

Министерство высшего и среднего специального образования
РСФСР

Ордена Трудового Красного Знамени
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РАДИОФИЗИЧЕСКИЙ
ИНСТИТУТ

Преприят № 21



ИРФИ

О.А.Башкиров, Ю.К.Богатырев, С.В.Княшко,
Л.А.Островский, В.В.Папко, М.И.Рабинович

ОБ УСТРОЙСТВАХ МНОГОЗНАЧНОЙ ЛОГИКИ
НА ВОЛНОВЫХ ЭЛЕМЕНТАХ

г. Горький,
1972

The paper considers some logical principles and examples of realization of the multivalued logical elements and devices on the basis of wave systems.

The concrete multistable memory and logical elements are described on the basis of discrete lines with parametric or tunnel diodes. Some devices consisting of these elements are also treated.

Преимущества вычислительных систем, основанных на элементах многозначной логики, хорошо известны [1]. В частности, применение десятичного кодирования позволяет упростить аппаратуру, резко уменьшить количество связей между элементами, избежать перехода от одной системы счисления к другой. Однако технические трудности, связанные с реализацией многозначных элементов, препятствовали распространению таких систем. Лишь в самые последние годы был разработан ряд пригодных для практического использования многозначных логических и запоминающих элементов [2]. Для кодирования информации в них используются в качестве признака состояния частота электрических колебаний, длительность или число импульсов, фаза импульсов относительно опорной последовательности и т.д. Фазиоимпульсные многозначные элементы уже нашли применение в приборах, выпускаемых промышленностью [3].

Известные многозначные элементы, однако, обладают некоторыми особенностями, которые до сих пор препятствуют созданию на их основе сложных быстродействующих вычислительных устройств.

В настоящей работе рассматриваются некоторые логические принципы, примеры реализации и результаты экспериментального исследования многозначных запоминающих и логических элементов и устройств на базе волновых систем. Генераторы, усилители и преобразователи высокочастотных сигналов различной формы, построенные на основе таких систем, могут служить динамическими элементами с большим чис-

лом устойчивых состояний (мод) и их применение в качестве многозначных логических элементов представляется естественным. Такие элементы мы будем называть волнотронами.

Рассматриваемые логические принципы работы волновых элементов-волнотронов и устройств многозначной логики на их основе не зависят от конкретной реализации элементов. Речь идет о классе логических устройств, создание которых может основываться на физических принципах, уже используемых в сосредоточенных логических элементах, и на применении новых, преимущество которых может проявиться лишь в волновых системах.

Описываемые далее конкретные реализации устройств "частотной" и "импульсной" логики имеют в определенном смысле модельный характер. Однако на их примере удается продемонстрировать принципиальные возможности волновых элементов и устройств многозначной логики. К числу преимуществ этих устройств следует отнести идентичность элементов, составляющих сложную вычислительную систему; совмещение в одном элементе логических и усилительных функций, что позволяет сократить количество элементов; возможность использования СВЧ техники и, следовательно, повышение быстродействия. Следует отметить также возможность применения при их создании новой технологии пленочных и многослойных схем [4].

§ 1. Логическое описание взаимодействия дискретных сигналов в многозначных системах.

Одним из основных вопросов при исследовании новых принципов построения логических элементов является выяснение возможности построения полных систем логических функций. Вопросы построения логических функций при фазоимпульсном и частотном представлении информации исследовались в работах [5, 6], в частности, были построены канонические формы представлений функций. Однако непосредственное применение полученных результатов затрудняется сложностью реализации в волновых системах характеристической функции, что приводит к неоправданной сложности получаемых форм представления функций. В данной работе исследуются логические модели взаимодействия колебаний, легко осуществляемые в волновых системах.

В основе проводимых далее построений лежит использование логических функций в логике со значностью большей, чем K , но не удовлетворяющих требованиям полноты, для построения произвольной функции (канонической формы) в K - значной логике.

Рассмотрим некоторые варианты логического описания процессов в волновых системах при различных способах кодирования информации.

1. Пусть в волновой системе возможно существование импульсов с различными фазами относительно некоторого опорного колебания, и, кроме, того,

импульс может отсутствовать (фаза-импульсный многоустойчивый элемент). Обозначим фазы импульсов через $0, 1, 2, \dots, k-1$, а отсутствие импульса через \emptyset , то есть всего $k+1$ значение.

Введем следующие логические операции:

1) амплитудное совпадение

$$x_1 \wedge x_2 = \begin{cases} x_1 & \text{при } x_1 = x_2 \\ \emptyset & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1.1)$$

2) дизъюнкция

$$x_1 \vee x_2 = \begin{cases} x_1 & \text{при } x_2 = \emptyset \\ x_2 & \text{при } x_1 = \emptyset \end{cases} \quad (1.2)$$

при $x_1 \neq \emptyset$ и $x_2 \neq \emptyset$ одновременно функция не определена

3) задержка

$$DC(x) = \begin{cases} (x+c) \bmod k & \text{при } x \neq \emptyset \\ \emptyset & \text{при } x = \emptyset \end{cases} \quad (1.3)$$

Пусть имеется также набор констант $\emptyset, 0, 1, 2, \dots, k-1$. Покажем, что с помощью функций (1), (2), (3) и набора констант можно построить произвольную функцию k -значной логики, причем переменные и сама функция принимают значения $0, 1, 2, \dots, k-1$.

Рассмотрим вспомогательную функцию

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = & \quad (1.4) \\ = & ((\dots(D_{z_1}(x_1 \wedge \alpha_1) \wedge D_{z_2}(x_2 \wedge \alpha_2)) \wedge \\ & \wedge D_{z_3}(x_3 \wedge \alpha_3)) \dots D_{z_n}(x_n \wedge \alpha_n)), \end{aligned}$$

где величина задержки $D\alpha_i$ определяется из соотношения

$$\begin{aligned} \alpha_i &= \max(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) - \alpha_i \\ i &= 1, 2, \dots, n \\ \alpha_i &= 0, 1, 2, \dots, k-1 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Тогда произвольная функция k -значной логики может быть определена в виде

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) &= D_{0,0} \dots 0 (\psi_{0,0} \dots 0 (x_1, x_2, \dots, x_n)) \dot{\vee} \\ &\dot{\vee} D_{1,0} \dots 0 (\psi_{1,0,0} \dots 0 (x_1, x_2, \dots, x_n)) \dot{\vee} \dots \\ &\dots \dot{\vee} D_{k-1, k-1} \dots k-1 (\psi_{k-1, k-1} \dots k-1 (x_1, x_2, \dots, x_n)) \dot{\vee} \end{aligned} \quad (1.6)$$

где величина задержки $D_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n}$ определяется из равенств

$$D_{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n} = D_{C_{\alpha}}(x) \quad (1.7)$$

$$C_{\alpha} = (f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) + (k - \max(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n))) \bmod k.$$

Справедливость (1.6) легко проверить непосредственной подстановкой. Действительно, если зафиксировать набор переменных $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$, то в выражении (1.6) все члены обращаются в 0, кроме члена, содержащего $f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$.

2. Существование в волновой системе колебаний, отличающихся основной частотой, позволяет построить логическую систему с частотным кодированием⁺⁾ . Пусть множеству дискретных значений частоты колебаний соответствуют значения логической переменной счетно-значной логики $0, 1, 2, \dots, M$, где 0 соответствует отсутствию сигнала, а ограничение значений частоты величиной M отражает конечность полосы пропускания системы. Предположим, что можно осуществить следующие преобразования частотных сигналов:

1) сложение частот с выделением суммарной составляющей

$$x \dot{+} y = \begin{cases} x+y & \text{при } x \neq 0 \quad y \neq 0 \\ 0 & \text{при } x = 0 \quad \text{или } y = 0 \end{cases} \quad (1.8)$$

2) вычитание частот с выделением разностной составляющей

$$x \dot{-} y = \begin{cases} |x-y| & \text{при } x \neq 0, y \neq 0, x \neq y \\ 0 & \text{при } x = 0, y = 0 \text{ или } x = y \end{cases} \quad (1.9)$$

3) выделение фильтром одного дискретного значения частоты

$$x^i = \begin{cases} x & \text{при } x = i \\ 0 & \text{при } x \neq i \\ i & = 1, 2, 3, \dots, M. \end{cases} \quad (1.10)$$

⁺⁾ Многозначная логика с частотным кодированием также изложена в [7] .

4) объединение частотных сигналов (дизъюнкция)

$$x \dot{\vee} y = \begin{cases} x & \text{при } y = 0 \\ y & \text{при } x = 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

не определено при $x \neq 0$ и $y \neq 0$
одновременно

Пусть имеется также набор констант $1, 2, 3, \dots$.
М. Покажем, что с помощью соотношений (1.8), (1.9),
(1.10), (1.11) можно построить произвольную функ-
цию k -значной логики. Пусть задана некоторая
функция k -значной логики $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где пе-
ременные и функция принимают значения из множест-
ва $0, 1, 2, \dots, k-1$. Сопоставим k -значным пе-
ременным x_i переменные y_i , принимающие
значения

$$y_1 = c_1, c_1 + \Delta, \dots, c_1 + (k-1)\Delta \quad \text{для } x_1, \quad (1.12)$$

$$y_2 = c_2, c_2 + \Delta, \dots, c_2 + (k-1)\Delta \quad \text{для } x_2$$

.....

$$y_n = c_n, c_n + \Delta, \dots, c_n + (k-1)\Delta \quad \text{для } x_n$$

и будем строить функцию счетно-значной логики

$f^*(y_1, y_2, \dots, y_n)$ принимающую значения c_0 ,
 $c_0 + \Delta, \dots, c_0 + (k-1)\Delta$, соответствующие значениям
 $0, 1, \dots, k-1$ функции f . Будем называть c_i
несущими частотами: пусть $c_1 = c_3 = c_5 = \dots = c_2 = c_4 = \dots$

и $C_1 \neq 0$, $C_2 \neq 0$. Построим вспомогательную функцию

$$g(y_1, y_2, \dots, y_n) = f^*(y_1, y_2, \dots, y_n) + y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + \dots + y_n \quad (1.13)$$

Тогда

$$f^*(y_1, y_2, \dots, y_n) = g(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n) \quad (1.14)$$

по всем наборам α_n

При этом несущая выходного сигнала C_0 равна либо $C_1 + C_2$, либо C_1 , в зависимости от четности n , однако n всегда можно сделать нечетным, добавив фиктивную переменную. Тогда можно считать, что несущая выходного сигнала всегда C_1 , т.е. совпадает с несущей одного из входных сигналов.

3. Рассмотрим еще одну частотную логику, связанную с возможностью осуществления в активной волновой системе логических операций \max и \min по отношению к сигналам различной частоты.

Пусть логические переменные могут принимать одно из $k + 2$ различных значений $\emptyset, a, 0, 1, 2, \dots, k - 1$, где \emptyset означает отсутствие сигнала, a - сигнал, частота которого меньше частоты, соответствующей значению 0 , и пусть мы можем выполнять над частотными переменными опе-

равны

$$\max(xy) = \begin{cases} x & \text{при } y = 0 \\ y & \text{при } x = 0 \\ \max(xy) & \text{при } x \neq 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

$$\min(xy) = \begin{cases} x & \text{при } y = 0 \\ y & \text{при } x = 0 \\ \min(xy) & \text{при } x \neq 0, y \neq 0 \end{cases} \quad (1.16)$$

и операцию фильтрации, аналогичную (1.10)

$$x^i = \begin{cases} x & \text{при } x = i \\ 0 & \text{при } x \neq i \end{cases} \quad (1.10^1)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, k-1.$$

Покажем, что теперь можно построить произвольную функцию k -значной логики, если переменные и функция будут принимать значения из множества $0, 1, 2, \dots, k-1$.

Рассмотрим выражение

$$\begin{aligned} & f_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \\ & = \min(\dots(\min(\min(\max(x_1; \alpha); \\ & \max(x_2^{\alpha_2}; \alpha); \max(x_3^{\alpha_3}; \alpha)) \dots \max(x_n^{\alpha_n}; \alpha) \end{aligned} \quad (1.17)$$

Легко видеть, что

$$g_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} \min(x_1, x_2, \dots, x_n) & \text{при } \begin{matrix} x_1 = \alpha_1 \\ x_2 = \alpha_2 \\ \vdots \\ x_n = \alpha_n \end{matrix} \\ a & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (1.18)$$

Тогда

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2, \dots, x_n) = & \max(\min(f(0, 0, \dots, 0); \\ & (g_{0,0 \dots 0}(x_1, x_2, \dots, x_n))^a); \\ & \min(f(1, 0, \dots, 0); (g_{1,0, \dots, 0}(x_1, x_2, \dots, x_n))^a), \dots \\ & \dots \min(f(k-1, k-1, \dots, k-1); g_{k-1, k-1, \dots, k-1}(x_1, x_2, \dots, x_n))^a), \end{aligned} \quad (1.19)$$

что легко проверить непосредственной подстановкой. Фактически здесь операции \max и \min используются для выбора не произвольных значений частот, а некоторой "опорной" частоты a и одной из частот множества $0, 1, 2, \dots, k-1$, что может быть удобным с технической точки зрения. Практически частотная логика, использующая сумматоры и вычислители, может быть использована совместно с \max и \min , однако в первом случае частоты, соответствующие значениям $0, 1, 2, \dots, k-1$ должны быть эквидистантными. На вторую систему частотной логики такое ограничение не накладывается.

4. В качестве примера рассмотрим построение некоторых логических функций с использованием введенных логических операций.

а) Фазо-импульсная логика. Предварительно необходимо рассмотреть некоторые эквивалентные преобразования, позволяющие упрощать логические выражения. Справедливость рассматриваемых соотношений следует из определений логических операций для фазо-импульсных сигналов (1.1), (1.2) и (1.3).

1) Правила преобразования задержек

$$D_0(x) = x; D_c(x_1) \dot{\vee} D_c(x_2) = D_c(x_1 \dot{\vee} x_2);$$

$$D_c(x_1) \dot{\wedge} D_c(x_2) = D_c(x_1 \dot{\wedge} x_2);$$

$$D_c(D_{c_2}(x)) = D_{c_1 + c_2}(x) \bmod K$$

2) Правила вынесения за скобки

$$(x_1 \dot{\wedge} x_2) \dot{\vee} (x_1 \dot{\wedge} x_3) = x_1 \dot{\wedge} (x_2 \dot{\vee} x_3)$$

$$(x_1 \dot{\vee} x_2) \dot{\wedge} (x_1 \dot{\vee} x_3) = x_1 \dot{\vee} (x_2 \dot{\wedge} x_3)$$

3) Правила поглощения

$$(x_1 \dot{\wedge} 0) \dot{\vee} (x_1 \dot{\wedge} 1) \dot{\vee} \dots \dot{\vee} (x_1 \dot{\wedge} (K-1)) = x$$

Построим функцию $f(x_1, x_2) = (x_1 + x_2) \bmod K$ при $K = 3$. В соответствии с (1.8)

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) &= D_{00}(\psi_{00}(x_1, x_2)) \dot{\vee} D_{01}(\psi_{01}(x_1, x_2)) \dot{\vee} \\ &\dot{\vee} D_{02}(\psi_{02}(x_1, x_2)) \dot{\vee} \dots \dot{\vee} D_{22}(\psi_{22}(x_1, x_2)) = \\ &= D_0((D_0(x_1 \dot{\wedge} 0) \dot{\wedge} D_0(x_2 \dot{\wedge} 0)) \dot{\vee} D_0((D_1(x_1 \dot{\wedge} 0) \dot{\wedge} \\ &\dot{\wedge} D_0(x_2 \dot{\wedge} 1)) \dot{\vee} \dots \dot{\vee} D_2((D_0(x_1 \dot{\wedge} 2) \dot{\wedge} D_0(x_2 \dot{\wedge} 2))) = \end{aligned}$$

вынесем за скобки X_2 там, где это можно, учитывая правила преобразования задержек

$$= X_2 \dot{\wedge} ((X_1 \dot{\wedge} 0) \dot{\vee} D_1(X_1 \dot{\wedge} 0) \dot{\vee} D_2(X_1 \dot{\wedge} 0)) \dot{\vee} \\ \dot{\vee} D_1(X_2 \dot{\wedge} (D_2(X_1 \dot{\wedge} 1) \dot{\vee} (X_1 \dot{\wedge} 1) \dot{\vee} D_1(X_1 \dot{\wedge} 1))) \dot{\vee} \\ \dot{\vee} D_2(X_2 \dot{\wedge} (D_1(X_1 \dot{\wedge} 2) \dot{\vee} D_2(X_1 \dot{\wedge} 2) \dot{\vee} (X_1 \dot{\wedge} 2))))).$$

Блок-схема построения функции приведена на рис. 1.1

б) Частотная логика. Введём обозначение: X^i - выделение фильтром сигнала $i \leq X \leq j$. Тогда правило поглощения частотных сигналов запишем в виде

$$X^i \dot{\vee} X^{i+1} \dot{\vee} \dots \dot{\vee} X^j = X^j; \quad X^0, X^{K-1} = X$$

Правила вынесения за скобки

$$(X_1 \pm C) \dot{\vee} (X_2 \pm C) = (X_1 \dot{\vee} X_2) \pm C$$

$$(X_1 \dot{\pm} X_2) \dot{\vee} (X_1 \dot{\pm} X_3) = (X_1 \dot{\pm} (X_2 \dot{\vee} X_3)).$$

Можно сформулировать еще ряд полезных правил преобразования логических выражений, однако для построения примера нам достаточно уже сформулированных соотношений. Построим функцию $f(x_1, x_2) = \min(x_1, x_2)$ при $K = 3$, при этом пусть несущие для x_1 и x_2 - C_1 и C_2 , несущая выходного сигнала $C_0 = C_2$. Тогда $y_1 = x_1 + C_1$, $y_2 = x_2 + C_2$ и, в соответствии с (1.14)

$$f(y_1, y_2) = (y_1^0 \dot{\vee} y_2^0 \dot{\vee} g(0, 0)) \dot{\vee}$$

$$\begin{aligned} & \dot{V}(y_1^0 + y_2^0 - g(01)) \dot{V} \dots \dot{V}(y_1^2 + y_2^2 - g(22)) = \\ & = (y_1^0 + y_2^0 - c_1) \dot{V}(y_1^0 + y_2^0 - (c_1 + 1)) \dot{V} \dots \\ & \dots \dot{V}(y_1^2 + y_2^2 - (c_1 + 2)) = \end{aligned}$$

Вынесем за скобки одинаковые константы и одинаковые члены, после чего применим правила поглощения

$$\begin{aligned} & = (y_1^0 + y_2^0 - c_1) \dot{V}(((y_1^0 + y_2^0) \dot{V}(y_1^0 + y_2^0)) \dot{V} \\ & - (c_1 + 1)) \dot{V}(((y_1^0 + y_2^0) \dot{V}(y_1^0 + y_2^0)) \dot{V} - (c_1 + 2)). \end{aligned}$$

Блок-схема реализации функции приведена на рис.2.

в) Частотная логика с использованием операций \max и \min . Правило вынесения за скобки констант

$$\begin{aligned} & \max(\min(c_1, x_1^a); \min(c_1, x_2^a)) = \\ & = \min(c_1; (\max(x_1, x_2))^a) \end{aligned}$$

Построим функцию $f(x_1, x_2) = (x_1 + x_2) \bmod k$ при $K = 3$. В соответствии с (1.19)

$$\begin{aligned} & f(x_1, x_2) = \max(\min(0, (g_{00}(x_1, x_2))^a) \\ & \min(1, (g_{01}(x_1, x_2))^a), \dots, \min(1, (g_{22}(x_1, x_2))^a)). \end{aligned}$$

Вынесем за скобки одинаковые константы там, где это возможно (при этом аргументы x_1, x_2 можно опустить, так как они одинаковы для всех g_{ij})

$$= \max(\min(0, (\max(g_{00}, g_{12}, g_{21}))^a), \min(1, (\max(g_{01}, g_{10}, g_{22}))^a), \min(2, (\max(g_{02}, g_{11}, g_{20}))^a)).$$

Блок-схема реализации функции приведена на рис.3. Перейдем теперь к рассмотрению технических принципов осуществления многозначных логических элементов.

§ 2. Некоторые логические элементы и устройства на основе реактивных нелинейных линий.

Построение логических элементов на основе волновых систем предполагает, прежде всего, наличие устройств с многими устойчивыми состояниями. Это могут быть ограниченные волновые системы-резонаторы с включенными распределенно по длине нелинейными элементами, преобразующими энергию питания в энергию любого из нескольких типов колебаний резонатора. Тип нелинейного элемента и способ преобразования энергии не играют роли - могут быть использованы, например, туннельные или параметрические диоды. В обоих случаях могут быть применены распределенные емкостные и туннельные "р-п" переходы, созданные в настоящее время [4]. Это обеспечивает возможность построения весьма высокочастотных и, следовательно, быстродействующих многоустойчивых элементов. Их разработка, однако, является самостоятельной задачей. Экспери-

ментальное исследование многозначных волновых систем проводилось в диапазоне частот следования 1 ± 10 Мгц, поскольку здесь сравнительно проста реализация таких устройств и регистрация проходящих в них процессов.

Рассмотрим сначала элементы на основе реактивных нелинейных линий. Известно [8], что в отрезке нелинейной линии с возбужденной от источника гармонических колебаний волной накачки, частота которой близка к одной из его собственных частот f_k ($k=1, 2, \dots, N-1$ где N - число звеньев), возможна генерация различных типов видеоимпульсных колебаний. Амплитуду $E_{ист}$ и частоту f_k источника накачки при этом можно выбрать так, что устройство будет работать в жестком режиме возбуждения. Внешним сигналом в нем можно возбудить один, два или вообще S импульсов, где $S \leq k$, интервал между которыми равен периоду накачки T_k или в целое число раз больше, если некоторые из " k " импульсов не возбуждены. Очевидно, такой генератор может служить многоустойчивым элементом (импульсным волнотроном) с различными способами кодирования информации: число-импульсным, фазо-импульсным, двоичным. Ограничимся исследованием элементов с фазоимпульсным кодированием, при котором возбужденный в резонаторе импульс может занимать " k " дискретных положений по отношению к опорной последовательности с периодом kT_k . Существенно, что многие логические действия (например, сложение, вычитание) в этом случае сводятся к простейшей операции-задержке импульса на

определенное время.

Основные трудности применения таких элементов (как и большинства других) в вычислительной технике связаны с проблемой взаимодействия элементов. Поскольку генератор работает в жестком режиме, то для возбуждения импульса требуются внешние сигналы, сравнимые по амплитуде с генерируемыми. Однако, с другой стороны связь между элементами должна быть достаточно слабой, поэтому, вообще говоря, необходимо усиление импульсов между элементами, например, в линии передачи с бегущей попутно волной накачки [9]. Другая, более простая, возможность осуществления связи в диапазоне частот накачки до сотен мегагерц — построение смешанных элементов с использованием транзисторов. Ниже приводится вариант элемента памяти и полного набора логических элементов, состоящих из импульсных волнотронов, эмиттерных повторителей, линий задержки и диодов, а также примеры построения устройств из этих элементов.

1. Элемент памяти [10]. Принципиальная схема элемента, например, с 4-мя устойчивыми состояниями приведена на рис. 4а, а на рис. 4б показана его блок-схема, которой мы будем пользоваться в дальнейшем. Резонатор состоит из 12 звеньев с варикапами Д-814А в качестве емкостей. Вывод генерируемых колебаний осуществляется через эмиттерный повторитель (Э.П.), обеспечивающий усиление по току и однонаправленность передачи информации.

Время переключения многоустойчивого элемента, от которого в значительной мере зависит быстро-

действие, определяется продолжительностью срыва колебаний, существующих в резонаторе, и временем установления новых, с фазой внешнего сигнала. Срыв и возбуждение колебаний могут осуществляться путем модуляции накачки (амплитудной или частотной) или напряжения смещения на диодах резонатора. При этом время переключения в первом случае составляет десятки, во втором – единицы периодов возбуждаемых колебаний. В экспериментах наименьшее время переключения наблюдалось при срыве колебаний путем модуляции смещения одновременно с измерением связи резонатор с источником сигналов. Последний способ управления элементом, схема которого приведена на рис. 4, реализован с использованием амплитудного детектора (Д), с управляющим входом 2. В исходном состоянии диод детектора заперт напряжением E_{cm} . Для переключения элемента на управляющий вход 2 подается импульс длительностью $t_u > kT_H$. Изменяя напряжение на варикапах, он вызывает срыв генерации из-за смещения зоны генерации в сторону нижних частот. Одновременно открывается диод Д-311 детектора, в результате в резонаторе возбуждаются колебания, подобные поступающим на вход 1. Осциллограмма, иллюстрирующая переключение элемента, приведена на рис. 5. Процессы срыва прежних и возбуждения новых колебаний происходят одновременно, их продолжительность составляет около $12T_H \cdot k$. Амплитуда управляющего импульса была ~ 10 в, а его длительность 4,5 мсек. Как показал эксперимент,

для срыва колебаний достаточно изменить напряжение смещения на варикапах не более, чем на 0,08в, в то время как амплитуда генерируемых импульсов составляла ~ 1 в. Это указывает на возможность переключения элемента памяти управляющими сигналами с выхода аналогичного элемента (см. описание счетчика).

2. Логические элементы. Как показано в § 1, для построения систем дискретной обработки информации достаточно построить три логических элемента: элемент "И" (амплитудное совпадение (1.1)), "ИЛИ" (1.2) и элемент задержки (1.3). Последний в нашем случае, очевидно, представляет собой линию, согласованную на выходе. Отметим, что форма генерируемых в многоустойчивом элементе импульсов близка к форме стационарной волны в нелинейной линии [11]; это позволяет осуществлять задержку сигнала без его искажения.

На рис. 6 приведена схема "И" на два входа, состоящая из короткой линии с $t_3 \approx t_4$, согласованной на концах, и эмиттерного повторителя, вход которого соединен со средним звеном линии. Если на входы 1 и 2 элемента импульсы поступают одновременно, то на выходе появляется импульс удвоенной амплитуды. Изменяя длину участка линии слева или справа от точки съема на величину nT_n , где $n = 1, 2, \dots, k-1$, можно получить совпадение неодинаковых по фазе импульсных последовательностей.

Элементом "ИЛИ" может быть группа (по числу входов) эмиттерных повторителей с общей нагрузкой.

Рассмотрим примеры построения устройств из этих элементов.

3. Сдвиговый регистр. Несколько элементов памяти, соединенных по блок-схеме, приведенной на рис.7, образуют сдвиговый регистр⁺⁾ . В экспериментах минимальный интервал времени между двумя импульсами, поступающими на управляющие входы четных, а затем нечетных элементов, при которых наблюдалось их переключение без сбоев, составляло $\sim 15 T_H \cdot K$.

4. Счетчик. Как уже отмечалось, операция сложения сводится к задержке импульсной последовательности. С учетом выбранного способа управления состоянием многустойчивого элемента блок-схема счетчика имеет вид, приведенный на рис.8. Каждый разряд содержит два элемента памяти и линию задержки L 3-2 на время T_H (этот интервал времени соответствует единице), соединенные между собой в кольцо, как показано на рис. 8. Счетчик работает следующим образом. В исходном состоянии во всех элементах памяти возбуждены колебания, фаза которых соответствует цифре ноль, а на вход элемента "И" подается последовательность с фазой $K-1$. Счетный импульс поступает на управляющий вход элемента 2 и переводит его в состояние $0 + 1$ (сигналом является последовательность импульсов с выхода элемента 1, задержанных на T_H). Через время, равное (или большее) времени переключения на управ-

⁺⁾ О сдвиговых регистрах, счетчиках и т.д. см., например, [12].

ляющий вход элемента 1 подается вспомогательный импульс, в результате чего и в этом элементе устанавливается состояние $0 + 1$. С приходом $K-1$ счетного импульса амплитуда импульсной последовательности на выходе элемента "И" удваивается. С помощью короткозамкнутого отрезка линии (L_{3-1}), изменяющего полярность импульсов, и детектора (Д) из этой последовательности формируется положительный перепад напряжения, который через RC цепочку поступает в резонатор 4 и срывает в нем колебания. Связь между резонаторами $3 \rightarrow 4$ выбирается достаточно слабой, поэтому элемент 4 остается в $\bar{0}$ - состоянии. Следующий счетный импульс в элементах первого разряда устанавливает колебания с фазой 0. При этом в элементе "И" импульсы не совпадают, а в резонаторе 4 с выхода детектора подается отрицательный перепад напряжения, переводящий генератор 4 в область мягкого возбуждения. В результате в нем возбуждаются колебания с фазой $0 + 1$. Благодаря сильной связи между элементами $4 \rightarrow 3$ через некоторое время и в резонаторе 3 устанавливаются такие же колебания. Таким образом, с приходом "К-го" счетного импульса в первом разряде устанавливается состояние 0, а во втором - единица.

5. Сумматор. Блок-схема одного из возможных вариантов сумматора приведена на рис.1. В эксперименте, однако, сумматор был построен по другой блок-схеме (рис.9), позволяющий показать некоторые интересные логические возможности линий, в частности, представить суммирование как

логическую операцию совпадения двух импульсных последовательностей в линии задержки.

Для пояснения работы сумматора на рис. 10 приведены диаграммы. Первая из них показывает чему соответствует каждое временное положение импульса на выходах элементов памяти. С помощью вспомогательной последовательности импульсов (2)⁺ и элементов совпадения "И" период следования суммарных последовательностей увеличивается в 4 раза, а интервал времени между соседними состояниями удваивается $t_{1,2} = t_0 + 2T_H n_{1,2} + 4mKT_H$, где $m = 0, +1, +2, \dots$, t_0 - момент времени, соответствующий 0; $n_{1,2}$ - величина слагаемых. Далее, первое и второе слагаемые (соответственно третья и четвертая временные диаграммы) поступают на противоположные концы линии (Л.3 на рис. 9), задержка которой равна $2kT_H$, и определяется момент совпадения импульсов. Легко показать, что он соответствует сумме

$$t_{\Sigma} = t_0 + (n_1 + n_2)T_H + 4k(m+1)T_H .$$

Если в результате сложения получается двухразрядное число, то это определяется в K -м элементе "И_к", на один вход которого подаются импульсы, по времени соответствующие цифре $K, K+1, \dots, 2K-1,$

⁺) Она не может быть получена, например, в согласованной на конце нелинейной линии задержки, на вход которой подается последовательность импульсов с периодом $4T_H$ синхронизованная с опорным генератором.

а на другой — результат сложения. При совпадении выдается команда переноса единицы в следующий разряд. В простейшем случае это может быть постоянное напряжение с выхода детектора, которое увеличивает на время T_n задержку двух дополнительных линий, подключенных последовательно к каждому концу Л.З. сумматора в последующих разрядах. Без напряжения смещения эти линии имеют общую задержку kT_n и не влияют на результат сложения.

3. Некоторые логические элементы и устройства на основе активных нелинейных линий.

1. Элемент памяти (частотный волнотрон) [13].

В качестве элемента памяти с частотным представлением сигналов может служить активный резонатор, имеющий вид отрезка или замкнутой в кольцо линии задержки, в каждое звено которой включается активный элемент, например, туннельный диод. Принципиальная схема многоустойчивого элемента приведена на рис 11. Основа схемы — кольцевая LC — линия задержки с туннельными диодами. Рабочая точка на характеристиках туннельных диодов выводится на падающий участок, система самовозбуждается и в кольце возникают колебания в виде квазигармонических или релаксационных бегущих волн [14]. Признаком состояния (равновесия) является один из возможных типов собственных колебаний кольцевой системы, отличающихся по частоте. Число типов опре-

деляется количеством звеньев N и равно $N/2$ для кольца и $N-1$ для отрезка. Каждый из них является устойчивым, а переход с одного на любой другой тип осуществляется под действием внешней силы, имеющей вид радиоимпульса с частотой заполнения, близкой к собственной частоте того типа колебаний, на который необходимо перебросить систему. Внешний сигнал подается на одно из входных развязывающих однонаправленных устройств 1, устраняющих обратное воздействие собственных колебаний волнотрона на источник управляющего сигнала, которым может быть аналогичный волнотрон.

В качестве элемента 1 может использоваться, например, неоднородная линия задержки или катодный повторитель. Выходной сигнал снимается через элемент 2, аналогичный элементу 1.

Число входных и выходных цепей может быть достаточно большим, однако, подключение их не оказывает заметного влияния на устойчивость работы схемы, так как туннельные диоды включены в каждое звено линии.

2. Суммирующий элемент. Здесь приведены результаты экспериментального исследования, по существу, только основной части суммирующего элемента, выполненной в виде усилителя-преобразователя на отрезке активной линии передачи (как и элемент памяти), на вход которого поступают сигналы с частотами $f_{1,2}$. В результате взаимодействия этих сигналов в линии с квадратичной нелинейностью одновременно возникают вследствие трехчастотного

процесса $f_1 \pm f_2 = f_3$ и эффективно усиливаются сигналы с суммарной и разностной частотами, т.е. осуществляются операции сложения и вычитания.⁺)

Эффекты взаимодействия наблюдались для входных сигналов как близких, так и достаточно разнесенных частот (рабочая точка на характеристике диодов выводилась на квадратичный участок изменением напряжения смещения). Существенно, что спектральные составляющие, характерные для комбинационных волн, возникают уже на первых звеньях линии. При дальнейшем распространении амплитуда возрастает, стремясь к стационарному уровню, в два-три раза превышающему уровень остальных составляющих. Преобразование протекает тем быстрее, чем больше амплитуды сигнала при одном и том же уровне насыщения и зависит от соотношения амплитуд A_1 и A_2 . На рис 12 приведены графики зависимости амплитуды A_Σ сигнала частоты $f_1 + f_2$ от соотношения амплитуд выходного сигнала A_1/A_2 в различных сечениях линии (на разных звеньях). Видно, что максимального значения (при любых $f_{1,2}$) A_Σ достигает при отношении $A_1/A_2 = 1$. Начиная с $n \approx 15$ наступает насыщение (зависимость амплитуды разностной частоты A_Δ от A_1/A_2 аналогична).

Фильтрация сигналов с суммарной или разностной частотами может осуществляться линейными гребенчатыми фильтрами, выполненными в виде анало-

⁺) Несущие частоты f выбираются таким образом, чтобы их гармоники были вне диапазона суммарных частот.

гичных волновых систем, но без активных элементов.

3. Сдвиговой регистр. Он отличается от уже описанного в § 2 только тем, что в качестве запоминающих элементов здесь используются частотные волнотроны. Однонаправленные элементы те же самые.

Время переключения, измеренное экспериментально, составляло от 7 до 13 периодов управляющей частоты при оптимальном подборе амплитуды управляющего сигнала.

4. Логические элементы "максимум" и "минимум". Как уже отмечалось, один из вариантов построения частотной логики основан на применении операций "максимум" (15) и "минимум" (16). Эти операции также могут быть осуществлены в линии передачи, содержащей туннельные диоды. Принципиальные схемы частотных многозначных элементов "максимум" и "минимум", приведены на рис. 13а и рис. 13б соответственно. Рабочая точка всех туннельных диодов выведена постоянным напряжением смещения на падающий участок вольт-амперной характеристики.

Принцип работы элемента максимум (минимум) основан на эффекте пространственной неустойчивости волны по отношению к коротковолновым (длинноволновым) возмущениям, приводящем к усилению до стационарного значения сигнала с наибольшей (наименьшей) частотой и к затуханию всех других сигналов [15]. Эффективность выделения сигнала с максимальной или минимальной частотой зависит от величины потерь и активности в системе, дисперсионных свойств нелинейности и частот этих волн.

Амплитуда выделяемого сигнала на входе устройств может быть и меньше амплитуд других сигналов, если волновые числа взаимодействующих волн удовлетворяют неравенству:

$$k^2 \min \leq k^2 n - \frac{y}{2g} \quad (\text{для элемента "минимум"})$$

$$\frac{1}{k^2 \max} > \frac{2}{k^2 n} - \frac{g}{y} \quad (\text{для элемента "максимум"})$$

где k_{\max} , k_{\min} - волновые числа выделяемых частотных сигналов, k_n - волновые числа других частотных сигналов, $\frac{y}{g}$ - соотношение нелинейность - потери, то соотношение амплитуд входных частотных сигналов может быть любое.

Длина линий в элементах "максимум" и "минимум" выбирается из необходимого соотношения амплитуд разных частот на выходе линии. Для сигналов равной амплитуды с частотами, отличающимися более, чем на половину, амплитуда выделяемого сигнала увеличивается вдвое по отношению к сигналам других частот на расстоянии длин волн сигнала низшей частоты. Такого соотношения амплитуд частотных сигналов достаточно для применения этих устройств при совместной работе с частотным волнотроном.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. В.П.Сигорский, Л.С.Ситников, Л.Л.Утяков "Многоустойчивые элементы в дискретной технике", Энергия, М., 1966.
2. Л.С.Ситников, Л.Л.Утяков, Электроника, 48, 18, 32 (1969).
3. Л.С.Ситников "Многоустойчивые элементы в цифровой измерительной технике" Наукова думка, Киев. 1970.
4. В.Н.Шабанов, В.А.Толомасов, Радиотехника и электроника, 11, 772, 1966.
5. В.И.Корнейчук, А.М.Романкевич, Л.С.Ситников, Изв. ВУЗов - Радиофизика, 10, 3 (1967).
6. В.И.Корнейчук, "Вопросы теории ЭЦММ", Труды симпозиума Вып. 1, Киев, 1969.
7. О.А.Башкиров, Тезисы докладов и сообщений на Всесоюзном межвузовском симпозиуме по прикладной математике и кибернетике, Горький, 1967.
8. А.И.Весницкий, Л.А.Островский, В.В.Папко, В.Н.Шабанов, Письма в ЖЭТФ, 9, 5, 1969.
9. К.А.Горшков, Л.А.Островский, В.В.Папко, Радиофизика, (направлена в печать).

10. Ю.К.Богатырев, Л.А.Островский, В.В.Папко, М.И.Рабинович, Авт. св. № 289051, Бюлл.изобр. № 10, 1971.
11. Л.А.Островский, В.В.Папко, Е.Н.Пелиновский, Радиофизика, (направлена в печать).
12. В.М.Кочан, М.М.Каневский, Цифровые вычислительные машины и системы, Энергия, М., 1970.
13. Ю.К.Богатырев, Л.А.Островский, В.В.Папко, М.И.Рабинович, Авт.св. № 297857, Бюлл. изобр. № 10, 1971.
14. Ю.К.Богатырев, М.И.Рабинович, Изв.ВУЗов, Радиофизика, 10, 12, 1750 (1967).
15. С.В.Княшко, М.И.Рабинович, Радиофизика (направлена в печать).

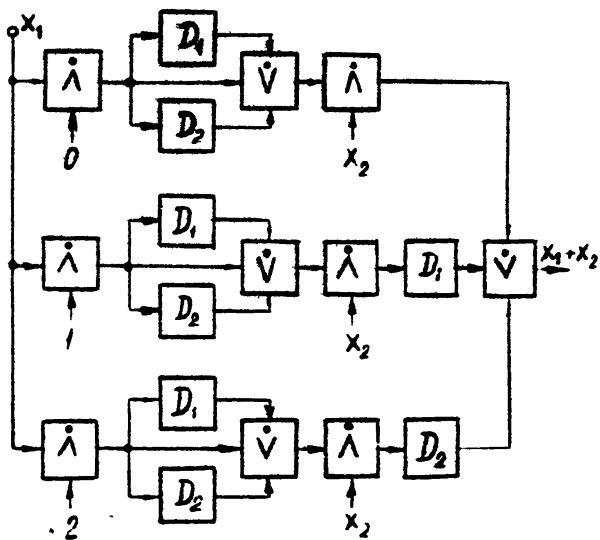


Рис. 1.

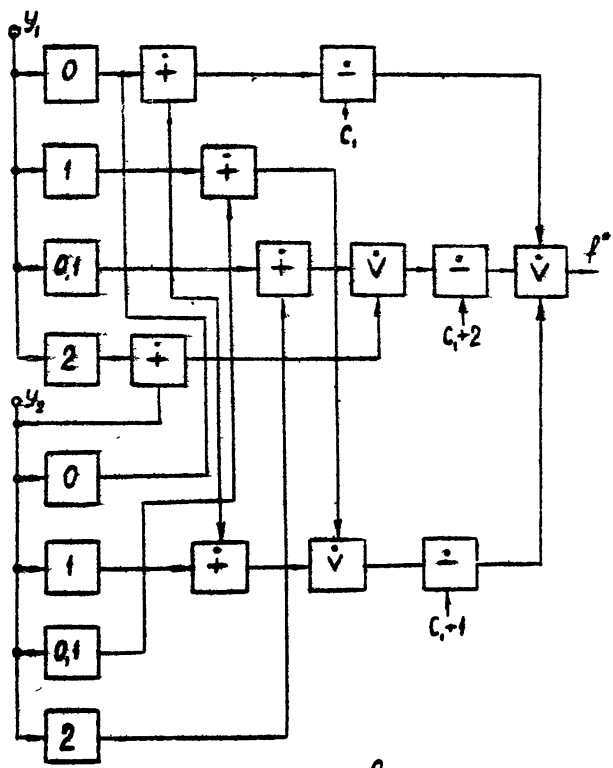


Рис 2

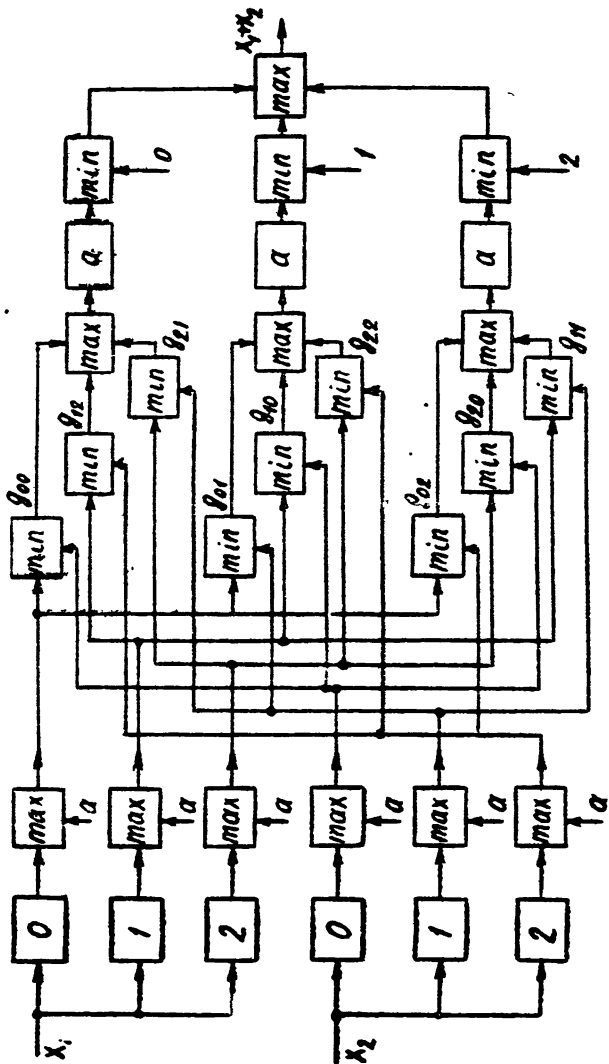
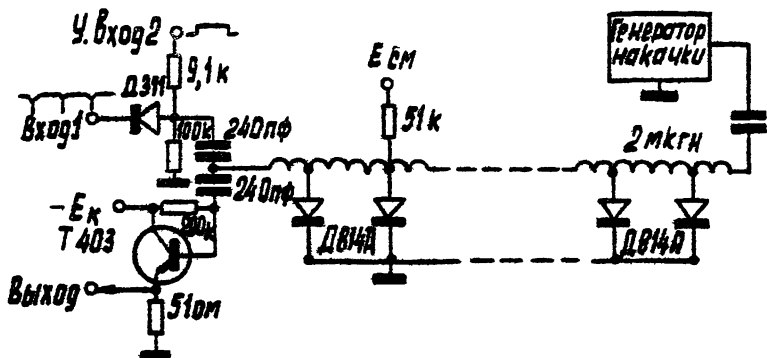
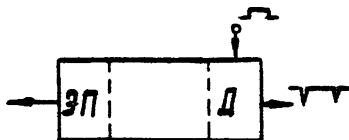


Рис.3.



а)



б)

Рис. 4



Puc. 5

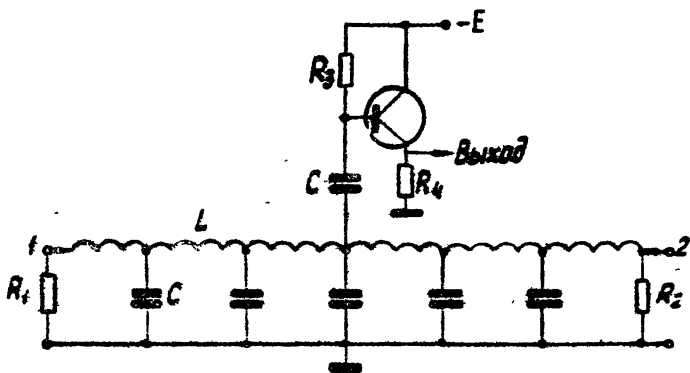


Рис. 6

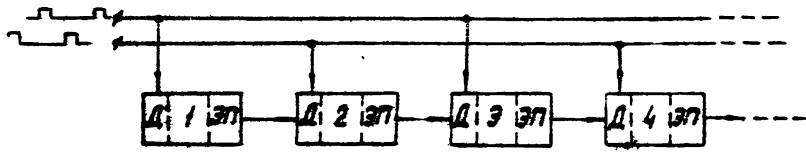


Рис. 7

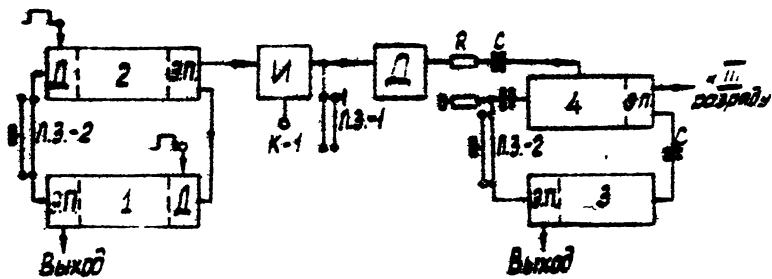


Рис. 8.

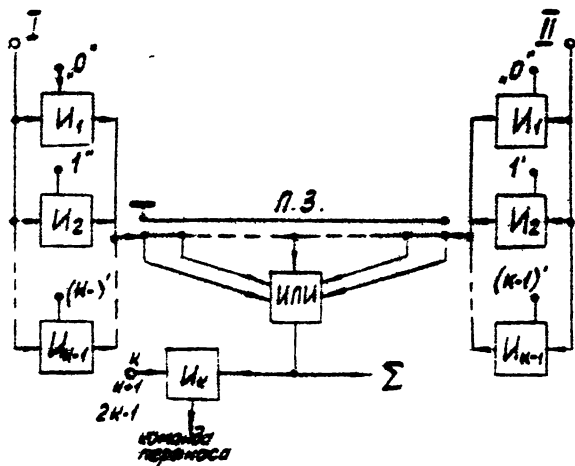


Рис. 9

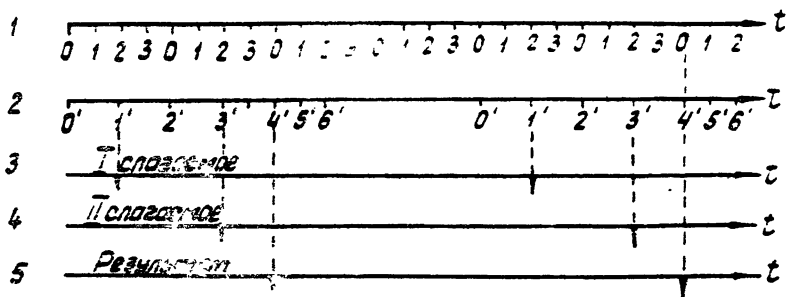


Рис. 10

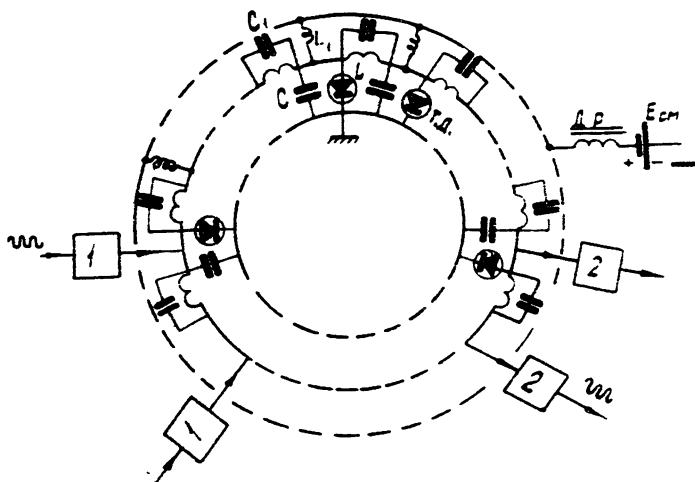


Рис. 11

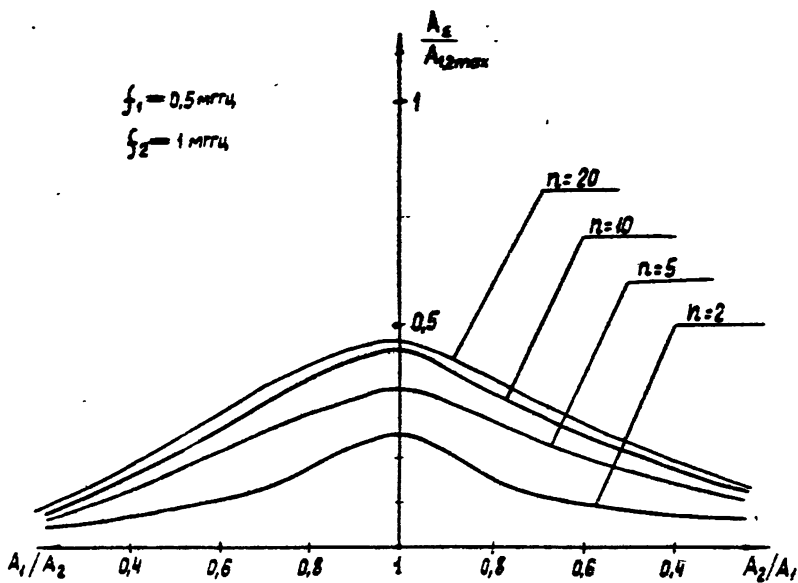


Рис.12.

