Рис. 7.6. Исследование САР в Workbench

Контрольные вопросы и задания

7.1. Что такое преобразования Лапласа? Приведите выражение для прямого и обратного преобразования Лапласа.

7.2. Поясните графически правила построения логарифмической асимптотической частотной характеристики (ЛАЧХ) для своего задания.

7.3. Приведите графики результатов анализа САР в Workbench и копии экранов выполнения своего задания.

Вопросы для самопроверки

7.1. Какие условия применимости обратного преобразования Лапласа в форме разложения Хевисайда?

7.2. Какие еще программные средства для исследования САР Вам известны?

7.3. Какая из выполненных лабораторных работ является наиболее интересной?

Приложение

ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ELECTRONICS WORKBENCH


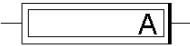
На рис. П1 представлена панель инструментов «Indicators», которая включает в себя элементы индикации, которые можно разместить на схеме. В табл. П1 рассмотрены некоторые из них.




Рис. П1. Панель инструментов «Indicators»

Таблица П1

Описание элементов панели инструментов «Indicators»

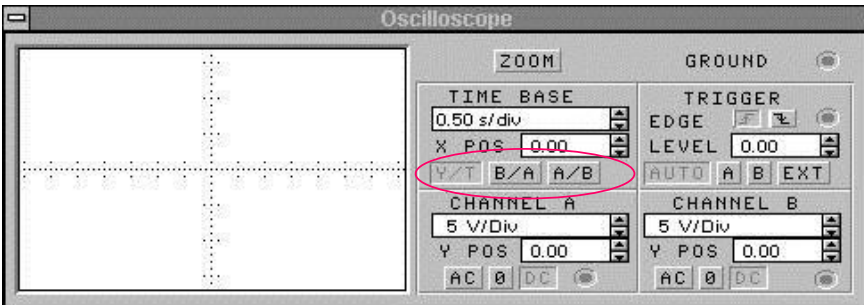
| Наименование элемента | Обозначение элемента на схеме | Краткое описание |
|-----------------------|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| Вольтметр |  | Вольтметр используется для измерения переменного или постоянного напряжения. Выделенная толстой линией сторона прямоугольника соответствует отрицательной клемме. Двойным нажатием левой кнопки мыши на значке вольтметра открывается окно изменения параметров вольтметра: на вкладке «Value» можно задать значение внутреннего сопротивления вольтметра и вид измеряемого напряжения (DC – постоянное, AC – переменное) |
| Амперметр |  | Амперметр служит для измерения переменного или постоянного тока. Выделенная толстой линией сторона соответствует отрицательной клемме. Двойным нажатием левой кнопки мыши по значку амперметра на вкладке «Value» можно задать аналогичные вольтметру параметры |

| 1 | 2 | 3 |
|-----------|---|---|
| Индикатор |  | Индикатор предназначен для определения наличия напряжения и «загорается» красным сигналом, если напряжение существует. В параметрах индикатора на вкладке «Choose Probe» можно задать цвет «свечения» |

Работа с двухлучевым осциллографом в Workbench

Электронный (электронно-лучевой) осциллограф предназначен для визуального наблюдения или фотографирования на экране электронно-лучевой трубки электрических сигналов, а также изменения их временных и амплитудных характеристик.

В Wordbench осциллограф имеет следующий вид:



Осциллограф отображает изменение амплитуды и частоты электронных сигналов. Он имеет два входа: канал А и канал В, таким образом, одновременно могут быть исследованы два различных сигнала. Вы можете использовать осциллограф для получения графического изображения силы сигнала во времени или для сравнения формы двух сигналов.

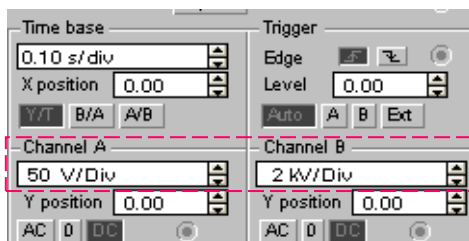
Если вам нужно время для анализа форм сигнала на осциллографе, установите флажок на команде *Pause after each screen* (**Остановка после каждого экрана**) в диалоговом окне *Analysis Options* (**Параметры анализа**). Если вы не видите форму сигнала на осциллографе, переключите триггер в режим *Auto* (**Автоматический**).

Оси осциллографа могут быть переключены из режима отображения амплитуды от времени (Y/T) в режим отображения амплитуды одного из каналов от амплитуды другого (A/B или B/A). В режиме Y/T ось X отображает время, а ось Y – количество вольт на деление. В режимах A/B и B/A обе оси показывают количество вольт на деление. Например, если вы сравниваете вход канала A с каналом B (A/B), шкала оси X определяется количеством вольт на деление (V/Div), установленным для канала B , и наоборот. Установка позиции оси X ($X POS$) определяет начальную точку на оси X . Когда позиция оси $X = 0$, сигнал начинает отображаться от левой границы экрана осциллографа. Положительное значение сдвигает начальную точку вправо, отрицательное – влево.

Установка позиции оси Y ($Y POS$) определяет начальную точку на оси Y . Когда позиция оси $Y = 0$, начальная точка находится на оси X . Значение позиции оси Y может изменяться от -3.00 до 3.00 . Значение 1.50 , например, перемещает начальную точку на середину между осью X и верхней границей экрана осциллографа.

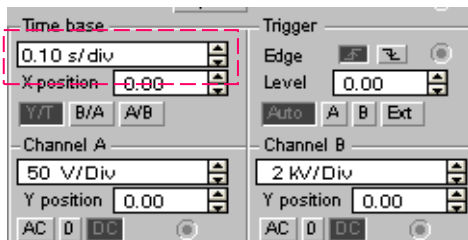
Если вы хотите отделить друг от друга формы сигнала каналов A и B для сравнения или детального рассмотрения их, установите значение $Y POS$ для одного или обоих каналов.

Установка **вольт/деление** (V/Div) определяет шкалу по оси Y . Она также управляет шкалой оси X , когда сравниваются сигналы каналов A и B (A/B или B/A). Можно изменять значение **вольт/деление** от 0.01 мВ/дел до 5.0 кВ/дел. Каждый канал может быть настроен отдельно.



Для получения легко читаемого изображения установите шкалу в зависимости от ожидаемого напряжения на канале. Так, переменный входной сигнал амплитудой $3В$ заполняет экран осциллографа, по вертикали, если ось Y установлена в $1 В/дел$.

Установка развертки по времени управляет шкалой горизонтальной оси (*оси X*) осциллографа, когда отображается амплитуда сигналов во времени (*Y/T*). Значение каждого деления горизонтальной шкалы может изменяться в диапазоне от 0.1 нс (наносекунды) до 0.5 с.



Чтобы получить легко читаемое изображение на экране осциллографа, устанавливайте развертку по времени обратно пропорционально установкам функционального генератора. Например, если вы хотите увидеть один период сигнала с частотой **1 кГц**, установите развертку по времени, равной **0.1 мс** (миллисекунды). Один период сигнала с частотой **10 кГц** требует развертки по времени, равной **0.01 мс**.

Вы можете указать различное подключение осциллографа по входу каждого канала, используя кнопки *AC*, *0* или *DC* (**закрытый вход, выключен, открытый вход**). Для просмотра только переменной составляющей сигнала переключите вход в **закрытый** режим (кнопка *AC*). Для просмотра полного сигнала (и переменной, и постоянной составляющей) переключите вход в **открытый** режим (кнопка *DC*). Установка *0* приводит к отображению прямой линии на уровне начальной точки канала *Y* (*Y POS*).



Точка отсчета для осциллографа в обычном режиме присоединена к заземлению (общему проводу схемы). Вам нет необходимости заземлять осциллограф для получения точных результатов. Однако когда вы пользуетесь осциллографом, сама схема должна быть заземлена.

Кнопка *Zoom* (**Увеличить**) расширяет графический экран осциллографа и перемещает органы управления вниз окна. Вы можете получить конкретные значения линии сигнала перемещением маркеров в желаемую позицию. Окна под экраном показывают время и

изменение сигнала в позициях первого и второго маркеров, а также разницу между этими точками.

Если Вы хотите напечатать изображение на экране осциллографа после его увеличения, выберите «X-Y Plot» (*Печать области экрана*) из диалогового окна *Print* (*Печать*). Хотя удобнее это делать с помощью режима PrintScreen или программой Snagit для копирования экрана или произвольной области экрана и простого редактирования.

Подключения основных устройств в Workbench

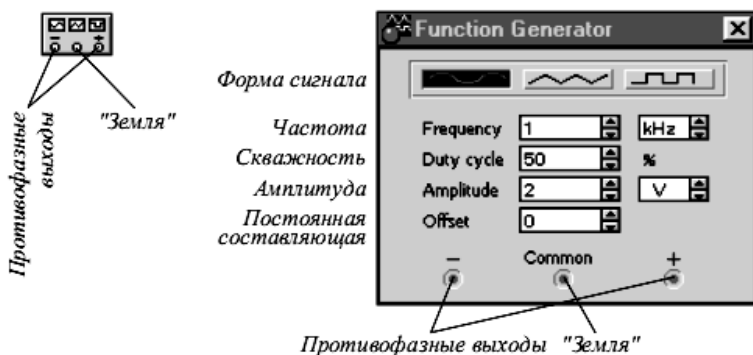


Рис. П2. Функциональный генератор

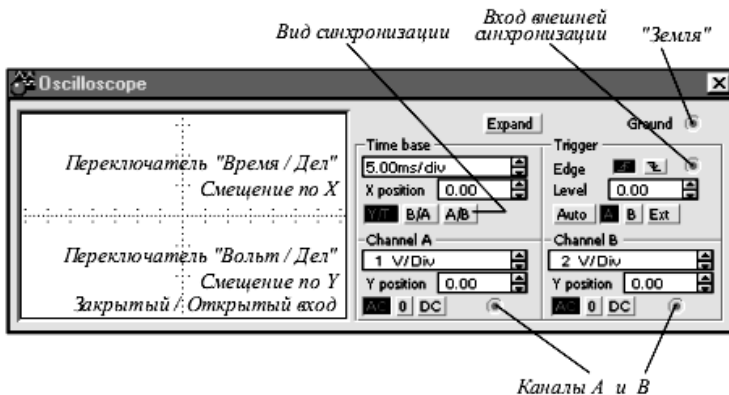
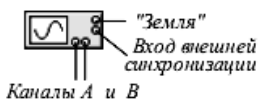


Рис. П3. Двухлучевой осциллограф

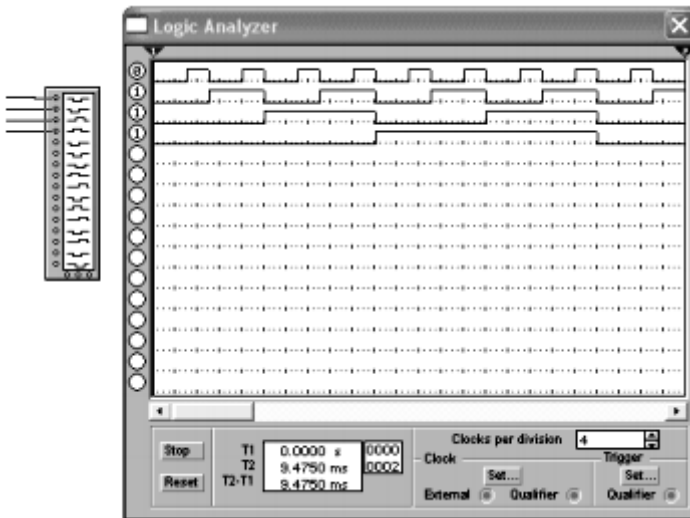


Рис. П4. Логический анализатор

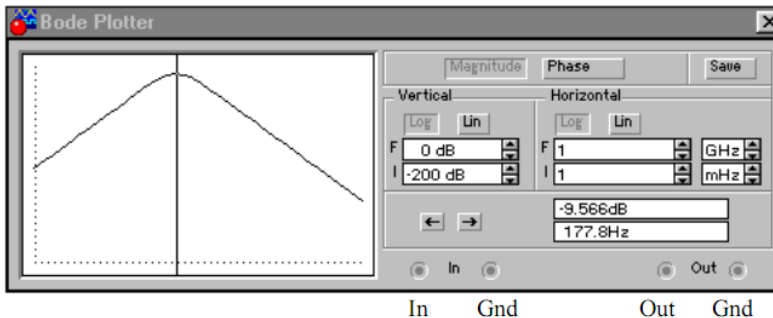


Рис. П5. Измеритель АЧХ–ФЧХ

Предназначен для анализа АЧХ (при нажатой кнопке Magnitude) и ФЧХ (при нажатой кнопке Phase) в логарифмическом (кнопка Log) или линейном масштабе (Lin). Настройка заключается в выборе пределов измерения коэффициента передачи по вертикальной оси и вариации частоты по горизонтали (F – максимальное значение, l – минимальное) (не выше 100 Mhz в наших лабораторных работах!!!). Считывание показаний АФЧ–ФЧХ производится с помощью визирной линии, перемещаемой мышью или кнопками влево-вправо. Входы измерителя In, Out подключаются ко выходу и выходу исследуемого устройства соответственно.

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника / Ю.С. Забродин. – М.: Высшая школа, 1982. – 496 с.
2. Воронов, А.А. Основы теории автоматического управления: учебное пособие / А.А. Воронов. – М.: Энергия, 1980. – 309 с.
3. Ильин, В.А. Телеуправление и телеизмерение: учебное пособие для вузов / В.А. Ильин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 560 с.
4. Гольденберг, Л.М. Импульсные устройства: учебник для вузов / Л.М. Гольденберг. – М.: Радио и связь, 1981. – 224 с.

Дополнительная

5. Основы промышленной электроники / под ред. В.Г. Герасимова: учебник для неэлектротехнических специальностей вузов. – М.: Высшая школа, 1986. – 336 с.
6. Основы автоматического регулирования и управления: учебное пособие для неэлектротехнических специальностей вузов / под ред. В.М. Пономарева и А.П. Литвинова. – М.: Высшая школа, 1974. – 439 с.
7. Гусев, В.Г. Электроника: учебное пособие для вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – М.: Высшая школа, 1982. – 495 с.
8. Степаненко, И.П. Основы микроэлектроники / И.П. Степаненко. – М.: Советское радио, 1980. – 424 с.
9. Пронгишвили, И.В. Микропроцессоры и микроЭВМ / И.В. Пронгишвили. – М.: Энергия, 1979. – 232 с.
10. Лабораторные работы (практикум) по курсу «Электроника, автоматика и телемеханика» для студентов специальности 2404. – Минск: Ротапринт БПИ, 1984. – 48 с.
11. Учебное пособие по курсу «Электроника, автоматика и телемеханика для студентов специальности 1616» / В.В. Мочалов [и др.]. – Минск: Ротапринт БПИ, 1984. – 76 с.
12. Комплекс технических средств «Электроника МС 0401». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Минск: БелНИИНТИ, 1985.

13. Печерский, М.П. Автоматизированные системы управления дорожным движением в городах / М.П. Печерский, Б.Г. Хорович. – М.: Транспорт, 1979. – 176 с.
14. Поляк, Д.Г. Электроника автомобильных систем управления / Д.Г. Поляк, Ю.К. Есенеvский-Лашков. – М.: Машиностроение, 1987. – 200 с.
15. Бела Буна. Электроника на автомобиле / Бела Буна. – М.: Транспорт, 1979. – 192 с.
16. Бортовые автомобильные системы управления автомобилем / В.Н. Ветлинский [и др.]. – М.: Транспорт, 1984. – 189 с.
17. Дистанционный контроль скорости движения транспортных средств / Ю.М. Егоров [и др.]. – М.: Транспорт, 1987. – 271 с.
18. Захаров, В.Н. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация / В.Н. Захаров, Д.А. Поспелов, В.Е. Хазацкий. – М.: Энергия, 1977. – 424 с.
19. Рогинский, В.Н. Основы дискретной автоматики / В.Н. Рогинский. – М.: Связь, 1975.
20. Основы импульсной и цифровой техники: учебное пособие для вузов / В.В. Гусев [и др.]. – М.: Советское радио, 1975. – 440 с.
21. Основы теории автоматического регулирования: учебник для машиностроительных вузов / В.И. Крутов [и др.]. – М.: Машиностроение, 1984. – 368 с.
22. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1977. – 832 с.
23. Электронная автоматика и техника: лабораторные работы (практикум): в 2 ч. / В.В. Мочалов. – Минск: БНТУ, 2004. – Ч. 1: Основные элементы электронной автоматики и техники. – 60 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Лабораторная работа № 1 ОСНОВЫ РАБОТЫ В СРЕДЕ ELECTRONICS WORKBENCH. ИЗМЕРЕНИЕ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ЭЛЕКТРОНИКИ | 3 |
| Лабораторная работа № 2 ИЗМЕРЕНИЕ ВАХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ | 11 |
| Лабораторная работа № 3 ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЕНСАЦИОННЫХ СТАБИЛИЗАТОРОВ НАПРЯЖЕНИЯ | 17 |
| Лабораторная работа № 4 РС-ГЕНЕРАТОРЫ НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ | 26 |
| Лабораторная работа № 5 МИНИМИЗАЦИЯ ЦИФРОВЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ .. | 36 |
| Лабораторная работа № 6 ЦИФРОВЫЕ СЧЕТЧИКИ ИМПУЛЬСОВ | 48 |
| Лабораторная работа № 7 РАСЧЕТ ЧАСТОТНЫХ И ПЕРЕХОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ | 56 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ ОПИСАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ELECTRONICS WORKBENCH | 81 |
| ЛИТЕРАТУРА | 87 |

Учебное издание

ЭЛЕКТРОННАЯ АВТОМАТИКА И ТЕХНИКА

Лабораторные работы (практикум)
для студентов специальностей
1-44 01 01 «Организация перевозок и управление
на автомобильном и городском транспорте»
и 1-44 01 02 «Организация дорожного движения»

В 2 частях

Часть 2

Работа в среде Electronics Workbench

Составитель
МОЧАЛОВ Валерий Вениаминович

Редактор Л.Н. Шалаева
Технический редактор О.В. Дубовик
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

Подписано в печать 29.09.2009.

Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная.

Отпечатано на ризографе. Гарнитура Таймс.

Усл. печ. л. 5,23. Уч.-изд. л. 4,09. Тираж 100. Заказ 1085.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.

ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009.

Проспект Независимости, 65. 220013, Минск.