

# **САПР В ЗАДАЧАХ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

Министерство образования и науки Российской Федерации  
ГОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет»

# САПР В ЗАДАЧАХ КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Методические указания  
по выполнению лабораторных работ для  
студентов специальности 210201 и магистрантов направления 551100



---

Тамбов  
Издательство ТГТУ  
2007

УДК 004.896

ББК П844-02-5-05я73-5  
Т985

Утверждено Редакционно-издательским советом ТГТУ

Р е ц е н з е н т

Доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой  
«Переработка полимеров и упаковочное производство» ТГТУ  
*П.С. Беляев*

Т985 САПР в задачах конструкторского проектирования : метод. указания / сост. И.В. Тюрин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2007. – 56 с. – 100 экз.

Рассмотрены основные программные средства САПР и их применение в задачах конструкторского проектирования, задачи компоновки радиоэлектронных средств.

Предназначены студентам специальности 210201 всех форм обучения для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Системы автоматизированного проектирования», магистрантам направления 551100 для освоения курса «Математическое обеспечение САПР» и выполнения лабораторных работ, а также студентам дистанционной формы обучения и экстерната.

УДК 004.896

ББК П844-02-5-05я73-5

© ГОУ ВПО «Тамбовский государственный  
технический университет» (ТГТУ), 2007

Учебное издание

**САПР В ЗАДАЧАХ  
КОНСТРУКТОРСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Методические указания

С о с т а в и т е л ь

ТЮРИН Илья Вячеславович

Редактор Т.М. Глинкина

Компьютерное макетирование Т.Ю. Зотовой

Подписано в печать 28.02.2007

Формат 60×84/16. 3,25 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 163

Издательско-полиграфический центр ТГТУ  
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

В первых двух лабораторных работах исследуются три вида пакетов прикладных САПР (AutoCAD, Schemagee и TDD), предназначенных для разработки и оформления конструкторской документации в соответствии с ГОСТ. В соответствии с полученным заданием в лабораторной работе 1 необходимо представить электрическую принципиальную схему в графическом виде с помощью программы Schemagee и разработать перечень элементов схемы с использованием программы TDD или AutoCAD (в зависимости от варианта) в лабораторной работе 2.

В лабораторных работах 3 – 5 изучаются наиболее распространенные алгоритмы решения задачи компоновки радиоэлектронных средств (РЭС). Компоновкой называется процесс перехода от схемы РЭС к конструктивному распределению (разбиению) всех элементов на группы, соответствующие конструктивам различных уровней (микросхемы, типовые элементы замены, блоки, стойки и т.д.). Задача компоновки включает три основных этапа:

- 1) типизация – разбиение схемы на конструктивные элементы различных типов;
- 2) покрытие – преобразование исходной схемы в схему соединения элементов;
- 3) разрезание – разбиение исходной схемы на части.

В данной серии работ рассматривается разрезание исходной схемы (структурной, функциональной, принципиальной) на части, т.е. задача разбиения.

В лабораторных работах 6 и 7 рассматриваются наиболее распространенные алгоритмы решения задачи размещения радиоэлектронных средств (РЭС). Размещение представляет собой проектную процедуру, заключающуюся в определении расположения заданного множества элементов в монтажном пространстве. При проектировании РЭС решаются задачи размещения дискретных элементов и микросхем на печатной плате, компонентов в кристалле интегральных схем, типовых элементов замены в блоках, блоков в стойках и т.д. В результате решения задачи размещения повышается надежность изделия в целом, уменьшаются размеры конструктивных единиц и длина проводных соединений, минимизируются взаимные наводки компонентов РЭС, задержки сигналов и т.п. В данных лабораторных работах под размещением понимается определение расположения множества электронных компонентов РЭС в монтажном пространстве печатной платы. От полученных результатов решения задачи размещения во многом зависит эффективность последующей задачи конструкторского проектирования функционального узла на печатном монтаже – трассировки.

В лабораторных работах 8 и 9 рассматриваются наиболее распространенные алгоритмы решения задачи трассировки печатных плат. Трассировка является наиболее ответственной задачей проектирования функционального узла на печатном монтаже и заключается в соединении между собой контактов РЭС электрической цепью, при этом критерий качества соединений должен достигать экстремального значения и выполняться необходимые технологические ограничения. Данная серия работ предусматривает решение задач трассировки с использованием наиболее распространенных алгоритмов – волнового (Ли) и лучевого (Абрайтиса).

Все лабораторные работы должны быть оформлены в соответствии с требованиями ГОСТ по оформлению текстовой документации и представлены в бумажном и электронном виде. Отчет по лабораторной работе должен включать следующие обязательные разделы:

- название лабораторной работы;
- цель работы;
- исходные данные;
- методические указания по выполнению работы;
- ход выполнения работы с представлением необходимых расчетов, рисунков и таблиц;
- выводы по результатам работы;
- список использованной литературы.

### **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1**

#### **Разработка электрических принципиальных схем с использованием пакета программ Schemagee**

*Цель работы.* Ознакомиться с пакетом программ Schemagee, изучить и освоить основные инструментальные средства для разработки и оформления электрических принципиальных схем в соответствии с требованиями ГОСТ.

*Исходные данные.* Схема электрическая принципиальная (25 – 30 элементов).

Требуется с использованием средств программы Schemagee представить ее в графическом виде в соответствии с требованиями ГОСТ по оформлению электрических принципиальных схем.

#### **Методические указания по выполнению работы**

Schemagee – это отечественная программа, разработанная группой разработчиков GeeTeeSoft, распространяемая ЗАО «ЭлекТрейд-М» (Москва), предназначенная для создания электрических принципиальных схем, удовлетворяющих требованиям ГОСТ. При разработке схем используются библиотеки электронных компонентов, создаваемые в программе Schemagee, и библиотеки, импортируемые из различных САПР электронных устройств. Также существует возможность импорта готовых схем из систем P-CAD и Protel для их дальнейшего преобразования в соответствии с отечественными стандартами. На основе созданной схемы программа позволяет сформировать список соединений, который можно использовать для разработки печатной платы в предназначенной для этого САПР.

Программа работает с двумя типами документов. Первый тип – это электрическая принципиальная схема (далее схема), представляющая собой графический конструкторский документ, на котором показаны в виде условных изображений или обозначений составные части изделия и связи между ними. Схема хранится в файле с расширением \*.sdd. Вторым типом документа является библиотека электронных компонентов (далее библиотека). Библиотека содержит используемые при по-

строении схемы условные графические обозначения (УГО) электронных компонентов. Для хранения библиотеки предназначен файл с расширением \*.lsg.

Для установки различных параметров схемного редактора выберите в меню «*Настройка*» команду «*Параметры*». Новая схема создается при выборе в меню «*Файл*» команды «*Создать схему*». Схема может выполняться на одном или нескольких листах. Чертеж каждого листа схемы должен содержать: внешнюю рамку, размеры которой определяют формат листа; основную надпись; основные объекты схемы – элементы и связи между ними, реализованные различными способами; схемы внутренних блоков; графические примитивы; таблицы.

Для изменения формата листа схемы выберите команду «*Формат*» в меню «*Документ*». В диалоговом окне *Формат* выполните следующие действия.

1. Выберите обозначение основного формата по ГОСТ 2.301.
2. Укажите кратность основного формата в списке «*Кратность*», если нужно установить один из дополнительных форматов по ГОСТ 2.301.
3. Измените размеры формата, если в списке «*Обозначение*» была выбрана строка «*другой*».
4. Выберите ориентацию листа схемы. Для заполнения граф основной надписи выберите команду «*Основная надпись*» в меню «*Документ*» или дважды щелкните на области основной надписи в изображении документа. В диалоговом окне *Основная надпись* заполните необходимые поля.

Элемент – это УГО электронного компонента. Для добавления элемента на схему выполните следующие действия. Выберите в меню «*Добавление*» команду «*Элемент*». В диалоговом окне *Добавление элемента* установите необходимые параметры. После выбора элемента и нажатия кнопки *ОК* в диалоговом окне включается режим добавления элементов. Фиксируйте положение каждой новой копии выбранного элемента щелчком левой кнопки мыши. При перемещении элемента можно его поворачивать и делать зеркальное отображение. Чтобы прервать добавление элементов, нажмите правую кнопку мыши.

Линии связи предназначены для изображения на схеме электрических цепей. Для добавления линий связи (построения сегментов цепей) выполните следующие действия. Включите режим добавления линий связи, для чего выберите в меню «*Добавление*» команду «*Линии связи*» или нажмите кнопку на панели инструментов. Отметьте щелчком левой кнопки мыши начальную точку первой линии связи сегмента цепи. Каждым последующим щелчком левой кнопки мыши добавляйте очередную линию в сегмент цепи. Чтобы рисовать линии связи под прямым или произвольным углом, включите или отключите режим ОРТО. Для прекращения построения сегмента цепи нажмите правую кнопку мыши.

Дополнительная информация по работе с программой содержится во встроенной интерактивной справке, вызываемой по нажатию клавиши *F1*.

#### СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Оформленная в соответствии с ГОСТ схема электрическая принципиальная.
4. Вывод по результатам работы.
5. Список использованной литературы.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначена программа Shemagee?
2. Перечислите основные функциональные возможности программы.
3. С какими типами конструкторских документов работает программа?
4. Какой порядок работы с программой?

#### Лабораторная работа 2

Оформление конструкторской документации с использованием пакета программ AutoCad и TDD

*Цель работы.* Ознакомиться с пакетами программ AutoCAD и TDD, изучить и освоить основные инструментальные средства для разработки и оформления конструкторской документации в соответствии с требованиями ГОСТ.

*Исходные данные.* Схема электрическая принципиальная (25 – 30 элементов), оформленная в виде графического конструкторского документа в ходе выполнения лабораторной работы 1.

Требуется с использованием средств программы AutoCAD (или TDD), в зависимости от варианта, оформить в графическом виде перечень элементов схемы в соответствии с требованиями ГОСТ по оформлению конструкторской документации.

#### Методические указания по выполнению работы

AutoCAD – это многофункциональное средство САПР для разработки конструкторской документации различного рода (схемы электрические принципиальные, функциональные, структурные, сборочные чертежи, спецификации, перечни элементов и т.п.). Правила работы с AutoCAD рассмотрены в [3, 4].

TDD – это отечественная программа, разработанная группой разработчиков GeeTeeSoft, распространяемая ЗАО «Электрейд-М» (Москва), предназначенная для формирования текстовой конструкторской документации для проектов, разработанных в различных САПР электронных устройств (Schemagee, P-CAD, PADS PowerPCB, OrCAD, Protel, CircuitMaker, Allegro). В комплект формируемых документов входят: перечень элементов; групповой перечень элементов; спецификация; групповая спецификация (варианты А и Б); ведомость покупных изделий; групповая ведомость покупных изделий. TDD позволяет не только изменять предоставляемые стандартные формы перечисленных выше документов, но и создавать новые.

Главной особенностью программы является возможность автоматизировать процесс разработки текстового документа. Для обеспечения этой возможности требуется предварительная подготовка дополнительной информации о компонентах (наименование компонента, обозначение документа на поставку и т.д.) в системе проектирования или наличие базы данных, содержащей такую информацию. TDD позволяет извлекать сведения о компонентах из всех систем проектирования, поддерживающих генерацию выходных данных в виде списка используемых материалов (Bill of Materials, BOM) в формате CSV (Comma Separated Value). С системой

P-CAD (ACCEL EDA) также возможно взаимодействие через интерфейс DBX или файлы схем (SCH) и печатных плат (PCB) формата ASCII.

Для создания нового конструкторского документа выберите команду «Создать» в меню «Файл». Для создания документа на основе шаблона выберите необходимый тип в списке «Шаблон документа». Чтобы создать новый документ, установите флажок *Новый документ*. При создании нового документа необходимо установить в диалоговом окне *Новый документ* параметры главной таблицы документа: количество строк таблицы на первом листе документа; количество строк таблицы на последующих листах документа; высота строки таблицы.

Для изменения формата листа документа выберите команду «Формат» в меню «Документ». В диалоговом окне *Формат* выполните следующие действия.

1. Выберите тип формата, укажите размеры и ориентацию.
2. Установите флажки видимости всей форматки (рамок, основной надписи и дополнительных граф), внешней рамки и надписей «Копировал», «Формат».

Для заполнения граф основной надписи выберите команду «Основная надпись» в меню «Документ» или дважды щелкните на области основной надписи в изображении документа. Для задания высоты текста, отображаемого в графах основной надписи, вызовите соответствующее диалоговое окно, нажав кнопку «Высота текста».

Текстовый конструкторский документ всегда содержит таблицу с номером 1 для внесения основной информации. Эта таблица является главной. Чтобы добавить новую таблицу, выберите в меню «Добавление» команду «Таблица».

Чтобы добавить лист с очередной страницей главной таблицы, выполните одно из следующих действий: выберите в меню «Документ» команду «Добавить лист»; нажмите комбинацию клавиш CTRL + L; установите курсор мыши в области закладки текущего листа, нажмите правую кнопку мыши и выберите в контекстном меню команду «Добавить».

Дополнительная информация по работе с программой содержится во встроенной интерактивной справке, вызываемой по нажатию клавиши F1.

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Оформленный в соответствии с ГОСТ перечень элементов схемы электрической принципиальной.
4. Вывод по результатам работы.
5. Список использованной литературы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего предназначена программа AutoCAD?
2. Какие основные функциональные возможности программы AutoCAD?
3. С какими типами конструкторских документов работает программа TDD?
4. Какой порядок работы с программой TDD?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### Решение задачи разбиения последовательным алгоритмом

*Цель работы.* Ознакомиться с последовательным алгоритмом и решить задачу компоновки путем представления графа, соответствующего электрической принципиальной схеме, матрицей смежности и определить число внешних связей между скомпонованными частями.

*Исходные данные.* Схема электрическая принципиальная, представленная мультиграфом  $G(V, R)$  с числом вершин (мощностью)  $|V|$ .

Требуется получить вариант задания и разбить исходную схему на  $n = 3$  части, количеством вершин в каждой части  $N_1$ ,  $N_2$  и  $N_3$  задаться самостоятельно.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

В соответствии с заданием требуется разрезать (разбить) граф  $G(V, R)$  на  $n$  частей  $G_1(V_1, R_1), \dots, G_n(V_n, R_n)$  с  $N_i$  вершинами в каждой так, чтобы число ребер, соединяющих вершины разных частей, было минимальным, т.е. критерий оптимальности

$$Q = \sum_{i,j=1}^n |R_{i,j}| \rightarrow \min_{v_1, \dots, v_n},$$

где  $|R_{i,j}|$  – мощность множества ребер  $R_{i,j}$ , инцидентных частям  $G_i(V_i, R_i)$  и  $G_j(V_j, R_j)$ .

При этом должны выполняться следующие ограничения на компоновку: число вершин в каждой части должно быть задано; одна вершина должна принадлежать лишь одной части; объединение всех частей должно быть равно исходному графу.

Сущность последовательного алгоритма состоит в поочередной компоновке частей графа от первой до последней. При формировании  $j$ -й части  $G_j(V_j, R_j)$  из рассматриваемого множества  $V \setminus \bigcup_{i=1}^{j-1} v_i$  вершин выбирается  $v^{(j)}$ , имеющая минимальную степень  $S(v^{(j)})$ . К вершине  $v^{(j)}$  добавляются смежные с ней вершины, в результате образуется подмножество  $V_{(j)}$ , мощность которого сопоставляется с требуемым числом  $N_j$ . Если  $|V_{(j)}| = N_j$ , то добавляется или удаляется необходимое число вершин, затем переходят к формированию следующей  $(j+1)$ -й части и т.д.

Рассмотрим основные этапы последовательного алгоритма компоновки.

1. Исходный мультиграф  $G(V, R)$  представляется матрицей смежности  $S$ .

2. Выбирается вершина  $v^{(1)}$ , степень которой минимальна, т.е.  $S(v^{(1)}) = \min_v \{S(v), v \in V\}$ . Если вершин с минимальной

степенью несколько, то выбирается вершина с максимальным числом кратных ребер.

3. Формируется первоначальное подмножество вершин  $V_{(1)}$  для первой части, в которое включается вершина  $v^{(1)}$  и смежные с ней вершины.

4. На основе подмножества  $V_{(1)}$  образуется множество вершин  $V_1$ , первой части. Если мощность полученного подмножества равна заданному числу вершин первой части, т.е.  $|V_{(1)}| = N_1$ , то  $V_1 = V_{(1)}$ . В случае  $|V_{(1)}| > N_1$  необходимое число вершин удаляется, а при  $|V_{(1)}| < N_1$  – добавляется. В результате компонуется первая часть  $G_1(V_1, R_1)$ .

5. Из графа  $G(V, R)$  удаляется сформированная часть  $G_1(V_1, R_1)$ .

Для оставшегося графа  $G(V, R) / G_1(V_1, R_1)$  аналогично выделяется вторая часть  $G_2(V_2, R_2)$  и т.д.

Наибольшую трудность выполнения работы представляют расчеты четвертого этапа для случая  $|V_{(1)}| \neq N_1$ . Чтобы определить, какую вершину  $v$

удалять из  $V_{(1)}$  (или добавлять к  $V_{(1)}$ ), для каждой вершины  $v_i \in V_{(1)}$  (или  $v \in V / V_{(1)}$ ) определяется ее относительный вес

$$\delta(v_i) = S(v_i) - \sum_{j \in J_1} S_{i,j},$$

где  $S(v)$  – степень вершины  $v$ ;  $J_1$  – множество номеров вершин  $v_i \in V_{(1)}$ . Относительный вес  $\delta(v)$  вершины  $v$  характеризует приращение числа внешних ребер части  $G_1(V_1, R_1)$  при включении вершины  $v$  в часть  $V_1$ . Из множества вершин  $V_1$  удаляется вершина, для которой вес  $\delta(v)$  максимален, или добавляется вершина  $v \in V / V_{(1)}$  с минимальным значением  $\delta(v)$ .

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные согласно варианту.
4. Представление исходного графа матрицей смежности.
5. Выполнение этапов последовательного алгоритма разбиения графа.
6. Расчет критерия оптимальности.
7. Вывод по результатам работы.
8. Список использованной литературы.

## Контрольные вопросы

1. В каком порядке составляется матрица смежности?
2. Что понимается под степенью вершины?
3. Какие основные ограничения накладываются на компоновку вершин?
4. Что характеризует относительный вес вершины?
5. Какой параметр определяет эффективность решения задачи компоновки последовательным алгоритмом?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### Решение задачи разбиения последовательно-итерационным алгоритмом

*Цель работы.* Ознакомиться с последовательно-итерационным алгоритмом разбиения и решить задачу компоновки путем представления графа, соответствующего электрической принципиальной схеме, матрицей смежности и определить число внешних связей между скомпонованными частями.

*Исходные данные.* В качестве исходных данных используются результаты лабораторной работы 3, т.е. схема электрическая принципиальная, заданная в виде мультиграфа  $G(V, R)$  с числом вершин (мощностью)  $|V|$ , разбитая на  $n = 3$  части последовательным алгоритмом.

Требуется провести итерационное улучшение и сравнить число внешних связей между скомпонованными частями, полученное в результате выполнения последовательного алгоритма, с числом внешних связей после применения итерационного алгоритма.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОТЫ

В соответствии с заданием требуется разрезать (разбить) граф  $G(V, R)$  на  $n$  частей  $G_1(V_1, R_1), \dots, G_n(V_n, R_n)$  с  $N_i$  вершинами в каждой так, чтобы число ребер, соединяющих вершины разных частей, было минимальным, т.е. критерий оптимальности



$$Q = \sum_{i,j=1}^n |R_{i,j}| \rightarrow \min_{v_1, \dots, v_n},$$

где  $|R_{i,j}|$  – мощность множества ребер  $R_{i,j}$ , инцидентных частям  $G_i(V_i, R_i)$  и  $G_j(V_j, R_j)$ .

При этом должны выполняться следующие ограничения на компоновку: число вершин в каждой части должно быть задано; одна вершина должна принадлежать лишь одной части; объединение всех частей должно быть равно исходному графу.

Для последовательно-итерационного алгоритма решения задачи компоновки первоначальное формирование частей графа производится не произвольно, а приближенно к оптимальному группированию на основе простых операций последовательного алгоритма, что позволяет затем относительно небольшим числом итераций получить окончательное решение. С помощью этого алгоритма решение задачи компоновки осуществляется в два этапа. На первом используется процедура последовательного алгоритма, т.е. производится быстрое формирование частей, близких к оптимальному решению, а на втором реализуются процедуры итерационного алгоритма.

Принцип работы итерационного алгоритма основан на перестановке вершин или группы вершин из одной части графа в другую до тех пор, пока не будет получено минимальное число связей между частями.

В общем случае алгоритм состоит из двух этапов:

1) вспомогательный этап, предусматривающий начальное разбиение графа, например, разделение матрицы смежности на части;

2) основной этап, в ходе которого производится итерационное улучшение решения на основе парного или группового обмена вершин из различных частей.

Рассмотрим алгоритм на примере решения задачи разбиения графа  $G(V, R)$  с числом вершин (мощностью)  $|V| = 8$  на  $n = 3$  части, с количеством вершин в каждой части  $N_1 = 2$ ;  $N_2 = 3$  и  $N_3 = 3$  соответственно (рис. 1).

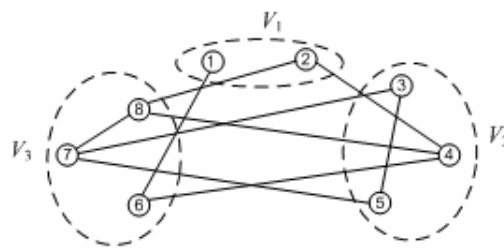


Рис. 1. Исходный граф

**Этап 1.** Исходный граф  $G(V, R)$  представляется матрицей смежности  $S$  с размерностью  $m \times m$ , где  $m$  – мощность вершин графа:  $m = |V|$ .

$v$	1	2	3	4	5	6	7	8	
$V_1$	0	0	0	0	0	1	0	0	$V_1$
$V_1$	0	0	0	1	0	0	0	1	
$V_2$	0	0	0	0	1	0	1	0	$V_2$
$V_2$	0	1	0	0	0	1	0	1	
$V_2$	0	0	1	0	0	0	1	0	
$V_3$	1	0	0	1	0	0	0	0	$V_3$
$V_3$	0	0	1	0	1	0	0	1	
$V_3$	0	1	0	1	0	0	1	0	
	$V_1$	$V_2$	$V_3$						

При решении задачи используем критерий оптимальности — минимум связей между частями. Блоки матрицы сверху вниз следует располагать по мере увеличения их размерности. Для нашего примера внешних связей семь, т.е.  $Q = 7$ . Разбиение графа в соответствии с выбранным критерием тем лучше, чем больше связей сосредотачивается в диагональных блоках матрицы.

Поэтому вместо минимизации числа связей между частями можно максимизировать суммарное число ребер внутри всех частей графа  $G(V, R)$ . Полученный таким образом критерий оптимальности примет вид:

$$Q = \sum_{j=1}^l \sum_{i=1}^l \alpha_i^j, \quad \alpha_i^j = \begin{cases} 1, r_i^j \in R_{jj}; \\ 0, r_i^j \notin R_{jj}, \end{cases}$$

где  $r_i^j$  –  $i$ -е ребро  $j$ -й части;  $R_{jj}$  – подмножество «внутренних» ребер части  $G_j(V_j, R_j)$ ;  $l$  – число частей.

**Этап 2.** В ходе выполнения этого этапа при каждой итерации выполняются следующие операции:

1. Подсчитываются перестановочные коэффициенты  $\Delta R(v_i, v_j)$  при  $v_i \in V_p, v_j \in V_q$  для пар вершин, принадлежащих различным частям и характеризующих изменение числа соединительных ребер  $|R_{pq}|$  между частями  $G_p$  и  $G_q$  в результате перестановки вершин  $v_i$  и  $v_j$ .

2. Отбираются пары вершин с максимальным значением  $\Delta R$ , перестановка которых уменьшает число связей между частями. При этом  $\Delta R(v_i, v_j) > 0$ .

3. Производится перестановка вершин и строится матрица  $S$ .

4. Итерации заканчиваются, когда все коэффициенты  $\Delta R$  принимают отрицательные значения или равны нулю, т.е.  $\Delta R(v_i, v_j) \leq 0$ .

Расчет коэффициентов  $\Delta R(v_i, v_j)$  является наиболее сложной частью алгоритма, их оценка производится по формуле

$$\Delta R(v_i, v_j / v_i \in V_p, v_j \in V_q) = \Delta S_{qp}(v_i) + \Delta S_{pq}(v_j) - 2S_{ij}, \quad (1)$$

$$\Delta S_{qp}(v_i) = \sum_{k \in J_q} S_{ik} - \sum_{k \in J_p} S_{ik},$$

$$\Delta S_{pq}(v_j) = \sum_{k \in J_p} S_{jk} - \sum_{k \in J_q} S_{jk},$$

где  $\Delta S_{qp}(v_i)$ ,  $\Delta S_{pq}(v_j)$  – числа связности вершин  $v_i$  и  $v_j$ ;  $J_p, J_q$  – множества номеров вершин частей  $V_p$  и  $V_q$  соответственно.

Величина  $\Delta S_{qp}(v_j)$  характеризует разность числа связей вершины  $v_i \in V_p$  с вершинами  $v_j \in V_q$  и с вершинами  $V_p / v_j$ .

Расчет  $\Delta R(v_i, v_j)$  рекомендуется проводить в следующей последовательности. Сначала определяется матрица  $\Delta R_1$  перестановочных коэффициентов для вершин первой части, имеющая размерность  $N_1 \times (m - N_1)$ . Для нашего примера эта матрица имеет вид

$$\Delta R_1 = \begin{matrix} & V & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{matrix} r_{13} & r_{14} & r_{15} & r_{16} & r_{17} & r_{18} \\ r_{23} & r_{24} & r_{25} & r_{26} & r_{27} & r_{28} \end{matrix} \end{matrix} = \begin{matrix} & V & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \end{matrix} & \begin{matrix} -1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & -1 \end{matrix} \end{matrix},$$

где, в частности,

$$\begin{aligned} r_{13} &= \Delta R(v_1, v_3 / v_1 \in V_1, v_3 \in V_2) = \Delta S_{21}(v_1) + \Delta S_{12}(v_3) - 2S_{13} = \\ &= \sum_{k \in \{3,4,5\}} S_{1k} - \sum_{k \in \{1,2\}} S_{1k} + \sum_{k \in \{3,4,5\}} S_{3k} - \sum_{k \in \{3,4,5\}} S_{3k} - 2S_{13} = 0 - 0 + 0 - 1 - 0 = -1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r_{26} &= \Delta R(v_2, v_6 / v_2 \in V_1, v_6 \in V_3) = \Delta S_{31}(v_2) + \Delta S_{13}(v_6) - 2S_{26} = \\ &= \sum_{k \in \{6,7,8\}} S_{2k} - \sum_{k \in \{1,2\}} S_{2k} + \sum_{k \in \{6,7,8\}} S_{6k} - \sum_{k \in \{6,7,8\}} S_{6k} - 2S_{26} = 1 - 0 + 1 - 0 - 0 = 2. \end{aligned}$$

Аналогично рассмотренным по формуле (1) вычисляются и остальные коэффициенты матрицы.

Затем определяются пары вершин, имеющих положительный знак  $\Delta R$ . В рассматриваемом примере таковыми являются  $\{v_1, v_4\}$ ,  $\{v_1, v_8\}$  и  $\{v_2, v_6\}$ . Для пары вершин  $\{v_2, v_6\}$  значение  $\Delta R$  максимально, поэтому в матрице смежности вершины  $v_2$  и  $v_6$  меняются местами.

$$S = \begin{matrix} & V & 1 & 6 & 3 & 4 & 5 & 2 & 7 & 8 \\ \begin{matrix} 1 \\ 6 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 2 \\ 7 \\ 8 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{matrix} \end{matrix} \begin{matrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{matrix}$$

По измененной матрице  $S$  строится граф (рис. 2).

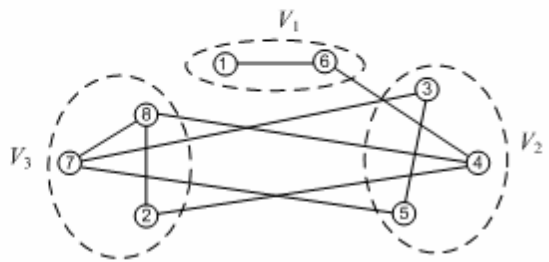


Рис. 2. Граф после первой итерации

Перестроенная матрица смежности имеет вид

Как видно из рис. 2, после первой итерации число внешних связей уменьшилось на две: с  $Q_0 = 7$  до  $Q_1 = 5$ .

В случае отсутствия положительных компонентов матрицы  $\Delta R_1$  строится матрица  $\Delta R_2$  размерностью  $N_2 \times (m - (N_1 + N_2))$ , по которой определяется возможность перестановки вершин  $v_i$  с вершинами  $v \in V / V_1 \cup V_2$ . Если матрица  $\Delta R_2$  не содержит положительных компонентов, то переходят к рассмотрению  $\Delta R_3$  и т.д. Решение задачи заканчивается, когда все компоненты матрицы  $\Delta R_{n-1}$  отрицательны или равны нулю.

На второй итерации с использованием формулы (1) заполняется матрица коэффициентов  $\Delta R'_1$ , т.е.

$$\Delta R_1' = \begin{array}{c|cccccccc} & V_1 & 3 & 4 & 5 & 2 & 7 & 8 & \\ \hline 1 & & -2 & 0 & -2 & -2 & -3 & -3 & \\ 6 & & -1 & -1 & -1 & -2 & -2 & -3 & \end{array}$$

Так как для рассматриваемого примера в матрице все перестановочные коэффициенты отрицательны или равны нулю, то переставлять вершины первой части с вершинами других частей не надо.

Для определения возможности перестановки вершин  $v \in V_2$  по формуле (1) вычисляем перестановочные коэффициенты и заполняем матрицу  $\Delta R_2$  размерности  $N_2 \times (m - (N_1 + N_2))$ . В нашем случае

$$\Delta R_2 = \begin{array}{c|ccc} & V_2 & 7 & 8 \\ \hline 3 & 0 & -1 & -1 \\ 4 & 0 & 3 & -1 \\ 5 & 0 & -1 & -1 \end{array}$$

Максимальное значение  $\Delta R_2$  имеет для пары вершин  $\{v_4, v_7\}$ , поэтому в матрице смежности вершины  $v_4$  и  $v_7$  меняются местами. Полученная матрица смежности имеет вид

$$S = \begin{array}{c|cccccccc} & V_1 & 1 & 6 & 3 & 7 & 5 & 2 & 4 & 8 \\ \hline 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 6 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 7 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 5 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 8 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ \hline & V_1 & & V_2 & & V_3 & & & & \end{array}$$

В соответствии с матрицей перестраивается граф (рис. 3).

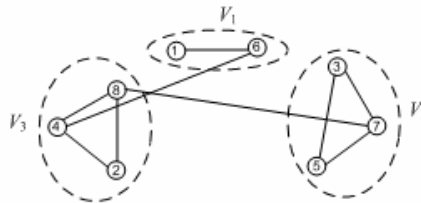


Рис. 3. Граф после второй итерации

Максимальное значение  $\Delta R_2$  имеет для пары вершин  $\{v_4, v_7\}$ , поэтому в матрице смежности вершины  $v_4$  и  $v_7$  меняются местами. Полученная матрица смежности имеет вид

В соответствии с матрицей перестраивается граф (рис. 3).

Как видно из рис. 3, число внешних связей сократилось на три по сравнению с первой итерацией:  $Q_1 = 5$ , а  $Q_2 = 2$ . На следующей итерации матрица  $\Delta R_2'$  имеет вид:

$$\Delta R_2' = \begin{array}{c|ccc} & V & & \\ \hline & & & \\ & & & \\ & & & \end{array}$$

Так как все элементы матрицы  $\Delta R_2'$  отрицательны, и других матриц  $\Delta R$  строить не требуется, то на этом решение задачи разбиения графа на три части заканчивается.

*Содержание отчета*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные согласно варианту.
4. Представление исходного графа матрицей смежности.
5. Выполнение итерационного этапа последовательно-итерационного алгоритма разбиения графа.
6. Расчет критерия оптимальности.
7. Вывод по результатам работы.
8. Список использованной литературы.

**КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

1. Как составляется матрица смежности?
2. Что понимают под степенью вершины?
3. Какие основные ограничения накладываются на компоновку вершин?

4. Что характеризуют перестановочные коэффициенты?  
 5. Какой критерий оптимальности используется при разбиении схемы на  $n$  частей?

## Лабораторная работа 5

### Решение задачи разбиения последовательным алгоритмом с использованием матрицы цепей

**Цель работы.** Ознакомиться с последовательным алгоритмом разбиения и решить задачу компоновки на основе представления исходной электрической принципиальной схемы матрицей цепей и определить число внешних связей между скомпонованными частями.

**Исходные данные.** Схема электрическая принципиальная.

Требуется изучить постановку задачи разбиения схемы, представленной матрицей цепей на подсхемы, и последовательный алгоритм решения задачи; получить вариант задания, составить матрицу цепей; сделать с использованием последовательного алгоритма анализ разбиения схемы с числом элементов  $n$  на части  $V_1$  и  $V_2$  с количеством элементов в каждой части  $N_1 = N_2 = n/2$ , причем за первой частью закреплен первый, а за второй – последний элементы.

### Методические указания по выполнению работы

Принципиальные электрические схемы соединения многоконтактных элементов (например, микросхем и микросборок) удобно представлять интегралом  $\mathfrak{Z}$  и записывать в виде матрицы цепей:

$$C = \|c_{ij}\|_{m \times k},$$

где  $m$  – число элементов схемы;  $k$  – число выводов многоконтактных элементов.

Элемент  $C_{ij}$  матрицы  $C$  означает номер электрической цепи, которая подключается к  $j$ -му выводу  $i$ -го многоконтактного элемента. Если контакт свободен, то  $C_{ij} = 0$ . Оптимальному разбиению схемы на  $n$  частей  $\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_n$  соответствует такое разбиение матрицы  $C$  на подматрицы  $C_1, C_2, \dots, C_n$ , при котором число связей между частями минимально. Следовательно, критерий оптимальности запишется в виде:

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n |R_{ij}| = \sum_{i=1}^n \sum_{j>i}^n |C_i \cap C_j| \rightarrow \min_{C_1, C_2, \dots, C_n}, \quad (1)$$

где  $R_{ij}$  – число связей между  $i$ -й и  $j$ -й частями.

Принцип работы алгоритма заключается в поочередном определении для каждого элемента схемы  $v_i$  чисел

$\Delta R_1^i, \Delta R_2^i, \dots, \Delta R_n^i$ , характеризующих приращение связей при расположении  $v_i$ -го элемента в части  $\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_n$ . Для опре-

деления чисел  $\Delta R_j^i, j = \overline{1, n}$  вводится вспомогательная матрица:  $W = \|w_{ij}\|_{n \times l}$ ,

где  $l$  – число цепей схемы;  $n$  – число частей разбиения. Элемент матрицы  $w_{ij}$  определяется соотношением

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-я цепь содержится в } i\text{-й части;} \\ 0, & \text{если } j\text{-я цепь содержится в } i\text{-й части.} \end{cases} \quad (2)$$

Величина  $\Delta R_j^i$  равна числу единиц  $l$ -вектора-строки  $W_j^i$ , рассчитываемой по формуле

$$W_j^i = \overline{W}_j W_o^i \left( \begin{matrix} n \\ \vee \\ v=1, v \neq j \end{matrix} W_v \right), \quad \Delta R_j^i = |W_j^i|, \quad (3)$$

где  $W_v$  –  $v$ -я строка матрицы  $W$ ;  $\overline{W}_j$  – инверсия строки  $W_j$ ;  $W_o^i$  –  $l$ -вектор-строка, заполненная в соответствии с формулой (2).

Из чисел  $\Delta R_1^i, \Delta R_2^i, \dots, \Delta R_n^i$  выбирается минимальное, и элемент  $v_i$  заносится в соответствующую часть. Последовательность решения задачи рассмотрим на примере разбиения электрической схемы (рис. 1) на части  $V_1$  и  $V_2$  с количеством элементов в каждой части  $N_1 = 3$  и  $N_2 = 2$ , причем за первой частью закреплен элемент  $v_1$ , а за второй – элемент  $v_5$ .

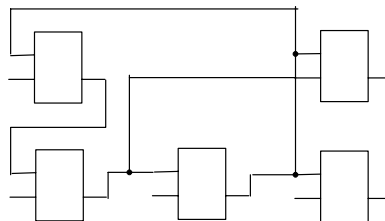


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная

1. Заданная схема представляется матрицей цепей:

$$C = \begin{array}{c} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 2 & 0 \\ \hline 2 & 3 & 0 \\ \hline 3 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 3 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array}$$

2. Для закрепленных за отдельными частями элементов ( $V_1 = \{v_1\}$  и  $V_2 = \{v_5\}$ ) составляется отдельная матрица  $W$ . Для рассматриваемого примера

$$\begin{array}{c} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline U_1 & U_2 & U_3 \\ \hline 1 & 1 & 0 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} \\ \\ \end{array}$$

При составлении матрицы следует учесть, что если хотя бы одна из вершин содержит данную цепь, то ставится единица в соответствующей ячейке.

3. Берется очередной незакрепленный элемент  $v_i$  и для него заполняется строка  $W_0^i$ . В нашем случае  $v_i = v_2$  и  $W_0^2 = (011)$ .

4. Определяется часть, в которую заносится элемент  $v_i$ . Для этого выполняются следующие расчеты:

а) записываются инверсии  $\bar{W}_j$ ,  $j = \overline{1, n}$  для частей разбиения. Для нашего примера  $n = 2$  и  $j = 1, 2$ , следовательно,  $\bar{W}_1 = (001)$  и  $\bar{W}_2 = (011)$ ;

б) подсчитывается  $n$  дизъюнкций  $\bigvee_{v=1, v \neq j}^n W_v$ ;

в) по формуле (3) определяются строки  $W_j^i$ ,  $j = \overline{1, n}$  и числа  $\Delta R_j^i$ ,  $j = \overline{1, n}$ . В случае нашего примера

$$W_1^2 = \bar{W}_1 W_0^2 W_2 = (001)(011)(100) = (000) \rightarrow \Delta R_1^2 = |W_1^2| = 0;$$

$$W_2^2 = \bar{W}_2 W_0^2 W_1 = (011)(011)(110) = (010) \rightarrow \Delta R_2^2 = |W_2^2| = 1;$$

г) находится минимальное число  $\Delta R_q^i = \min\{\Delta R_j^i, j = \overline{1, n}\}$ , и если  $q$ -я часть еще не заполнена (число элементов в ней меньше заданного  $N_q$ ), то элемент  $v_i$  заносится в  $q$ -ю часть, в противном случае берется следующее по величине число  $\Delta R_j^i$  и т.д. В нашем примере  $\Delta R_q^2 = \Delta R_1^2 = 0$ . Так как  $\Delta R_1^2$  является минимальным числом, то элемент схемы  $v_2$  компонуется в первую часть:  $v_2 \in V_1$ . Тогда в составе первой части будут два элемента, т.е.  $V_1 = \{v_1, v_2\}$ , а состав второй части останется без изменений:  $V_2 = \{v_5\}$ .

5. Корректируется строка матрицы  $W$  с учетом распределения элемента, в нашем случае  $v_2$ , в виде

$$W = \begin{array}{c} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{array} \begin{array}{|c|c|c|} \hline U_1 & U_2 & U_3 \\ \hline 1 & 1 & 1 \\ \hline 1 & 0 & 0 \\ \hline \end{array} \begin{array}{l} \\ \\ \end{array}$$

6. Выбирается следующий незакрепленный элемент, для которого выполняются этапы 4–5, и т.д., пока не будут заполнены все части. В случае рассматриваемого примера таким элементом является  $v_3$  и для него

$$W_0^3 = (101); \quad \begin{cases} \bar{W}_1 = (000), \\ \bar{W}_2 = (011); \end{cases} \quad \begin{cases} W_2 = (100), \\ W_1 = (111). \end{cases}$$

Следовательно,

$$W_1^3 = \bar{W}_1 W_0^3 W_2 = (000)(101)(100) = (000) \rightarrow \Delta R_1^3 = |W_1^3| = 0,$$

$$W_2^3 = \bar{W}_2 W_0^3 W_1 = (011)(101)(111) = (001) \rightarrow \Delta R_2^3 = |W_2^3| = 1.$$

Так как  $\Delta R_q^3 = \Delta R_1^3 = 0$  является минимальным числом, то элемент схемы  $v_3$  определяется в первую часть, т.е.  $v_3 \in V_1$ . В результате первая часть полностью заполнена, так как по условию примера  $|V_1| = N_1 = 3$ . Таким образом, состав сформированной первой части будет  $V_1 = \{v_1, v_2, v_3\}$ , а второй –  $V_2 = \{v_5, v_4\}$ , и вспомогательная матрица  $W$  примет окончательный вид

	$U_1$	$U_2$	$U_3$	
$V_1$	1	1	1	
$V_2$	1	0	1	1

Заключительным этапом расчета является определение критерия оптимальности  $Q$  (минимум числа связей между частями). При расчете этого критерия вместо (1) часто используется упрощенная формула, основанная на использовании вспомогательной матрицы  $W$ , имеющая вид

$$Q = (a - 1) + (b - 1) + (c - 1), \quad (4)$$

где  $a, b, c$  – число единиц  $U_1, U_2, U_3$ , столбцов цепей соответственно.

С использованием формулы (4) для нашего примера

$$Q = (2 - 1) + (1 - 1) + (2 - 1) = 2.$$

Использование рассмотренного алгоритма компоновки применительно к схемам с многоконтактными элементами позволяет с помощью относительно простых операций разбить исходную схему на требуемое количество частей. В рассмотренном примере схема была разбита на две части с заданным количеством элементов в каждой части и двумя внешними связями.

*Содержание отчета*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные.
4. Составленная по электрической схеме матрица цепей.
5. Анализ разбиения схемы на подсхемы последовательным алгоритмом.
6. Вывод по результатам работы.
7. Список использованной литературы.

1. Как составить матрицу цепей?
2. Что представляет собой каждый элемент матрицы цепей?
3. Как заполняется вспомогательная матрица?
4. Как выполняются операции дизъюнкции и инверсии?

## Лабораторная работа 6

### Решение задачи размещения последовательно-итерационным алгоритмом

*Цель работы.* Ознакомиться с последовательно-итерационным алгоритмом и решить задачу размещения радиоэлектронных элементов в монтажном пространстве с минимальной суммарной длиной соединений.

*Исходные данные.* Схема электрическая принципиальная, представленная мультиграфом  $G(V, R)$  с числом вершин  $n$ .

Требуется изучить постановку задачи размещения элементов схемы и последовательно-итерационный алгоритм решения задачи; получить вариант задания, решить задачу размещения элементов схемы в монтажном пространстве  $T$  коммутационной платы с числом посадочных мест  $m = n$  последовательно-итерационным алгоритмом по минимуму суммарной длины соединений.

#### Методические указания по выполнению работы

В качестве исходных данных для решения задачи размещения рассматривается схема соединения элементов, заданная в виде графа  $G(V, R)$ , где  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  – множество конструктивных элементов,  $R = \{r_1, \dots, r_p\}$  – множество связей между ними и множество установочных (посадочных) мест на коммутационной плате  $T = \{t_1, \dots, t_m\}$ , причем  $|T| \geq |V|$ .

Требуется так разместить вершины  $V$  в посадочных местах  $T$ , чтобы минимизировать выбранный критерий оптимальности. Критерием может служить, в частности, минимум суммарной длины соединений, минимум внутрисхемных линий, минимум соединений, длина которых превышает заданную величину и др. Наиболее часто в задачах размещения минимизируется суммарная длина соединений

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij} S_{ij}, \quad (1)$$

где  $l_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м установочными местами, в которых расположены соответствующие конструктивные элементы;  $S_{ij}$  – число кратных связей между элементами.

При размещении элементов на плоскости коммутационной платы расстояние приближенно определяется в виде

$$l_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|, \quad (2)$$

или более точно, с использованием формулы

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (3)$$

Последовательно-итерационный алгоритм размещения состоит из двух этапов. На первом этапе (последовательная часть) последовательно заполняются установочные места элементами с учетом числа связей между ними. Этап заканчивается, когда все элементы размещены. На втором этапе (итерационная часть) производится перестановка элементов с целью минимизации выбранного критерия оптимальности.

Множества конструктивных элементов  $V$  и множества связей между ними  $R$  графа  $G(V, R)$  задаются матрицей смежности  $S = \|s_{ij}\|_{n \times n}$ , где  $n = |V|$ . Монтажное пространство задается множеством установочных мест  $T$  в виде матрицы длин  $L$  или списка координат позиций. Расстояния между установочными местами определяются по формуле (2) или (3). Некоторые элементы могут быть закреплены за отдельными позициями.

На последовательном этапе размещение производится с использованием коэффициента связности  $K(v_i)$  элемента  $v_i$  с ранее размещенными элементами, определяемого по формуле

$$K(v_i) = \rho(v_i \in V_{\text{разм}}) - \rho(v_i \in V_{\text{ост}}) = 2\rho(v_i \in V_{\text{разм}}) - \rho(v_i), \quad (4)$$

где  $\rho(v_i \in V_{\text{разм}}) = \sum_{j \in J_{\text{разм}}} S_{ij}$  – число связей элемента  $v_i$  с подмножеством размещенных вершин  $V_{\text{разм}}$ ;  $\rho(v_i \in V_{\text{ост}})$  – число свя-

зей элемента  $v_i$  с подмножеством оставшихся вершин  $V_{\text{ост}}$ ;  $J_{\text{разм}}$  – множество номеров размещенных элементов;  $\rho(v_i)$  – степень вершины  $v_i$ .

Целью этапа является получение первоначального размещения элементов в поле монтажного пространства, которое рассматривается как первое приближение итерационной части алгоритма. Заполнение монтажного пространства осуществляется в следующем порядке. Вначале размещаются закрепленные за соответствующими установочными местами элементы, затем в свободную позицию размещается один (первый) конструктивный элемент, а далее производится размещение элементов с максимальными значениями коэффициента связности в очередных свободных позициях монтажного пространства. В результате такого последовательного размещения элементов формируется массив пар  $\{(v_i, t_k), i = \overline{1, n}, k = \overline{1, m}\}$ , для которого рассчитывают значение критерия по формуле (1).

На втором этапе на каждой итерации выбирается элемент с максимальным значением средней длины связей; определяется посадочное число, на которое его желательно разместить и выбирается наилучший вариант для перестановки. Следовательно, идея итерационной части заключается в улучшении размещения, полученного на предыдущем шаге на основе перестановок элементов.

Рассмотрим решение задачи размещения последовательно-итерационным алгоритмом на примере. Необходимо разместить элементы схемы, мультиграф которой  $G(V, R)$  приведен на рис. 1, с числом вершин  $dl = 9$  в заданное монтажное пространство, показанное на рис. 2 с числом посадочных мест  $m = n = 9$ .

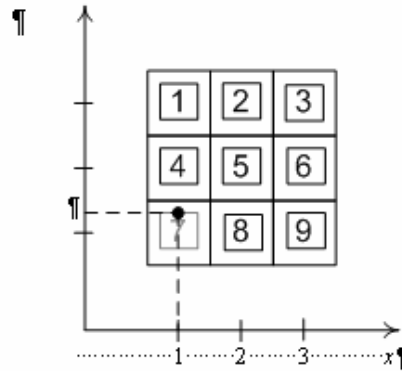
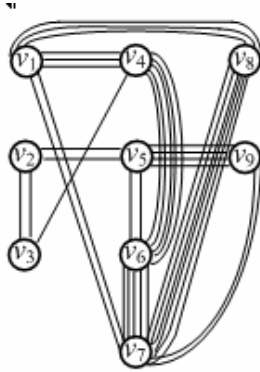


Рис. 1. Мультиграф  $G(V, R)$       Рис. 2. Монтажное пространство

Решение задачи начинается с представления исходного мультиграфа матрицей смежности:

$V$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	$\rho(v_i)$	$K^1(v_i)$	$K^2(v_i)$	$K^3(v_i)$	$K^4(v_i)$	$K^5(v_i)$
1	0	0	0	3	0	0	2	3	0	8	-	-	-	-	-
2	0	0	2	0	2	0	0	0	0	4	-4	0	0	0	-
3	0	2	0	1	0	0	0	0	0	3	-3	-	-	-	-
4	3	0	1	0	0	5	0	0	0	9	-3	-	-	-	-
5	0	2	0	0	0	2	0	0	4	8	-8	-8	-8	-4	0
6	0	0	0	5	2	0	5	0	0	12	-12	-2	8	-	-
7	2	0	0	0	0	5	0	6	2	15	-11	1	-	-	-
8	3	0	0	0	0	6	0	0	0	9	-3	-	-	-	-
9	0	0	0	4	0	2	0	0	0	6	-6	-6	-2	-2	-2

**Последовательный этап.** В условии задачи не задано закрепление отдельных вершин за конкретными посадочными местами, поэтому определяем вершину  $v_1$  в позицию  $t_1$ , а далее последовательно размещаем остальные элементы. Для этого вычисляем коэффициенты связности  $K(v_i)$  элементов  $v_2, \dots, v_9$  с размещенным элементом  $v_1$  по формуле (4). Так, коэффициент связности для элемента  $v_2$  равен  $K^1(v_2) = 2S_{21} - \rho(v_2) = 0 - 4 = -4$ , для элемента  $v_3$   $K^1(v_3) = 2S_{31} - \rho(v_3) = 0 - 3 = -3$  и т.д. Значения  $K^1(v_i)$  приведены дополнительным столбцом в матрице смежности. Так как максимальное значение коэффициента связности с  $v_1$  имеют элементы  $v_3, v_4$  и  $v_8$ , то их целесообразно разместить в соседние с элементом  $v_1$  ячейки. Остались неразмещенными элементы  $v_2, v_5, v_6, v_7, v_9$ . Для них аналогично определяются коэффициенты связности с ранее размещенными элементами

$v_1, v_3, v_4$  и  $v_8$ , т.е.  $K^2(v_2) = 2(S_{21} + S_{23} + S_{24} + S_{28}) - \rho(v_2) = 4 - 4 = 0$ ;  $K^2(v_5) = (S_{51} + S_{53} + S_{54} + S_{58}) - \rho(v_5) = 0 - 8 = -8$  и т.д. Эти значения  $K^2(v_i)$  также приведены в столбце при матрице  $S$ . Максимальную связность с  $v_1, v_3, v_4, v_8$  имеет элемент  $v_7$ , и его размещаем в очередную свободную позицию монтажного пространства и т.д. Таким образом, в результате выполнения последовательного этапа получено первоначальное размещение элементов, показанное на рис. 3.

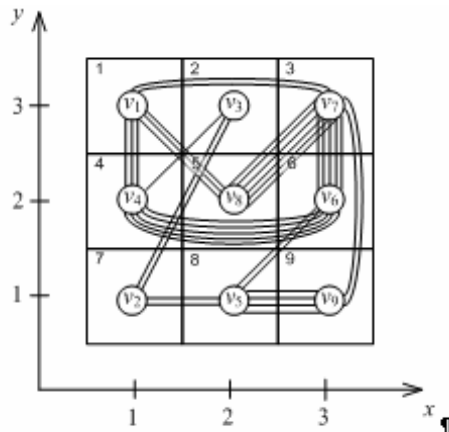


Рис. 3. Размещение элементов после последовательного этапа



Значение критерия оптимальности (минимум суммарной длины соединений), определяемое по формуле (1), составляет  $Q = 62$ .

**Итерационный этап.** Итерационная часть алгоритма начинается с расчета средней длины связи  $v_i$  вершины, расположенной в  $t_k$  посадочном месте по формуле

$$L_{v_i}(t_k) = \frac{1}{\rho(v_i)} \sum_{j=1}^n S_{ij} l_{k(i),r(j)}, \quad (5)$$

где значения длины  $l_{kr}$  между  $k$ -й и  $r$ -й позициями монтажного пространства, в которых содержатся вершины  $v_i$  и  $v_j$  соответственно, определяются по формуле (2) или (3). В дальнейших расчетах рассматриваемого примера для определения длин будет использоваться формула (2).

Тогда с использованием формулы (5) для первого элемента  $v_1$ , размещенного в позиции  $t_1$ , средняя длина связей будет составлять

$$\begin{aligned} L_{v_1}(t_1) &= \frac{1}{\rho(v_1)} \sum_{j=1}^9 S_{1j} l_{1(1),r(j)} = \frac{1}{8} (S_{14} l_{1(1),4(4)} + S_{17} l_{1(1),3(7)} + S_{18} l_{1(1),5(8)}) = \\ &= \frac{1}{8} (3 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + 3 \cdot 2) = 1,63. \end{aligned}$$

Для элемента  $v_2$ , размещенного в посадочном месте  $t_7$ , средняя длина связей составит

$$L_{v_2}(t_7) = \frac{1}{\rho(v_2)} \sum_{j=1}^9 S_{2j} l_{7(2),r(j)} = \frac{1}{4} (S_{23} l_{7(2),2(3)} + S_{25} l_{7(2),8(5)}) = \frac{1}{4} (2 \cdot 3 + 2 \cdot 1) = 2.$$

Аналогично определяются средние длины связей для остальных элементов:  $L_{v_3}(t_2) = 2,67$ ;  $L_{v_4}(t_4) = 1,67$ ;  $L_{v_5}(t_8) = 1,25$ ;  $L_{v_6}(t_6) = 1,58$ ;  $L_{v_7}(t_3) = 1,67$ ;  $L_{v_8}(t_5) = 2$ ;  $L_{v_9}(t_9) = 1,33$ . Из всех полученных значений  $L_{v_i}(t_k)$  определяем максимальное. Следует заметить, что если для нескольких элементов получено одинаковое значение максимальной средней длины связей, то выбирается значение для любого из этих элементов. В рассматриваемом примере это средняя длина связей элемента  $v_3$ , расположенного в установочном месте  $t_2$ , т.е.  $L_{v_3}(t_2)$ . Для этого элемента определяем предпочтительную позицию на основе расчета координат «центра тяжести» по формуле

$$x_c(v_\mu) = \frac{1}{\rho(v_\mu)} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq \mu}}^n S_{\mu j} x_{r(j)}, \quad y_c(v_\mu) = \frac{1}{\rho(v_\mu)} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq \mu}}^n S_{\mu j} y_{r(j)}, \quad (6)$$

где  $v_\mu$  – элемент с максимальным значением  $L_{v_i}(t_k)$ ;  $S_{\mu j}$  – число связей между элементами  $v_\mu$  и  $v_j$ ;  $x_{r(j)}$ ,  $y_{r(j)}$  – координаты  $r$ -й позиции монтажного пространства, в которой находится элемент  $v_j$ .

С использованием формулы (6) для элемента  $v_3$

$$\begin{aligned} x_c(v_3) &= \frac{1}{\rho(v_3)} \sum_{j=1}^9 S_{3j} x_{r(j)} = \frac{1}{3} (S_{32} x_{7(2)} + S_{34} x_{4(4)}) = \frac{1}{3} (2 \cdot 1 + 1 \cdot 1) = 1; \\ y_c(v_3) &= \frac{1}{\rho(v_3)} \sum_{j=1}^9 S_{3j} y_{r(j)} = \frac{1}{3} (S_{32} y_{7(2)} + S_{34} y_{4(4)}) = \frac{1}{3} (2 \cdot 1 + 1 \cdot 2) = 1,33. \end{aligned}$$

Положение «центра тяжести» для элемента  $v_3$  отмечено на рис. 2. Другими словами, средняя длина связей будет минимальна при расположении элемента  $v_3$  в координатах «центра тяжести». Из позиций, расположенных в его окрестности, формируется подмножество  $T_c = \{t_4, t_7\}$ , в котором размещены элементы  $V_c = \{v_4, v_2\}$ . Для определения, какой элемент целесообразно поменять местами с отобранным  $v_\mu$ , рассчитывается средняя длина связи элемента  $v_\mu$  при перемещении его из установочного места  $t_k$  в позицию  $t_c \in T_c$ , в которой был элемент  $v_c$  по формуле

$$L_{v_\mu}(t_{c(c)}) = \frac{1}{\rho(v_\mu)} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq c}}^n S_{\mu j} l_{c(\mu),r(j)} + S_{\mu c} l_{c(\mu),k(c)} \right), \quad (7)$$

где  $l_{c(\mu),r(j)}$  – значение длины связи между посадочным местом  $t_c$  в предположении размещения в нем элемента  $v_\mu$  и  $r$ -й позицией монтажного пространства с размещенным в ней элементом  $v_j$ ;  $S_{\mu c}$  – число связей между элементами  $v_\mu$  и  $v_c$ ;  $l_{c(\mu),k(c)}$  – значение длины связи между посадочным местом  $t_c$  в предположении размещения в нем элемента  $v_\mu$  и  $k$ -й позицией монтажного пространства в предположении размещения в ней элемента  $v_c$ .

Для рассматриваемого примера в соответствии с формулой (7) и в предположении поочередного обмена местоположениями элемента  $v_3$  с элементами подмножества  $V_c$  имеем

$$\begin{aligned} L_{v_3}(t_{4(4)}) &= \frac{1}{\rho(v_3)} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 4}}^9 S_{3j} l_{4(3),r(j)} + S_{34} l_{4(3),2(4)} \right) = \\ &= \frac{1}{3} (S_{32} l_{4(3),7(2)} + S_{34} l_{4(3),2(4)}) = \frac{1}{3} (2 \cdot 1 + 1 \cdot 2) = 1,33; \end{aligned}$$

$$L_{v_3}(t_{7(2)}) = \frac{1}{\rho(v_3)} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 2}}^9 S_{3j} l_{7(3),r(j)} + S_{32} l_{7(3),2(2)} \right) = \\ = \frac{1}{3} (S_{34} l_{7(3),4(4)} + S_{32} l_{7(3),2(2)}) = 2,33.$$

Аналогично вычисляются средние длины  $L_{v_c}(t_6)$  для элементов  $v_c \in V_c$ , если их поместить на позицию  $t_2$ , занимаемую элементом  $v_3$ , т.е.

$$L_{v_4}(t_{2(3)}) = \frac{1}{\rho(v_4)} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 3}}^9 S_{4j} l_{2(4),r(j)} + S_{43} l_{2(4),4(3)} \right) = \\ = \frac{1}{9} (S_{41} l_{2(4),1(1)} + S_{46} l_{2(4),6(6)} + S_{43} l_{2(4),4(3)}) = \frac{1}{9} (3 \cdot 1 + 5 \cdot 2 + 1 \cdot 2) = 1,67$$

и, соответственно,

$$L_{v_2}(t_{2(3)}) = \frac{1}{\rho(v_2)} \left( \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq 3}}^9 S_{2j} l_{2(2),r(j)} + S_{23} l_{2(2),7(3)} \right) = \\ = \frac{1}{4} (S_{25} l_{2(2),8(5)} + S_{23} l_{2(2),7(3)}) = 2,5.$$

Оцениваются изменения средней длины связей от перестановки элементов  $v_\mu$  и  $v_c \in V_c$  с использованием формулы

$$\Delta L(v_\mu, v_c) = (L_{v_\mu}(t_k) - L_{v_\mu}(t_{c(c)})) + (L_{v_c}(t_c) - L_{v_c}(t_{k(\mu)})). \quad (8)$$

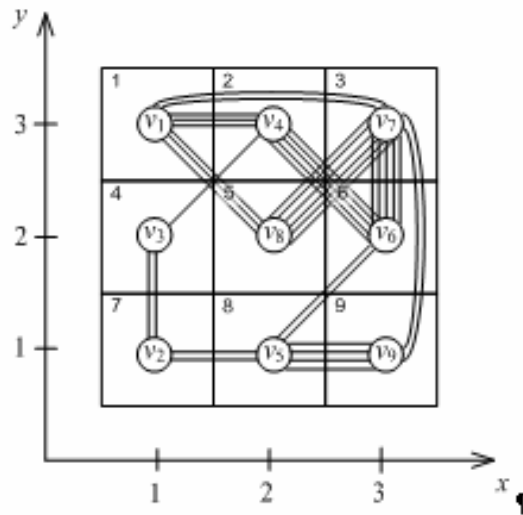
Тогда для рассматриваемого примера в соответствии с (8) имеем

$$\Delta L(v_3, v_4) = (L_{v_3}(t_2) - L_{v_3}(t_{4(4)})) + (L_{v_4}(t_4) - L_{v_4}(t_{2(3)})) = 1,34;$$

$$\Delta L(v_3, v_2) = (L_{v_3}(t_2) - L_{v_3}(t_{7(2)})) + (L_{v_2}(t_7) - L_{v_2}(t_{2(3)})) = -0,16.$$

Так как максимальный выигрыш достигается от перестановки элементов  $v_3$  и  $v_4$ , то определяем  $v_3$  в установочное место  $t_4$ , а элемент  $v_4$  в  $t_2$ . На этом первая итерация заканчивается.

Полученное размещение показано на рис. 4. Суммарная длина соединений, определяемая по формуле (1) составляет 58 единиц, т.е. критерий оптимальности уменьшился на четыре единицы.



**Рис. 4. Размещение элементов после первой итерации**

Итерации заканчиваются, когда значения средних длин связей для всех элементов будут меньше  $2\Delta l$  (здесь  $\Delta l$  – расстояние между соседними позициями) или отсутствуют перестановки, приводящие к минимизации критерия (1).

## Содержание отчета

6. Название лабораторной работы.
7. Цель работы.
8. Исходные данные.
9. Составленная по электрической схеме матрица смежности.
10. Решение задачи размещения элементов схемы в монтажном пространстве коммутационной платы последовательно-итерационным алгоритмом.
11. Вывод по результатам работы.
12. Список использованной литературы.

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

5. Что понимается под монтажным пространством?
6. Перечислить основные этапы последовательно-итерационного алгоритма и дать их краткое описание.
7. Для чего определяются и что характеризуют коэффициенты связности?
8. Как взаимосвязана средняя длина и «центр тяжести»?
9. Объяснить, могут ли произведенные перестановки элементов в ходе итерационного этапа привести к увеличению критерия (1) по сравнению с его значением после первоначального размещения?

## Лабораторная работа 7

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАЗМЕЩЕНИЯ ИТЕРАЦИОННЫМ АЛГОРИТМОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА «ДЛИННЫХ» И «КОРОТКИХ» РЕБЕР

*Цель работы.* Ознакомиться с итерационным алгоритмом и решить задачу размещения радиоэлектронных элементов в монтажном пространстве методом «длинных» и «коротких» ребер.

*Исходные данные.* Схема электрическая принципиальная, представленная мультиграфом  $G(V, R)$  с числом вершин  $n$ .

Требуется изучить постановку задачи размещения элементов схемы и итерационный алгоритм решения, основанный на методе «длинных» и «коротких» ребер; получить вариант задания, решить задачу размещения элементов схемы в монтажном пространстве коммутационной платы с числом посадочных мест  $m = n$  итерационным алгоритмом по минимуму суммарной длины соединений.

### Методические указания по выполнению работы

В качестве исходных данных для решения задачи размещения рассматриваются схема соединения элементов, заданная в виде графа  $G(V, R)$ , где  $V = \{v_1, \dots, v_n\}$  – множество конструктивных элементов,  $R = \{r_1, \dots, r_p\}$  – множество связей между ними и  $T = \{t_1, \dots, t_m\}$  – множество установочных (посадочных) мест на коммутационной плате, причем  $|T| \geq |V|$ .

Требуется так разместить вершины  $V$  в посадочных местах  $T$ , чтобы минимизировать выбранный критерий оптимальности. Критерием может служить, в частности, минимум суммарной длины соединений, минимум внутрисхемных линий, минимум соединений, длина которых превышает заданную величину и др. Наиболее часто в задачах размещения минимизируется суммарная длина соединений

$$Q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m l_{ij} S_{ij}, \quad (1)$$

где  $l_{ij}$  – расстояние между  $i$ -м и  $j$ -м установочными местами, в которых расположены соответствующие конструктивные элементы;  $S_{ij}$  – число кратных связей между элементами.

Основная идея алгоритма заключается в том, что после начального размещения в виде графа  $G(V, R)$  для каждой вершины  $v_i \in V$  множество  $R_i$  инцидентных ребер разбивается на два подмножества:  $R'_i$  – «короткие» ребра и  $R''_i$  – «длинные» ребра. На основе такого деления определяются пары вершин, перестановки которых приводят к уменьшению суммарной длины связей, т.е. критерия (1).

Деление ребер на «короткие» и «длинные» производится с помощью граничной длины  $l_{гр}$ . Если длина связи  $l_{ij}$  между вершинами  $v_i$  и  $v_j$  меньше  $l_{гр}$ , ребро  $r_{ij}$  считается «коротким» ( $r_{ij} \in R'_i$ ). В случае, когда  $l_{ij} > l_{гр}$ , то ребро  $r_{ij}$  относят к «длинным» ( $r_{ij} \in R''_i$ ). Приблизительно  $l_{гр}$  равна половине наибольшей длины связи  $l_{max}$  между элементами. Более точно  $l_{гр}$  можно определить из соотношений

$$l'(l'+1) < 0,5(l_{max}+1), \quad l''(l''+1) < 0,5l_{max}(l_{max}+1), \quad (2)$$
$$l' < l_{гр} < l''.$$

Рассмотрим основные этапы алгоритма.

1. Проводится произвольное размещение элементов  $v \in V$  в установочные места  $t \in T$  монтажного пространства, например,  $v_1 \rightarrow t_1, v_2 \rightarrow t_2$  и т.д.

2. Рассчитывается значение граничной длины  $l_{гр}$ .

3. Для каждой вершины  $v_i \in V$  множество инцидентных ребер  $R_i$  разбивается на подмножества «коротких»  $R'_i$  и «длинных»  $R''_i$  ребер и подсчитываются разности

$$\Delta R_i = |R''_i| - |R'_i|, \quad (3)$$

где  $|R'_i|, |R''_i|$  – число ребер в множествах  $R'_i, R''_i$  (мощность множеств).

4. Выделяется подмножество вершин элементов  $V_n \subset V$ , для которых  $\Delta R_i > 0$ .
5. Из подмножества  $V_n$  выбирается вершина  $v_m$  с максимальным числом инцидентных ребер или с максимальным значением  $\Delta R_i$ , т.е.  $\Delta R_m = \max(\Delta R_i)$  и относительно нее множество  $V$  делится на подмножества  $V'_m$  и  $V''_m$ . В  $V'_m$  включается вершина  $v_m$  и отстоящие от нее вершины на расстояние не больше  $l_{гр}$ , в подмножество  $V''_m$  – остальные вершины.
6. Формируется подмножество  $V_\mu$ , в которое включаются вершины, инцидентные длинным ребрам  $v_m$  и  $V_n/v_\mu$ , т.е.

$$V_\mu = V'' \cap (V_n/v_\mu). \quad (4)$$

7. Для вершин  $v_j \in V_\mu$  подсчитывается число ребер  $|R_j(V'_m)|$  и  $|R_j(V''_m)|$ , инцидентных соответственно вершинам подмножеств  $V'_m$  и  $V''_m$ , и затем разность

$$\Delta R_j = |R_j(V'_m)| - |R_j(V''_m)|. \quad (5)$$

Определяется вершина  $v_\mu$ , для которой  $\Delta R_\mu = \max(\Delta R_j)$ .

8. Проверяется выполнение условия

$$\Delta R_m + \Delta R_\mu > 0. \quad (6)$$

Если оно имеет место, то производится перестановка вершин  $v_m$  и  $v_\mu$ , иначе берется другая вершина из подмножества  $V_n$  и повторяются п. 5 – 8.

9. Подсчитывается суммарная длина связей по формуле (1).

Далее на каждой итерации выполняются п. 3 – 9. Расчет прекращается, когда подмножество  $V_n$  станет пустым или для всех  $v \in V_n$  условие (6) не выполняется.

Рассмотрим данный алгоритм на примере. Пусть в результате начального размещения получен граф  $G(V, R)$ , представленный на рис. 1. Требуется решить задачу размещения методом «длинных» и «коротких» ребер.

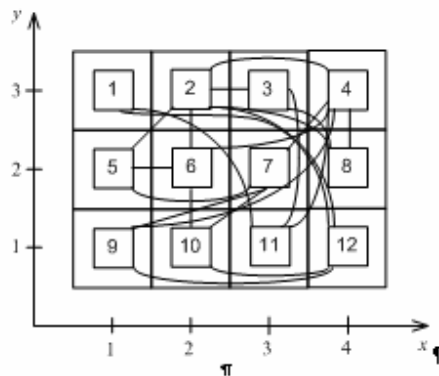


Рис. 1. Начальное размещение

В соответствии с исходными данными, максимальная длина ребра  $l_{max} = 5$ , в качестве граничного значения, определяемого из соотношения (2), берется  $l_{гр} \approx 2,5$ . Значения  $|R'_i|$ ,  $|R''_i|$  и  $\Delta R_i$  для всех вершин, рассчитанные с использованием формулы (3), представлены в табл. 1.

Таблица 1

Вершина	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$ R'_i $	0	4	3	3	3	3	3	2	0	3	1	1
$ R''_i $	2	2	0	3	0	1	1	0	3	0	2	3
$\Delta R_i$	2	-2	-3	0	-3	-2	-2	-2	3	-3	1	2

Здесь вершина  $v_1$  не содержит коротких ребер с  $l_{ij} < l_{гр}$  и  $|R'_1| = 0$ , оба ребра  $r_{1,11}$  и  $r_{1,12}$  «длинные», поэтому  $|R''_1| = 2$  и  $\Delta R_1 = |R''_1| - |R'_1| = 2$ . Аналогично определяются  $\Delta R_i$  и для других вершин.

Вершины с  $\Delta R_i > 0$  образуют подмножество  $V_n = \{v_1, v_9, v_{11}, v_{12}\}$ . Выбирается в качестве первой вершины  $v_m$  пары  $(v_m, v_\mu)$  для перестановки вершина  $v_{12}$ , имеющая максимальную степень ( $\rho(v_{12}) = 4$ ). Относительно нее множество  $V$  делится на подмножества  $V'_{12} = \{v_4, v_7, v_8, v_{10}, v_{11}, v_{12}\}$  и  $V''_{12} = \{v_1, v_2, v_3, v_5, v_6, v_9\}$ . В соответствии с формулой (4) формируется подмножество

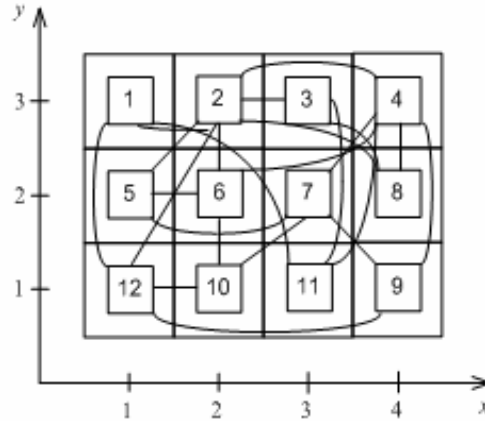
$$V_\mu = V'_{12} \cap (V_n \setminus v_{12}) = V''_{12} \cap \{v_1, v_9, v_{11}\} = \{v_1, v_9\}.$$

Для вершин  $v_1$  и  $v_9$  определяются числа  $|R_1(V'_{12})| = 2$ ,  $|R_1(V''_{12})| = 0$ ,  $|R_9(V'_{12})| = 3$ ,  $|R_9(V''_{12})| = 0$  и далее по формуле (5) подсчитываются их разности

$$\Delta R_1 = |R_1(V'_{12})| - |R_1(V''_{12})| = 2; \quad \Delta R_9 = |R_9(V'_{12})| - |R_9(V''_{12})| = 3.$$

Так как  $\Delta R_9 > \Delta R_1$ , то в качестве второй вершины  $v_\mu$  пары  $(v_\nu, v_\mu)$  выбирается  $v_9$ . Условие (6) выполняется, так как  $\Delta R_{12} + \Delta R_9 = 2 + 3 > 0$  и, следовательно, производится перестановка вершин  $v_{12}$  и  $v_9$ . На этом первая итерация считается завершенной. Граф  $G(V, R)$  после перестановки показан на рис. 2.

Аналогично первой итерации алгоритма производятся и последующие до тех пор, пока подмножество  $V_n$  не станет пустым или для всех  $v \in V_n$  условие (6) перестанет выполняться.



**Рис. 2. Размещение на первой итерации**

#### Содержание отчета

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные.
4. Решение задачи размещения элементов схемы в монтажном пространстве коммутационной платы итерационным алгоритмом с использованием метода «длинных» и «коротких» ребер.
5. Вывод по результатам работы.
6. Список использованной литературы.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что понимается под монтажным пространством?
2. В чем заключается суть метода «длинных» и «коротких» ребер?
3. Как формируются подмножества «длинных» и «коротких» ребер?
4. Для чего проверяется выполнение условия (6)?

#### Лабораторная работа 8

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ ОДНОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ВОЛНЫМ АЛГОРИТМОМ

*Цель работы.* Ознакомиться с волновым алгоритмом (алгоритмом Ли), изучить его особенности при различных критериях оптимизации и решить с его помощью задачу трассировки односторонней печатной платы, а также решить задачу трассировки на ПЭВМ с использованием программы P-CAD.

*Исходные данные.* Монтажное поле печатной платы с контактными отверстиями для установки элементов.

Требуется изучить постановку задачи трассировки элементов схемы и волновой алгоритм решения; получить вариант задания, провести трассы между одноименными контактами в монтажном пространстве односторонней печатной платы с использованием алгоритма Ли по минимуму длины трассы при единичной длине шага распространения волны; решить задачу трассировки на ПЭВМ с использованием средств программы P-CAD при различных критериях оптимизации.

#### Методические указания по выполнению работы

В основу волнового алгоритма (другое название – алгоритм Ли) положен метод динамического программирования, и если оптимальная трасса существует, то она всегда будет получена. Перечислим основные положения, на которых базируется алгоритм.

1. Все поле (плата) делится на дискреты, размер которых выбирается в зависимости от ширины проводников и расстояния между ними.
2. Выбирается критерий оптимальности проведения трассы, которым может служить минимальная длина проводников, минимальное число пересечений, минимальное число изгибов, равномерность распределения трасс и т.п.
3. Все поле разделяется на свободные и занятые дискреты. Трасса может проходить только по свободным дискретам. Занятыми считаются дискреты, в которых находятся контакты элементов, проводники, проложенные на предыдущих этапах,

а также запрещенные для трассировки участки платы. Условно занятыми называются дискреты, по которым проходит трасса.

4. При проведении трассы между двумя контактами  $A$  и  $A'$  один контакт рассматривается как источник волны, а второй как приемник. Волна от источника распространяется шагами. За один шаг волна занимает все соседние свободные ячейки. Волна распространяется до тех пор, пока ее фронт не достигнет контакта приемника. По мере распространения волны каждой дискрете присваивается вес в соответствии с выбранным критерием оптимальности

$$P_i = P_{i-1} + \psi, \quad (1)$$

где  $P_i$  – вес дискреты на  $i$ -м шаге (для ячейки-источника  $P_i = 0$ );  $\psi$  – положительная добавка, оценивающая качество пути в зависимости от выбранного критерия оптимальности проведения трассы.

5. В каждой ячейке, занимаемой волной, указывается направление ее движения (стрелкой, направленной в сторону, противоположную движению). Для исключения неопределенности при проставлении стрелок задаются приоритеты, учитывающие взаимное расположение контактов. Вес проставляется в правом нижнем углу.

6. После достижения волной приемника трасса проводится в направлении, обратном распространению волны, по мере убывания веса.

Например (рис. 1), на первом шаге волна из  $A$  (координаты (2; 4)) переходит в дискреты (2; 5), (2; 3) и (3; 4). Этот путь отмечается стрелкой, проставляемой обратно ходу движения, в левом верхнем углу указывается номер шага. Смежная с  $A$  ячейка занята выводом (1; 4). На втором шаге волна распространяется из ячеек (2; 5), (2; 3), (3; 4) дальше на соседние ячейки (1; 3), (1; 5), (2; 2), (3; 3), (3; 5) и т.д.

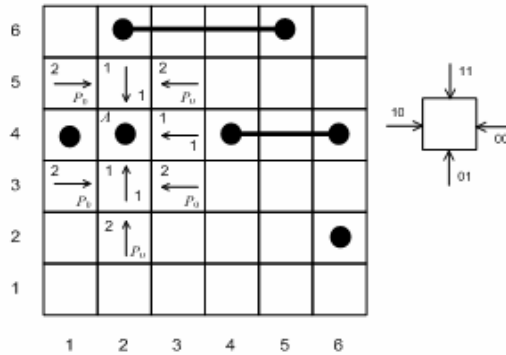


Рис. 1. Моделирование распространения волны и приоритетный порядок

Рассмотрим несколько примеров расчета веса дискреты (1). Если в качестве критерия берется минимум длины трассы, то вес определяется по формуле

$$P_i = P_i C, \quad (2)$$

где постоянная  $C$  характеризует длину шага. При единичной длине шага вес не проставляется, так как совпадает с номером шага.

В случае, когда критерием является минимум числа поворотов, то

$$P_i = \begin{cases} P_{i-1}, & \text{поворота нет;} \\ P_{i-1} + a, & \text{поворот есть,} \end{cases} \quad (3)$$

где  $a$  – положительное число (вес одного поворота).

Если требуется провести трассу, максимально отстоящую от ранее проведенных трасс, то формула определения веса имеет вид

$$P_i = P_{i-1} + z, \quad (4)$$

где  $z$  – число занятых соседних ячеек.

Когда допускается пересечение ранее проведенных трасс (под прямым углом) и минимизируется число пересечений, тогда

$$P_i = \begin{cases} P_{i-1}, & \text{пересечения нет;} \\ P_{i-1} + b, & \text{пересечение есть,} \end{cases} \quad (5)$$

где  $b$  – положительное число (вес одного пересечения).

Если необходимо учесть несколько частных критериев оптимальности, то для расчета конструируется более общее соотношение на основании (2) – (5). Например, пусть требуется провести трассу, имеющую минимальную длину и наименьшее число поворотов и пересечений. Используя (3), (5), получаем формулу для определения веса:

$$P_i = \begin{cases} P_{i-1} \cdot 1, & \text{нет поворота и пересечения;} \\ P_{i-1} \cdot 1 + a, & \text{есть поворот (нет пересечения);} \\ P_{i-1} \cdot 1 + b, & \text{есть пересечение (нет поворота);} \\ P_{i-1} \cdot 1 + a + b, & \text{есть поворот и пересечение.} \end{cases}$$

На рис. 2 показан ход распространения волны из  $A$  в  $B$  и проведение при минимизации длины и числа поворотов трассы. В соответствии с (3) вес дискреты определяется как

$$P_i = \begin{cases} P_{i-1} + 1, & \text{если нет поворота;} \\ P_{i-1} + 3, & \text{если поворот есть.} \end{cases}$$

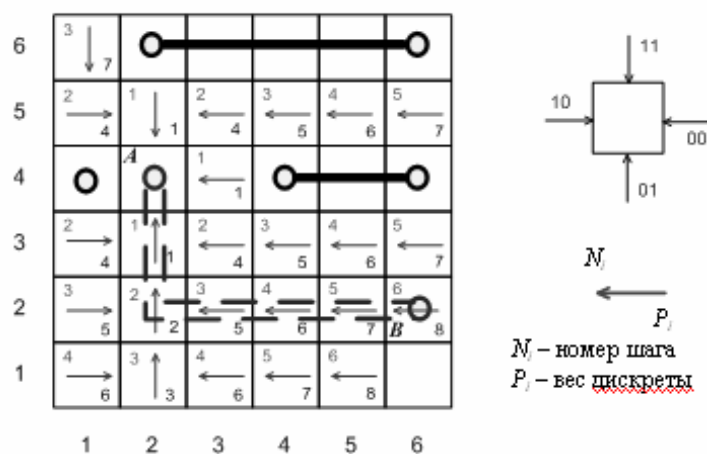


Рис. 2. Пример трассировки платы

Из рисунка видно, что фронт волны достиг приемника  $B$  на шестом шаге из ячейки (5; 2). Трасса между  $B$  и  $A$  проводится по дискретам с координатами (5; 2), (4; 2), (3; 2), (2; 2) и (2; 3). Качество данной трассы оценивается суммарным весом 9 (длина 6 и поворот 3), это оптимальная трасса, трассы с меньшим весом нет. Если трассу провести по дискретам (6; 3), (5; 3), (4; 3), (3; 3), (2; 3), то ее вес будет 12 (длина 6 и два поворота 6).

В заключении лабораторной работы с использованием программы РСВ пакета P-CAD необходимо провести трассировку соединений между контактами на плате и сравнить результаты между реализованным ручным способом алгоритмом Ли и трассировкой на ПЭВМ.

*Содержание отчета*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные.
4. Решение задачи трассировки соединений между контактами элементов схемы в монтажном пространстве односторонней печатной платы волновым алгоритмом.
5. Решение задачи трассировки соединений между контактами элементов схемы в монтажном пространстве односторонней печатной платы в пакете P-CAD.
6. Вывод по результатам работы.
7. Список использованной литературы.

#### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Перечислите основные положения волнового алгоритма.
2. Как производится моделирование распространения волны в зависимости от выбранного приоритетного порядка?
3. Как рассчитывается вес дискрета?
4. Может ли проходить трасса по условно-занятым дискретам?

#### Лабораторная работа 9

##### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ТРАССИРОВКИ ОДНОСЛОЙНОЙ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ЛУЧЕВЫМ АЛГОРИТМОМ

*Цель работы.* Ознакомиться с лучевым алгоритмом (алгоритмом Абрайтиса) и провести с его помощью трассы между контактами на односторонней печатной плате, а также решить задачу трассировки на ПЭВМ с использованием программы P-CAD.

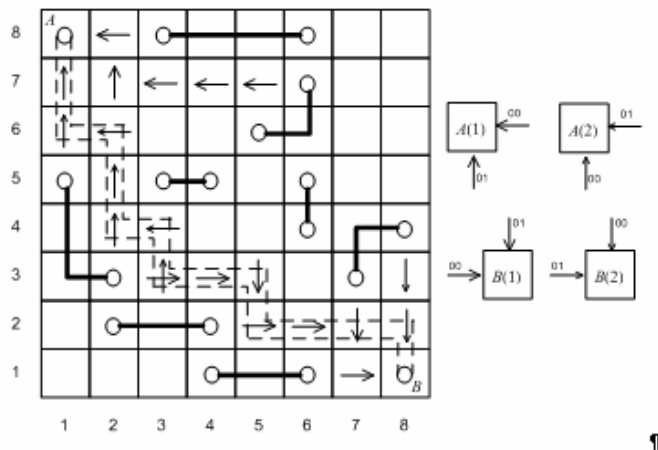
*Исходные данные.* Монтажное поле печатной платы с контактными отверстиями для установки элементов.

Требуется изучить постановку задачи трассировки элементов схемы и лучевой алгоритм решения; получить вариант задания, провести трассы между одноименными контактами в монтажном пространстве односторонней печатной платы с использованием алгоритма Абрайтиса по минимуму длины трассы при единичной длине шага распространения волны; решить задачу трассировки на ПЭВМ с использованием средств программы P-CAD.

## Методические указания по выполнению работы

Лучевой алгоритм, или алгоритм Абрайтиса представляет собой особую модификацию волнового алгоритма, основным его отличием является распространение волны не по всему полю, а вдоль лучей (направлений). Если встречаются препятствия, то лучи обходят их в соответствии с выбранными приоритетами. Лучевой алгоритм не относится к точным методам. С его помощью разводят 70 – 80 % трасс, с последующей доводкой другими способами. Для соединения контактов *A* и *B* задаются число исходящих лучей из каждого контакта (обычно по два луча) и приоритеты движения для каждого луча. Все лучи начинают одновременно распространяться шагами, до тех пор, пока не встретятся два разноименных луча, из дискретности встречи которых проводится трасса.

Рассмотрим использование алгоритма Абрайтиса на примере получения трассы между контактами *A* и *B*. На рис. 1 показан ход движения лучей согласно выбранному приоритетному порядку.



**Рис. 1. Трассировка платы лучевым алгоритмом**

Последовательность распространения лучей приведена в табл. 1.

**Таблица 1**

Шаг \ Луч	A(1)	A(2)	B(1)	B(2)
1	(2; 8)	(1; 7)	(7; 1)	(8; 2)
2	(2; 7)	(1; 6)	(7; 2)	(8; 3)
3	(3; 7)	(2; 6)	(6; 2)	–
4	(4; 7)	(2; 5)	(5; 2)	–
5	(5; 7)	(2; 4)	(5; 3)	–
6	–	(3; 4)	(4; 3)	–
7	–	(3; 3)	(3; 3)	–

В заключении лабораторной работы с использованием программы РСВ пакета P-CAD необходимо провести трассировку соединений между контактами на плате и сравнить результаты между реализованным ручным способом лучевым алгоритмом и трассировкой на ПЭВМ.

### *Содержание отчета*

1. Название лабораторной работы.
2. Цель работы.
3. Исходные данные.
4. Решение задачи трассировки соединений между контактами элементов схемы в монтажном пространстве односторонней печатной платы лучевым алгоритмом.
5. Решение задачи трассировки соединений между контактами элементов схемы в монтажном пространстве односторонней печатной платы в пакете P-CAD.
6. Вывод по результатам работы.
7. Список использованной литературы.

### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем отличие лучевого алгоритма от волнового?
2. Как происходит распространение лучей в зависимости от выбранного приоритетного порядка?
3. Каким образом проводится трасса?
4. Может ли проходить трасса по условно-занятым дискретам?

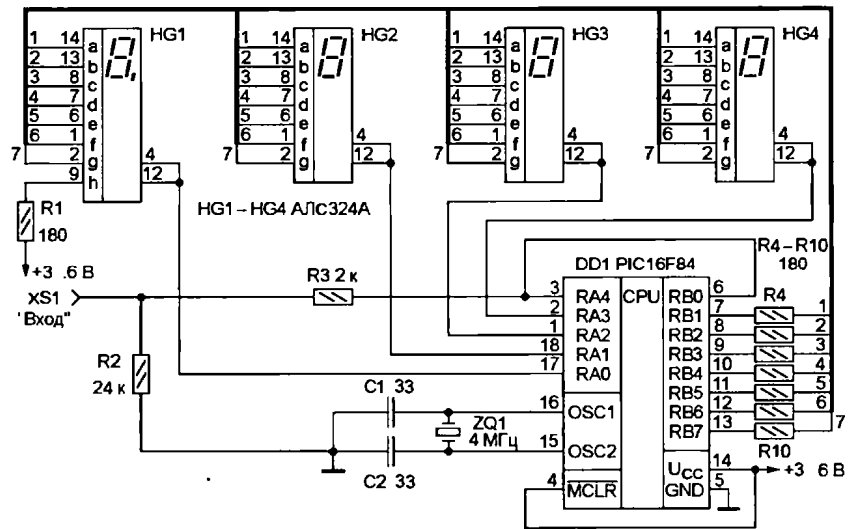


## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

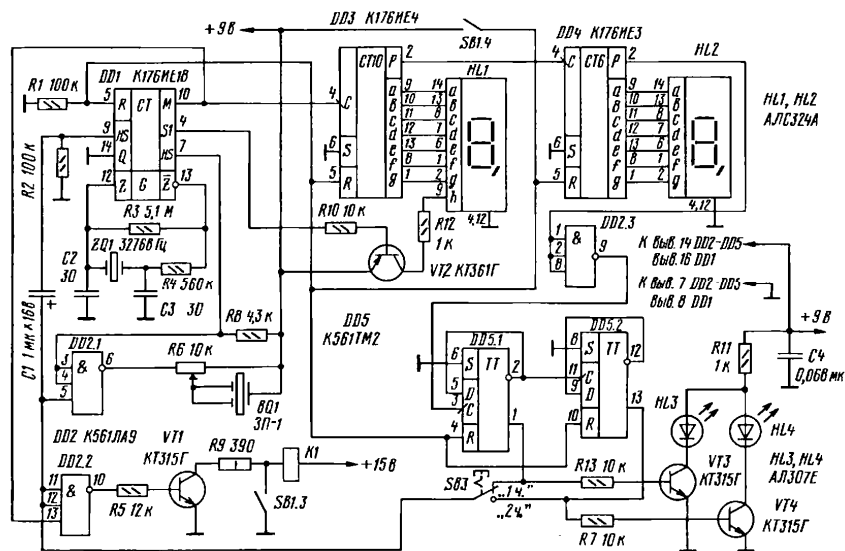
1. Норенков, И.П. Основы автоматизированного проектирования : учебник для вузов / И.П. Норенков. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. – 336 с.
2. Единая система конструкторской документации : справочное пособие. – М. : Издательство стандартов, 1989.
3. Алексеев, А. AutoCAD 2000. Специальный справочник / А. Алексеев. – СПб. : Питер, 2001. – 420 с.
4. Зими́на, Л. Руководство по работе с программой AutoCAD 2000 / Л. Зими́на, И. Черняк. – М. : Оверлей, 1999. – 442 с.
5. Романычева, Э.Т. Инженерная и компьютерная графика / Э.Т. Романычева, Т.Ю. Соколова, Г.Ф. Шандурина. – 2-е изд., перераб. – М. : ДМК Пресс, 2001. – 592 с.
6. Алексеев, О.В. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств : учеб. пособие для студентов радиотехнических специальностей вузов / О.В. Алексеев. – М. : Высшая школа, 2000. – 430 с.
7. Советов, Б.Я. Информационные технологии : учебник для вузов / Б.Я. Советов. – М. : Высшая школа, 2003. – 352 с.
8. Петухов, Г.А. Алгоритмические методы конструкторского проектирования узлов с печатным монтажом / Г.А. Петухов, Г.Г. Смолич, Б.И. Юлин. – М. : Радио и связь, 1987. – 152 с.
9. Корячко, В.П. Теоретические основы САПР / В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М. : Энергоиздат, 1987. – 400 с.
10. Разевиг, В.Д. Применение программ PCAD и Pspice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ / В.Д. Разевиг. – М. : Радио и связь, 1992. – Вып. 1 – 4
11. Лопаткин, А.В. Проектирование печатных плат в системе P-CAD 2001 : учебное пособие для практических занятий / А.В. Лопаткин. – Н. Новгород : НГТУ, 2002. – 178 с.
12. Муромцев, Ю.Л. Задачи компоновки радиоэлектронной аппаратуры : лабораторные работы / Ю.Л. Муромцев, В.Н. Грошев, В.В. Трейгер. – Тамбов : ТИХМ, 1987. – 36 с.
13. Муромцев, Ю.Л. Задачи размещения радиоэлектронной аппаратуры : лабораторные работы / Ю.Л. Муромцев, В.В. Трейгер, В.Н. Грошев. – Тамбов : ТИХМ, 1988. – 32 с.
14. Муромцев, Ю.Л. Задачи трассировки печатных плат : лабораторные работы / Ю.Л. Муромцев, В.В. Трейгер, В.Н. Грошев. – Тамбов : ТИХМ, 1990. – 32 с.



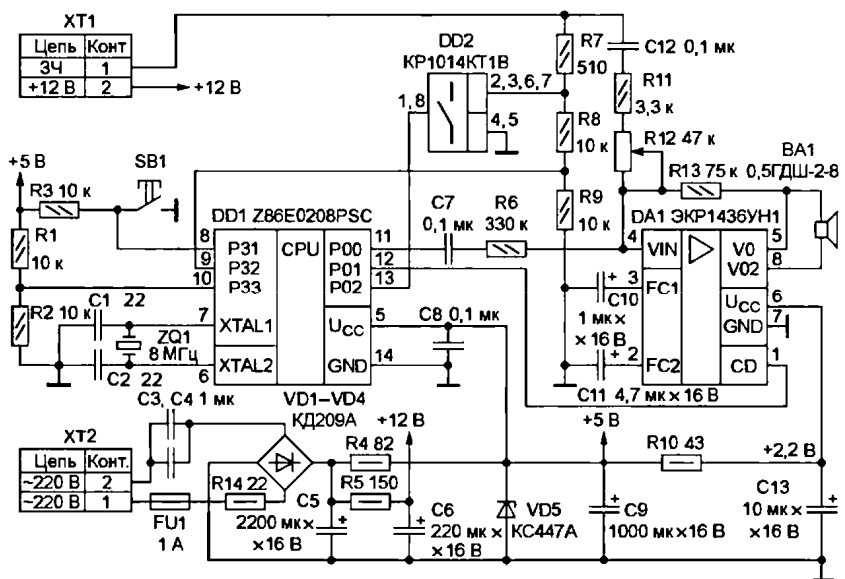




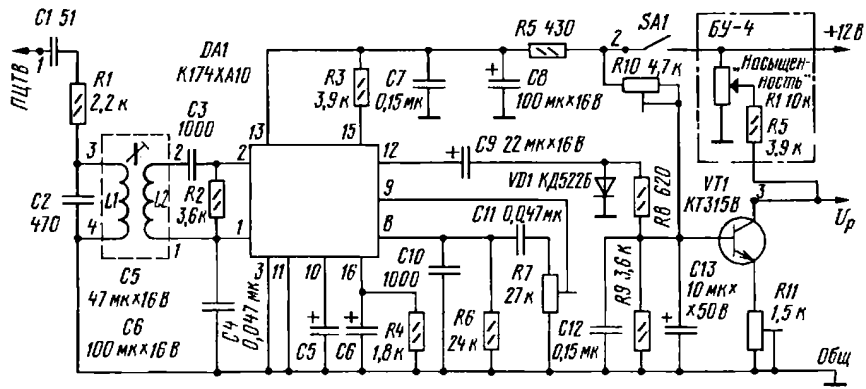
9. Частотомер



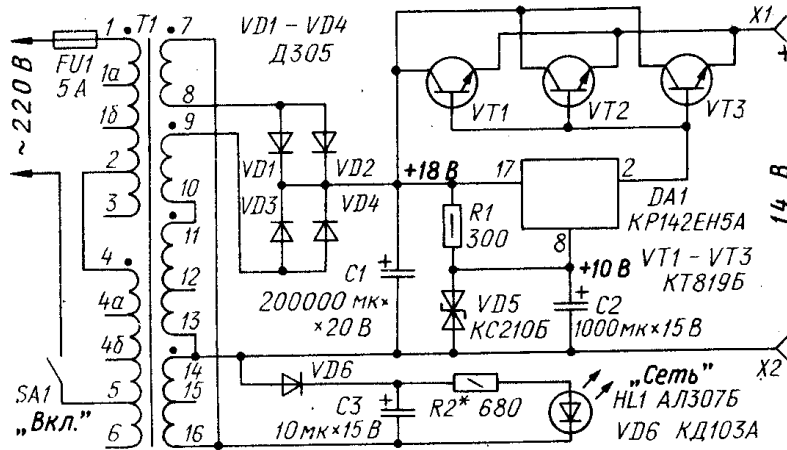
10. Таймер



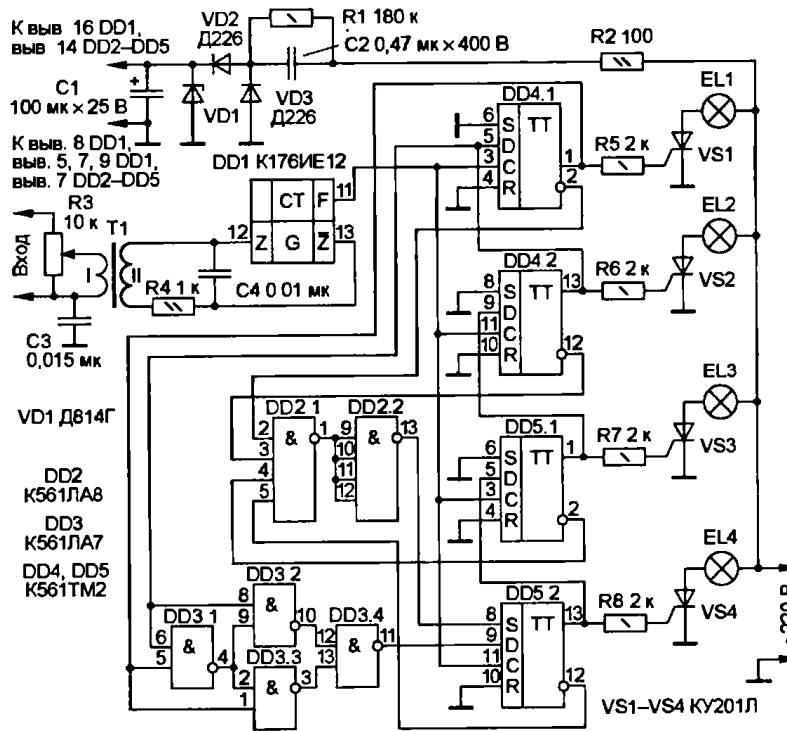
11. Звонок-домофон



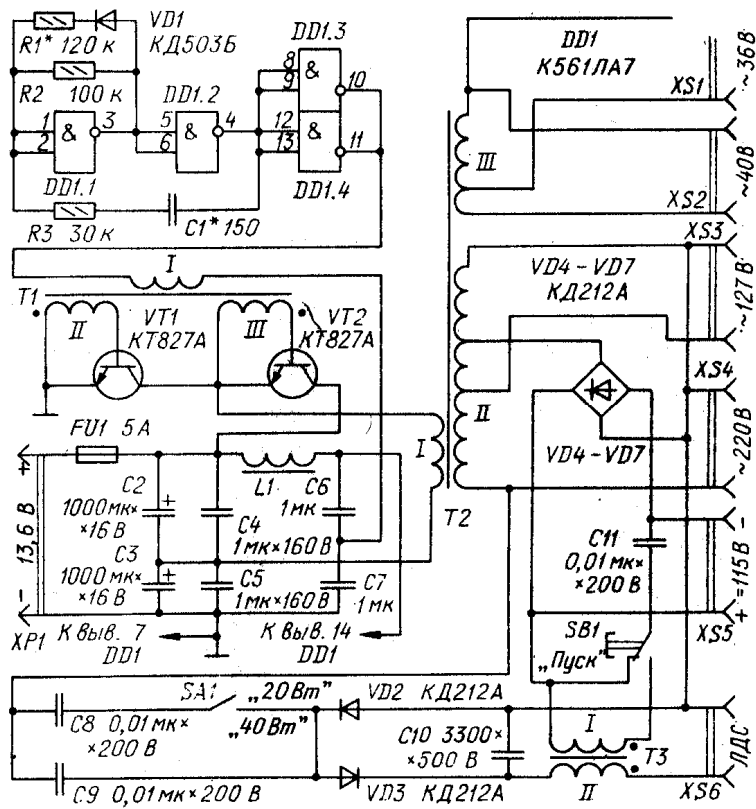
12. Регулятор насыщенности изображения



13. Источник питания

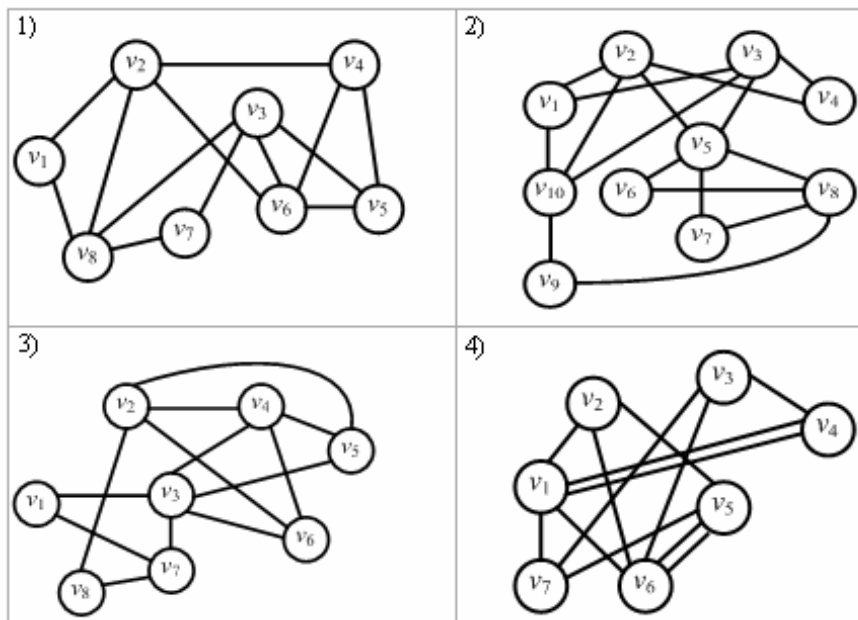


14. Установка светодинамическая

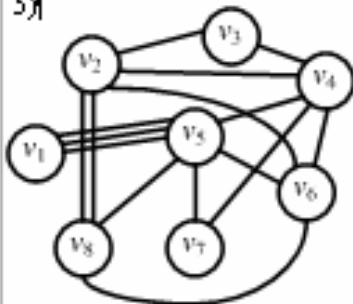


15. Преобразователь напряжения автомобильный

Варианты заданий к лабораторным работам 3 и 4

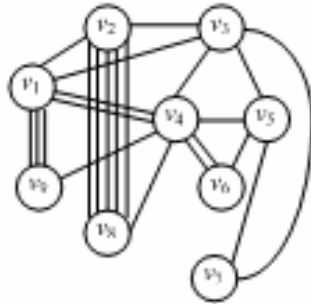


5)

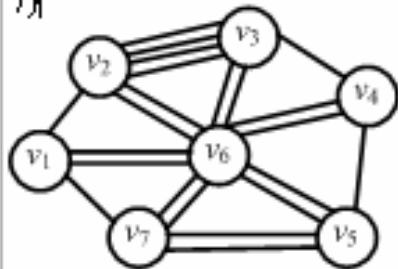


□

6)

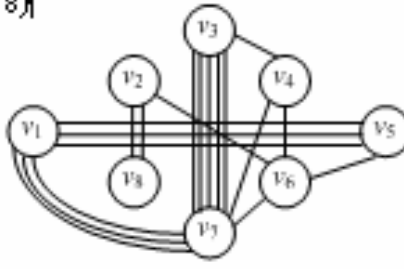


7)

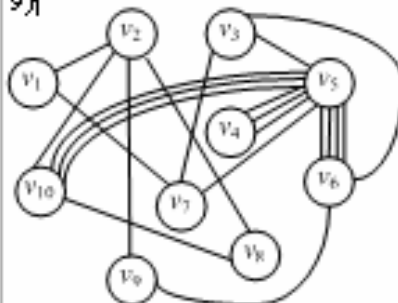


□

8)

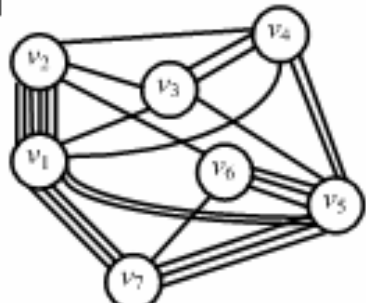


9)

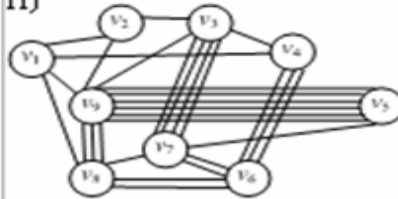


□

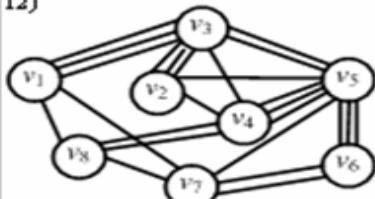
10)



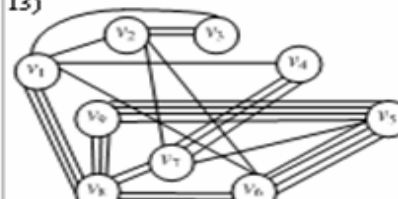
11)



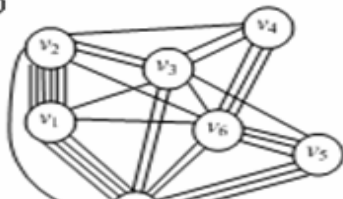
12)



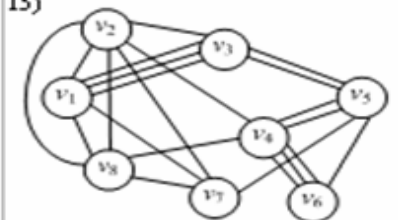
13)



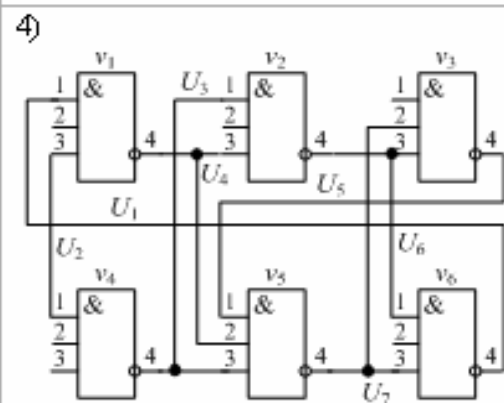
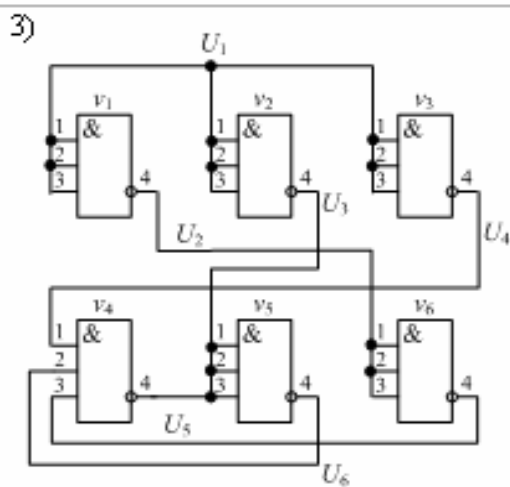
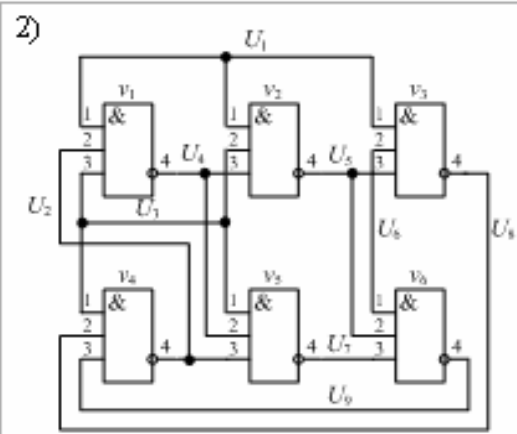
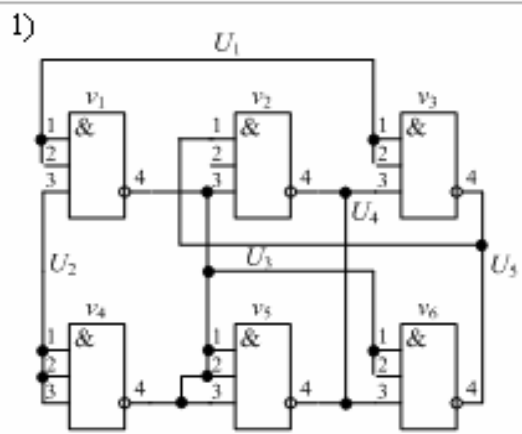
14)



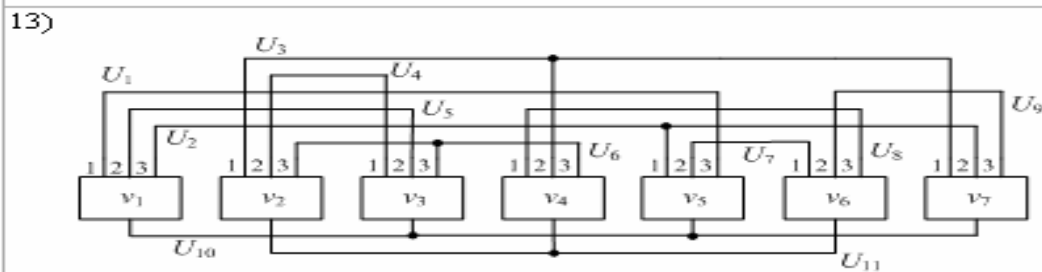
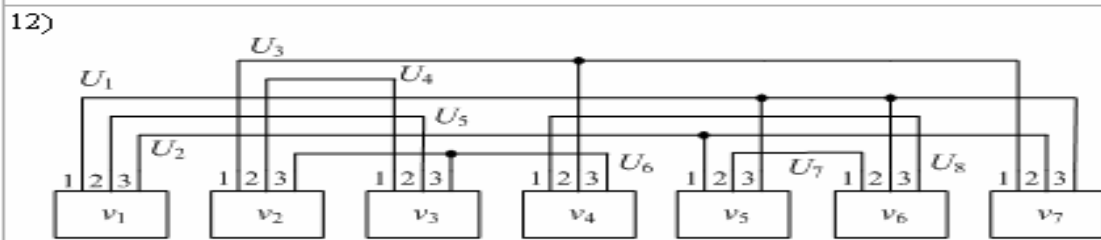
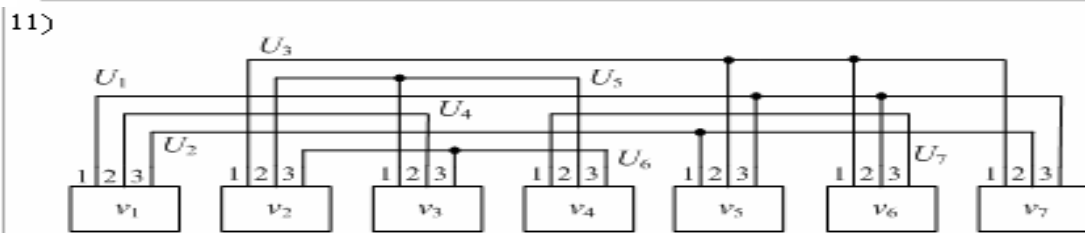
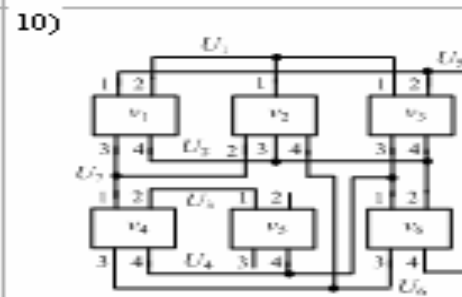
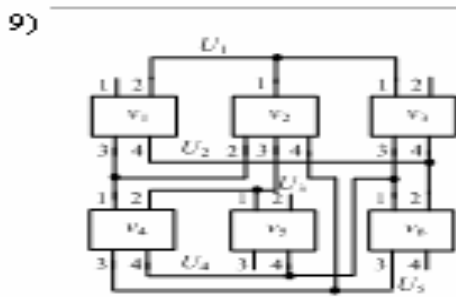
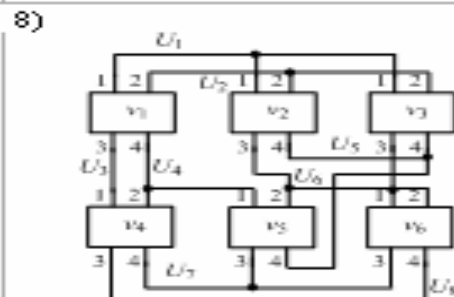
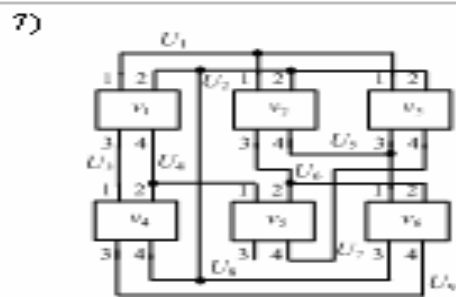
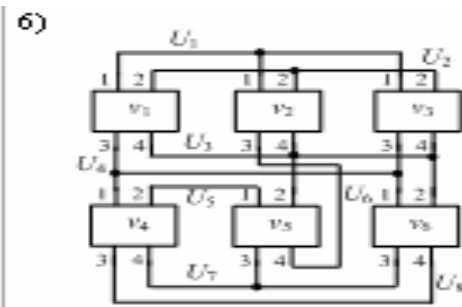
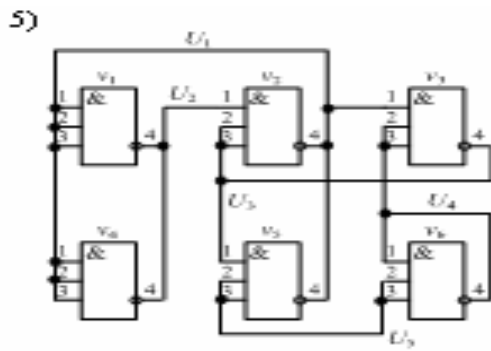
15)

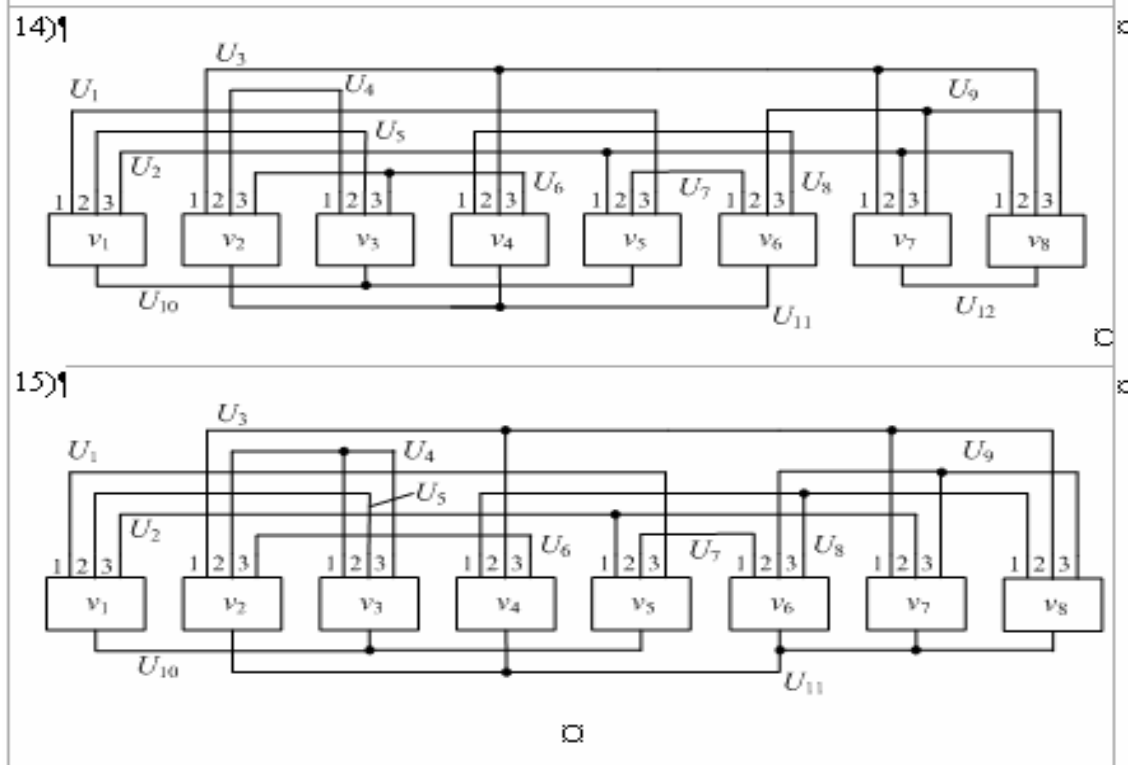


### Варианты заданий к лабораторной работе 5

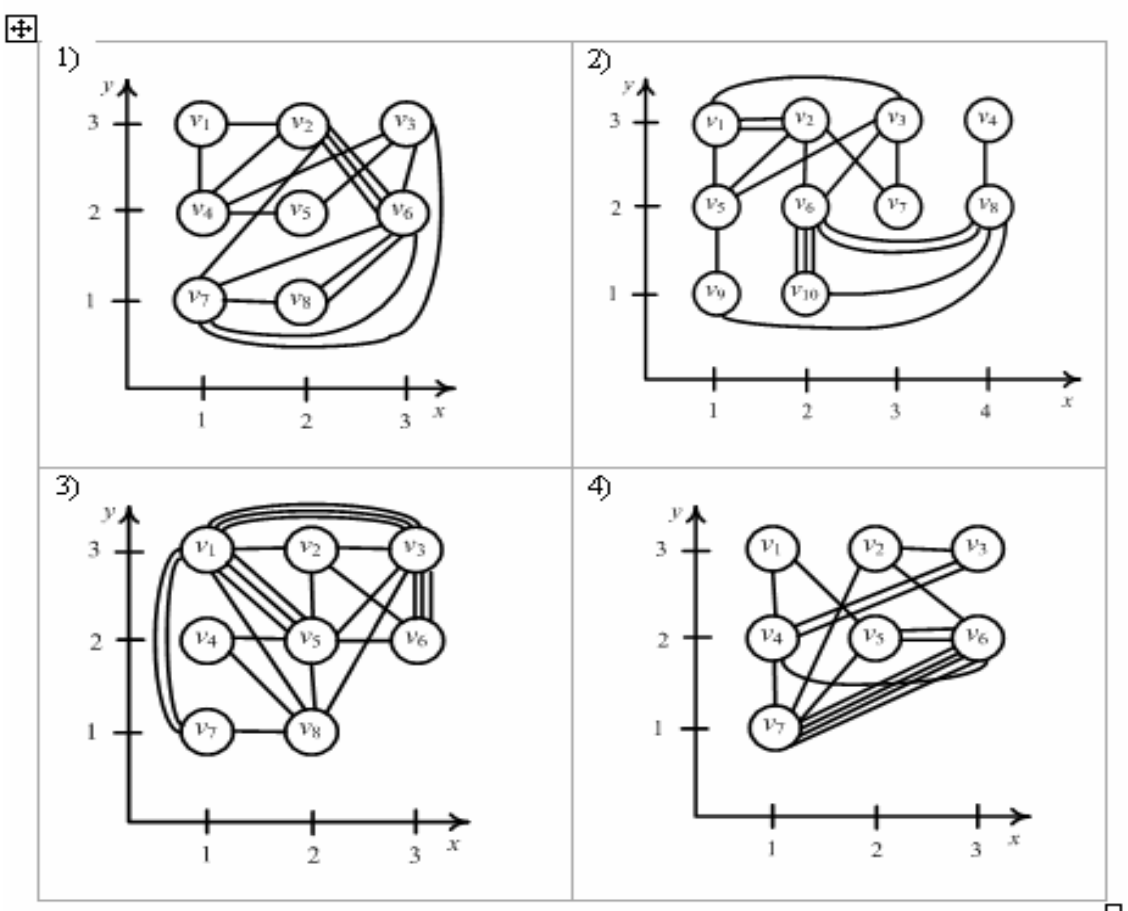


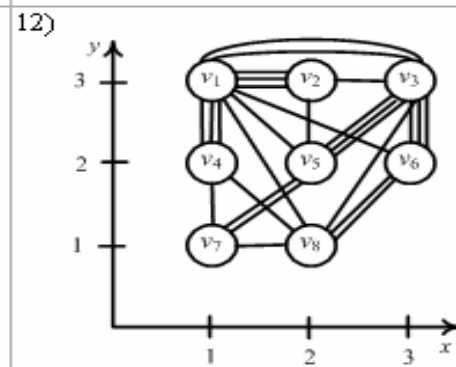
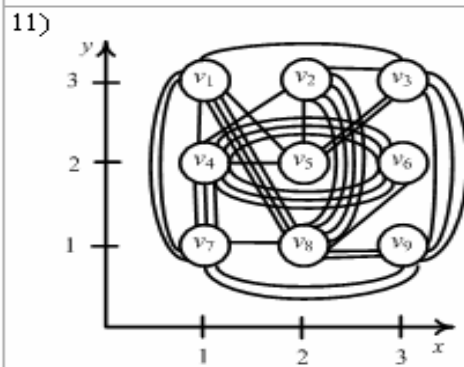
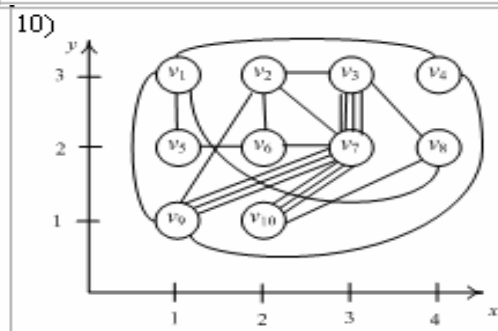
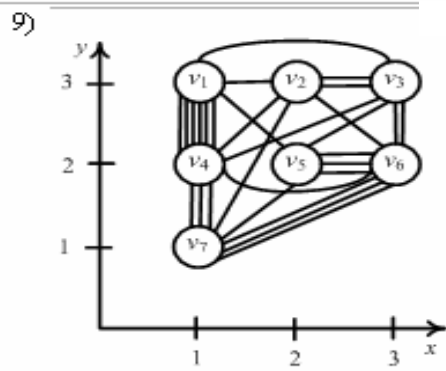
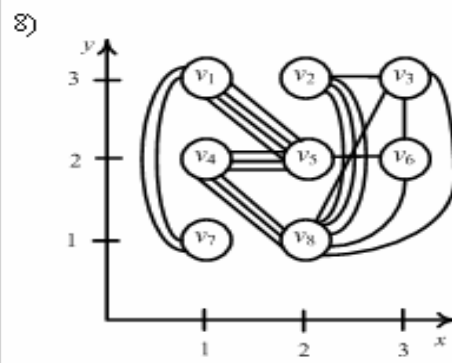
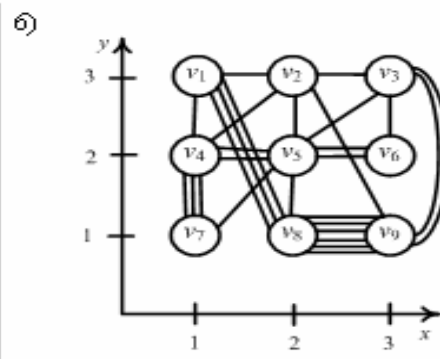
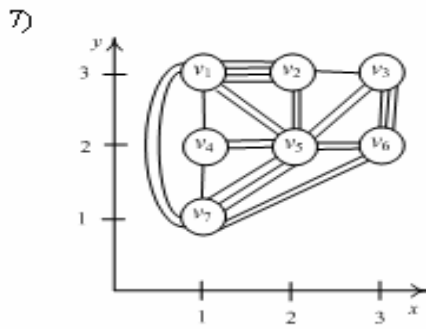
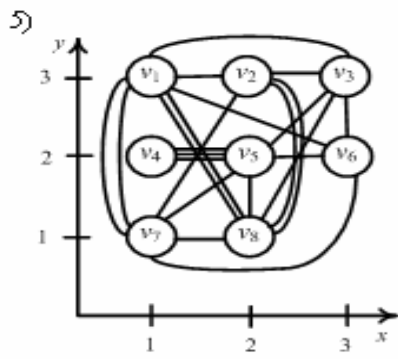




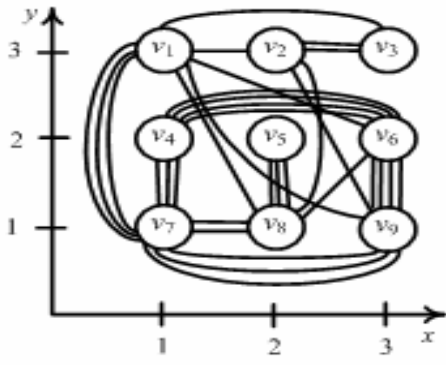


**Варианты заданий к лабораторным работам 6 и 7**

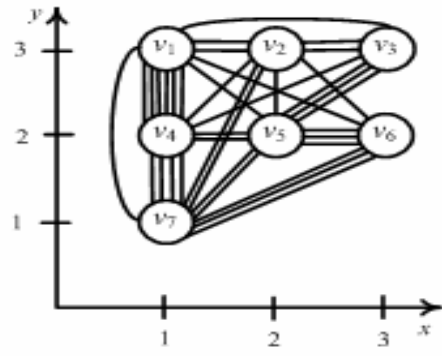




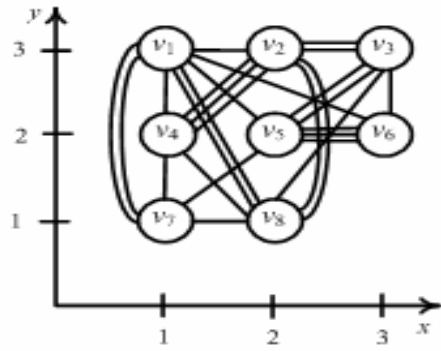
13)



14)

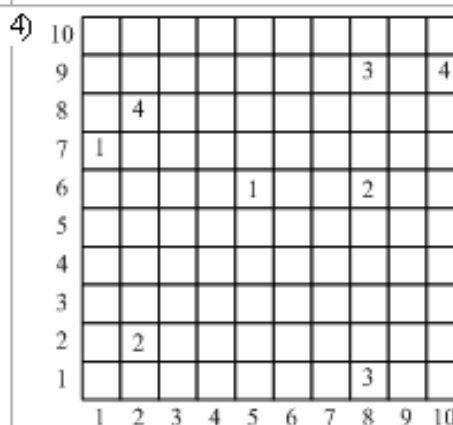
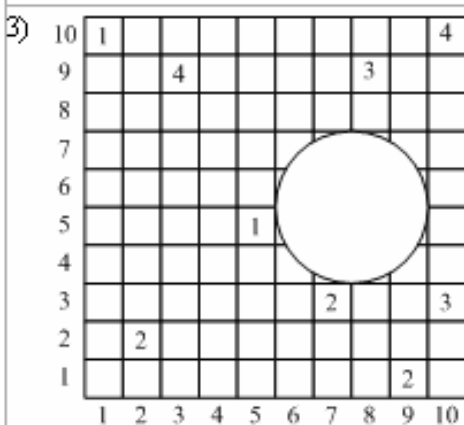
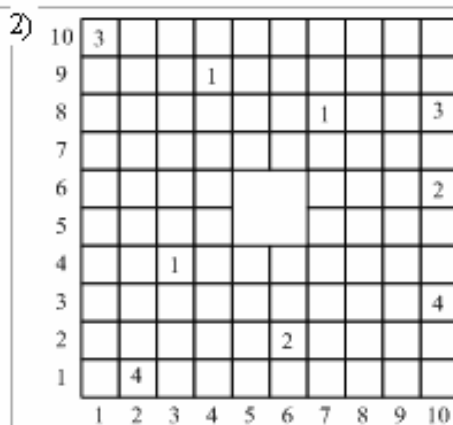
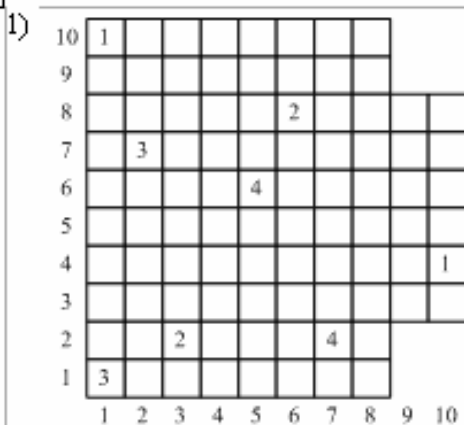


15)



# Варианты заданий к лабораторным работам 8 и 9

⊕



⊕

