

уменьшении частоты модуляции будет уменьшаться пространственное разрешение структуры. Для достижения максимальной чувствительности преобразователя необходимо работать на частотах 10 Гц.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Численными и аналитическими методами исследованы теплофизические свойства слоистой структуры пироэлектрик-ЖК-подложка. Показано, что величина пиросигнала достигает максимального значения при удельном сопротивлении ЖК, равном  $10^9$  Ом·м. Чувствительность структуры возрастает с уменьшением толщины пироэлектрика и частоты модуляции падающего излучения.

#### Список использованных источников

1. Lueder E., "Liquid Crystal Displays", Wiley Series, New York (2001) 352 p.
2. Lang S. B., *Ferroelectrics*, 53, 189-196 (1984).
3. Turi L., Kalman P., Toth A., *Ferroelectrics*, 99, 239-245 (1989).
4. Косоротов В.Ф., Кременчугский Л.С., Самойлов В.Б., Щедрина Л.В. «Пироэлектрический эффект и его практические применения» Киев: наук. думка, 1989, 224с.

#### SUMMARY

The thermophysical properties of layered structure pyroelectric-LC-substrate have been investigated by numerical and analytical methods. It has been shown that magnitude of pyroelectric signal reaches the maximal value at resistivity of LC equal  $10^9$   $\Omega$ ·m. The sensitivity of the structure increases with decrease of pyroelectric thickness and frequencies of modulation of incident radiation.

УДК 621.3.049.73.75:001.2(024)

### ОПТИМИЗАЦИЯ КОМПОНОВКИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА СТАДИИ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

*А.С. Шандриков*

Проектирование современных радиоэлектронных средств (РЭС) с многоуровневой конструктивной иерархией осуществляется с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР), что предполагает применение математических моделей принципиальных электрических схем.

Для решения задачи компоновки в качестве таких моделей используется граф  $G = (X, U)$ , в котором множество вершин  $X$  заменяет множество радиоэлектронных компонентов (РЭК), а множество рёбер  $U$  – электрические связи между ними в соответствии с принципиальной электрической схемой [1, 2].

Процесс построения графа принципиальной электрической схемы можно условно разбить на следующие этапы:

1 этап – развязка электрических узлов. Необходимость данной операции объясняется следующим обстоятельством. При переходе от принципиальной электрической схемы к графу каждый электрический узел заменяется полным подграфом, в котором каждая вершина соединена со всеми остальными вершинами подграфа. Это означает присутствие в подграфе электрического узла «лишних» рёбер – соединений, фактически не существующих в принципиальной электрической схеме [1, с. 17]. Наличие такой избыточной информации отрицательно сказывается на оптимальности результатов компоновки РЭС и размещения радиоэлектронных компонентов (РЭК) внутри скомпонованных модулей второго иерархического уровня. Для устранения указанного недостатка

осуществляют замену полного подграфа электрического узла деревом, связывающим все вершины подграфа. Такая замена сводится к удалению «лишних» рёбер, количество которых определяется по формуле

$$\gamma(G) = r - n + p, \quad (1)$$

- где  $r$  – количество рёбер в полном подграфе;  
 $n$  – количество вершин подграфа;  
 $p$  – компонента связности. Для полного подграфа (графа) компонента связности всегда равна единице.

После выполнения данного этапа для каждого электрического узла принципиальной электрической схемы должны быть построены связные подграфы, у которых  $r = n - 1$ , сформированные подграфы не должны содержать ни одного цикла;

2 этап – объединение полученных связывающих деревьев. В результате выполнения данного этапа должны быть проведены все рёбра, соединяющие между собой подграфы электрических узлов в соответствии с принципиальной электрической схемой;

3 этап – проведение рёбер, обозначающих связи между последовательно соединёнными РЭК во всех отдельных ветвях принципиальной электрической схемы. В результате выполнения данного этапа должна быть окончательно сформирована графовая математическая модель принципиальной электрической схемы проектируемого РЭС.

Решение задачи компоновки сводится к разрезанию полученного графа на куски с заданным количеством вершин в кусках.

Для разрезания графов на куски разработано множество алгоритмов, в основу которых положены различные эвристические методы: последовательные, итерационные и смешанные. Все используемые алгоритмы в различной степени обеспечивают приемлемые с практической точки зрения результаты компоновки. Основным критерием качества результатов компоновки РЭС (после критерия электромагнитотепловой совместимости, разумеется) являются минимум внешних связей между сформированными кусками или коэффициент разрезания графа, определяемый по формуле

$$\Delta(G) = \frac{\sum_{i=1}^P L_{ii}}{K} = \min \Delta(G) \quad (2)$$

где  $\sum_{i=1}^P L_{ii}$  – суммарное количество связей между вершинами внутри сформированных кусков графа (внутренних связей);

$K$  – количество связей между сформированными кусками графа (внешних связей);

$P$  – количество кусков, на которое разрезан граф

Задача оптимизации критерия (2) всегда была и остаётся актуальной, поиск алгоритмов, обеспечивающих её реализацию, не прекращается и представляет большой интерес как с теоретической, так и с практической точек зрения. Однако оптимизация критерия (2) может быть предопределена ещё на этапе построения математической модели проектируемого РЭС, точнее, на этапе построения связывающих деревьев полных подграфов электрических узлов принципиальной электрической схемы. Каждый полный подграф заменяется любым из  $d = n^{n-2}$  возможных вариантов связывающих деревьев. Для этого из полного подграфа удаляют «лишние» рёбра, количество которых определяется по формуле (1).

Любой из числа  $d$  вариантов связывающих деревьев будет эквивалентным с точки зрения требований дискретной математики к связности подграфа и отсутствию в нём циклов. По этой причине выбор того или иного варианта связывающего дерева чаще всего осуществляется произвольно, без какой-либо предварительной оценки последующих результатов разрезания и размещения графа независимо от наличия или отсутствия накладываемых технологических ограничений. Это объясняется неочевидностью влияния выбранного варианта связывающего дерева на получение оптимальных результатов разрезания и размещения графа, отсутствием пояснений по данному вопросу в литературных источниках [1, 2] и в их библиографических описаниях.

В большинстве случаев принципиальная электрическая схема РЭС содержит некоторое количество групп РЭК, имеющих между собой более одной связи, например, в случае параллельного соединения и т.п. Очевидно, что оптимальной компоновкой РЭС будет та, в результате которой параллельно соединённые РЭК окажутся в одном модуле, например, на одной плате. Для оптимизации результатов решения задач разрезания и размещения графа необходимо анализировать возможные варианты связывающих деревьев и выбирать наиболее подходящий вариант в каждой конкретной ситуации [3].

Рассмотрим возможности влияния на результаты разрезания и размещения графа связывающих деревьев в узлах параллельного соединения РЭК на примерах их «крайних» конфигураций.

В качестве примера на рис. 1 представлен упрощённый вариант принципиальной электрической схемы звукового сигнализатора [4]. Предположим, что звуковой сигнализатор необходимо скомпоновать в три блока по 5, 6 и 7 РЭК при отсутствии каких-либо технологических ограничений, и для решения данной задачи построим математическую модель в виде графа.

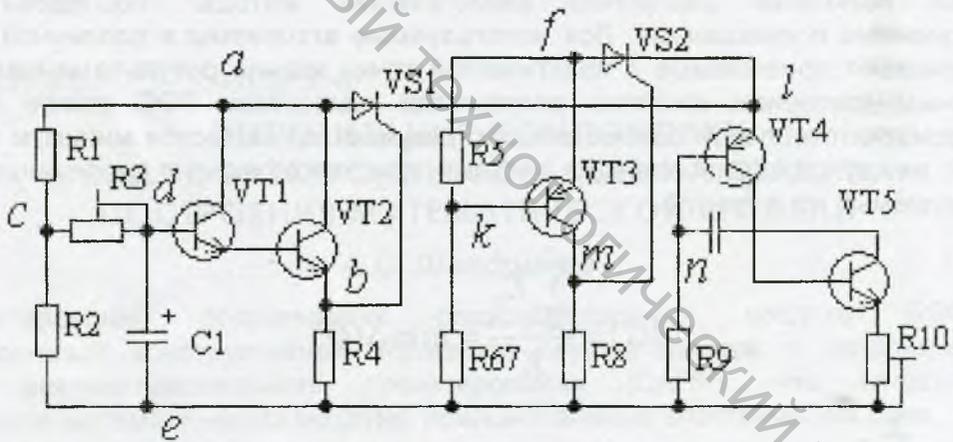


Рисунок 1 - Принципиальная электрическая схема звукового сигнализатора

В данной принципиальной электрической схеме транзисторы  $VT_1$ ,  $VT_2$  и тиристор  $VS_1$  имеют по два соединения: транзистор  $VT_2$  и тиристор  $VS_1$  соединены в узлах  $a$  и  $b$ . Коллекторы транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$  соединены в узле  $a$ , а эмиттер транзистора  $VT_1$  связан с базой транзистора  $VT_2$  отдельной ветвью. Полные подграфы узлов  $a$  и  $b$  представлены на рисунках 2 и 3.

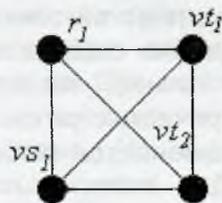


Рисунок 2

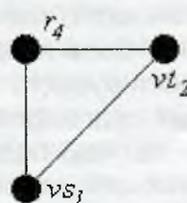


Рисунок 3

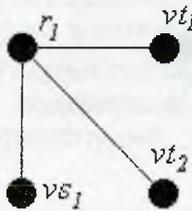


Рисунок 4

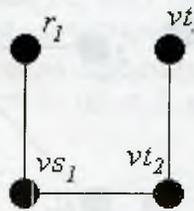


Рисунок 5

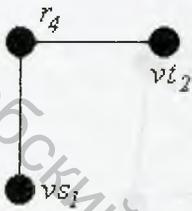


Рисунок 6

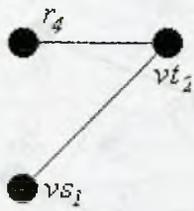


Рисунок 7

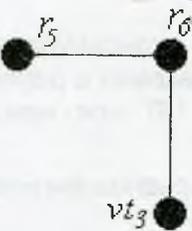


Рисунок 8



Рисунок 9

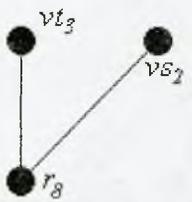


Рисунок 10

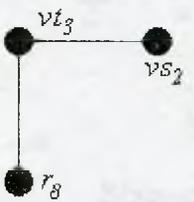


Рисунок 11

Для узлов a и b из 16 возможных могут быть выбраны любые варианты связывающих деревьев, но мы рассмотрим только два из них: первый вариант – случайный, вершины, интерпретирующие транзисторы VT1 и VT2 и тиристор VS1, не соединены маршрутом и второй вариант – проанализированный, когда эти вершины соединены маршрутом. Первый и второй варианты связывающих деревьев для подграфа Ga узла a представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

Аналогично для узла b в связывающем дереве может отсутствовать связь между вершинами vt2 и vs1 (первый вариант, рисунок 6), а может быть и сохранена (второй вариант, рисунок 7).

Сходная ситуация характерна и для попарно соединённых в узлах f, k и m резистора R5, транзистора VT3 и тиристора VS2. Резистор R5 и тиристор VS2 одной связью соединены в узле k. Первый вариант связывающего дерева для подграфа Gk при отсутствии ребра u(r5, vt3) представлен на рисунке 8, а второй, проанализированный, вариант, т.е. с сохранённым ребром u(r5, vt3) – на рисунке 9.

Соответственно, первый (случайный) и второй (проанализированный) варианты связывающего дерева для подграфа Gm узла m представлены на рисунках 10 и 11.

Узел f отличается от всех рассмотренных узлов тем, что в нём соединены только те РЭК, которые имеют между собой параллельное соединение, поэтому все рёбра в полном подграфе Gf узла f равноценны, т.е. нет вариантов связывающих деревьев, среди которых в результате анализа можно было бы выделить лучший. В этом случае можно

удалить любое ребро и рассматривать только один вариант связывающего дерева подграфа Gf, например, представленный на рисунке 12.

Для подграфов Gc и Gd анализ возможных вариантов связывающих деревьев особого значения не имеет. При сохранении в подграфе Gc ребра u(r1, r3) и выбранном «лучшем» варианте связывающего дерева для узла a (рисунок 5) возрастает вероятность распределения резистора R1 в один блок с резистором R3, транзисторами VT1 и VT2 и тиристором VS1. В противном случае, в одном блоке с транзисторами VT1 и VT2, резистором R3 и конденсатором C1 может оказаться резистор R2. Количество внешних связей между сформированными блоками при этом не изменяется, поэтому достаточно выбрать любой возможный вариант. Аналогичная ситуация складывается и в узле d. Варианты связывающих деревьев для подграфов Gc и Gd представлены на рисунках 13 и 14.

Подграф Ge узла e содержит наибольшее количество вершин. Один из возможных «случайных» вариантов связывающего дерева этого подграфа представлен на рисунке 15.

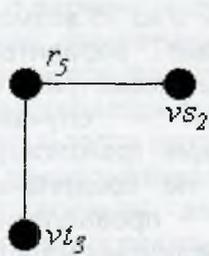


Рисунок 12

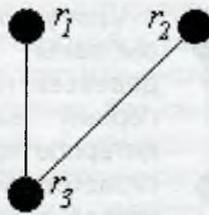


Рисунок 13

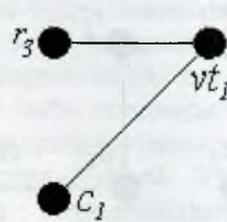


Рисунок 14

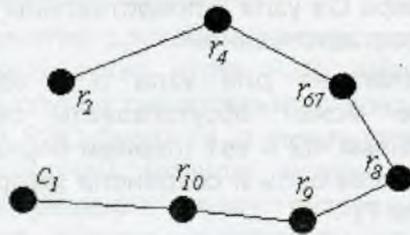


Рисунок 15

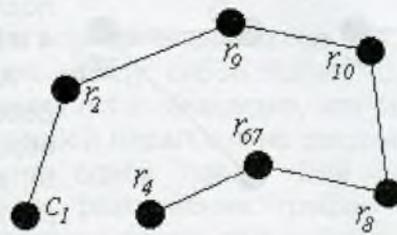


Рисунок 16

Учитывая заданное условие компоновки и конкретную конфигурацию принципиальной электрической схемы звукового сигнализатора, «разрыв» в дереве целесообразно оставить между вершинами  $c_1$  и  $r_4$  (рисунок 16) или между вершинами  $r_8$  и  $r_9$ .

Для узлов I и II любые варианты связывающих деревьев будут равнозначными, как, например, представленные на рисунках 17 и 18.

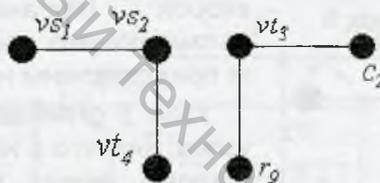


Рисунок 17

Рисунок 18

По результатам построения «случайных» вариантов связывающих деревьев для каждого электрического узла схемы был сформирован граф  $G(1)$ , представленный на рис. 19. На рис. 20 представлен граф  $G(2)$ , построенный с учётом проведённого анализа возможных вариантов связывающих деревьев для каждого электрического узла принципиальной электрической схемы.

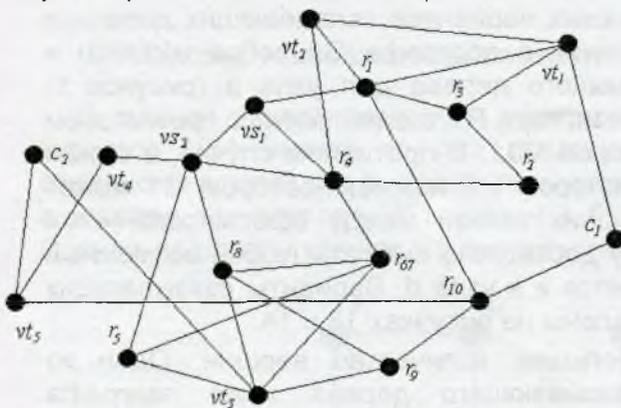


Рисунок 19

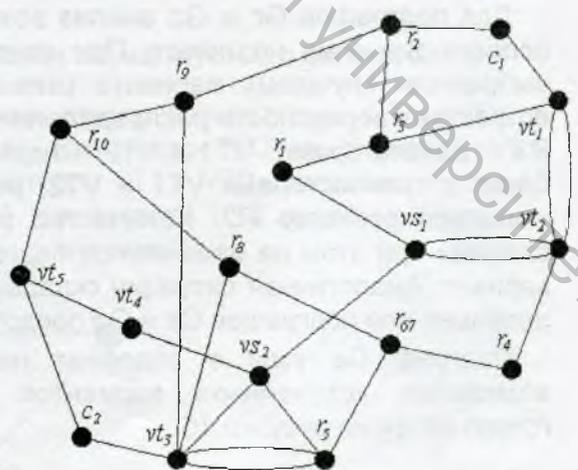


Рисунок 20

Как видно из рисунка 20, учёт связей между параллельно соединёнными РЭК в каждом электрическом узле схемы приводит к построению мультиграфа  $G(2)$ .

Результаты разрезания сформированных графов  $G(1)$  и  $G(2)$  на куски  $G_1$ ,  $G_2$  и  $G_3$ , содержащие  $n_1 = 5$ ,  $n_2 = 6$  и  $n_3 = 7$ , представлены на рисунках 21 и 22 соответственно.

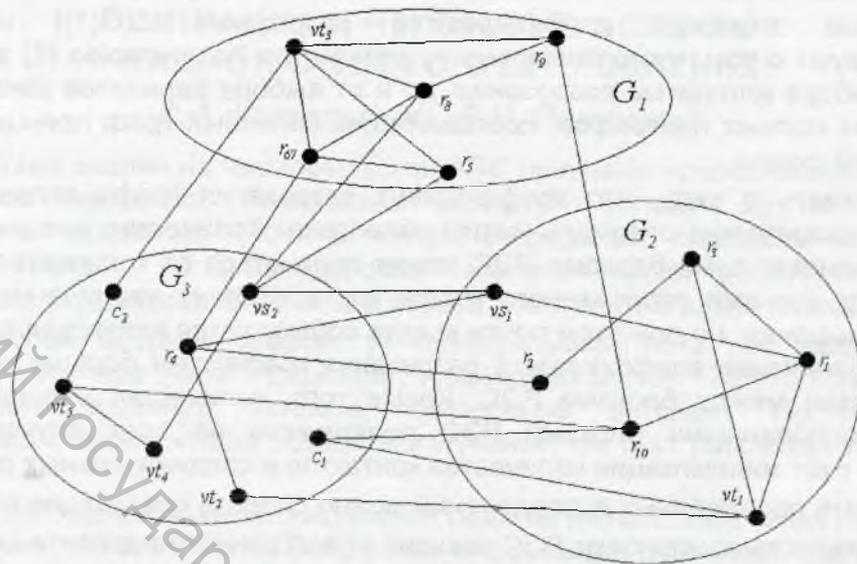


Рисунок 21

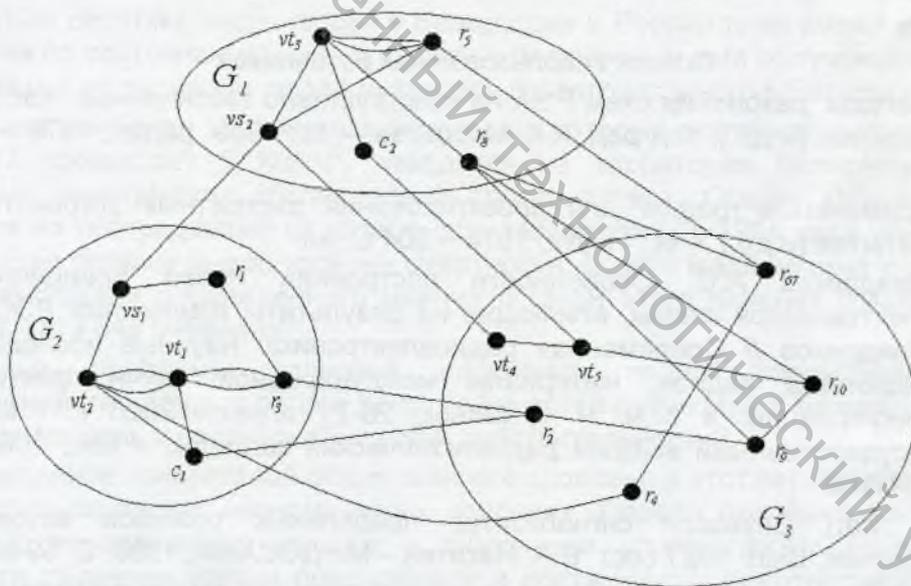


Рисунок 22

Коэффициенты разрезания графов  $G(1)$  и  $G(2)$ :  $\Delta(G(1)) = 17/12 = 1,417$ ;  $\Delta(G(2)) = 19/10 = 1,9$ .

Как видно из представленных результатов, компоновка с использованием математической модели в виде графа  $G(2)$  позволяет сократить количество внешних связей на 2.

Разрезание целенаправленно осуществлялось с использованием последовательного алгоритма формирования заданных кусков. Этот алгоритм отличается высокой производительностью, но в большинстве случаев результаты его работы не оптимальны, что неоднократно отмечается в [1] и [2].

Одним из наиболее эффективных алгоритмов разрезания графов является алгоритм последовательного назначения вершин в формируемые куски [5]. В результате повторного разрезания графов  $G(1)$  и  $G(2)$  с использованием алгоритма [5] были получены следующие значения коэффициентов разрезания:  $\Delta(G(1)) = 19/10 = 1,9$ ;  $\Delta(G(2)) = 22/7 = 3,143$ .

Полученные значения коэффициентов разрезания  $\Delta(G(1))$  и  $\Delta(G(2))$  свидетельствуют о том, что оптимальность результата по критерию (2) зависит не только от выбора алгоритма разрезания, но и от выбора вариантов связывающих деревьев для полных подграфов, составляющих конечный граф принципиальной электрической схемы.

Следует иметь в виду, что коэффициент разрезания графа является лишь косвенным показателем оптимальности компоновки. Количество внешних связей между скомпонованными блоками РЭС может отличаться от количества внешних связей между кусками разрезанного графа как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения, но при этом почти всегда соблюдается некоторая пропорция: чем меньше значение коэффициента разрезания графа, тем больше количество внешних связей между блоками РЭС. Кроме того, количество внешних связей между скомпонованными блоками РЭС практически во всех случаях можно сократить за счёт минимизации количества контактов в соединительных разъёмах.

В результате проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

- 1) оптимальность компоновки РЭС зависит от выбранного варианта построения математической модели принципиальной электрической схемы;
- 2) при выборе варианта математической модели следует учитывать конфигурацию связей между РЭС.

#### Список использованных источников

1. Методы разбиения схем РЭА на конструктивно законченные части / К.К. Морозов [и др.]; под ред. К.К. Морозова. – М.: Сов. радио, 1978 – 136 с., ил.
2. Применение графов для проектирования дискретных устройств / А.Н. Мелихов [и др.]. – М.: Наука, 1974 – 304 с., ил.
3. Шандриков А.С. Особенности построения графа принципиальной электрической схемы, влияющие на результаты компоновки РЭС / А.С. Шандриков // Современная радиоэлектроника: научные исследования, подготовка кадров: материалы международной научно-практической конференции: в 3 ч. Ч 1, Минск, 20-21 апреля 2006 г. / Минский государственный высший радиотехнический колледж. – Мн.: 2006. – С. 354-358.
4. Л. Кац. Звуковой сигнализатор предельных режимов автомобиля: сборник. Вып. 102 / сост. В.А. Никитин – М.: ДОСААФ, 1988. С. 59-63.
5. Шандриков А.С. Алгоритм разрезания графа методом последовательного назначения вершин в формируемые куски / А.С. Шандриков // Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта імя П.М. Машэрава. – 2005. – № 4(38). С. 111-118.

#### SUMMARY

The work is devoted to questions of optimization of configuration of radioelectronic means at a stage of construction in form off of mathematical models of the principal electrical circuits using the analytical approach to a choice of variants of connecting trees replacing complete of subgraphs of electrical units in the circuits. The examples of graphs of the principal electrical circuit constructed with the amount and without the account of edges between radioelectronic components, having some electrical connections and results of cutting these графов, cutted with use of various algorithms are given.