



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ
АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ СССР

АИНФ 491

ОБЗОРНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫЕ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ КОРОТКИХ
ОДНОКРАТНЫХ СИГНАЛОВ**

1979

АРХИПОВ В. К., САПЕЖКО А. Я. Масштабно-временные преобразователи коротких однократных сигналов: Обзорная информация. АИНФ 491. — М.: ЦНИИАтоминформ, 1979. — 84 с.

Рассмотрены основные направления исследований и состояние разработок масштабнo-временных преобразователей однократных электрических сигналов нано- и микросекундной длительности: на параметрических линиях задержки, электронных пучках, линиях задержки с элементами отбора, быстродействующих запоминающих электронно-лучевых трубках. Даны теоретические основы метода масштабнo-временного преобразования, а также классификация масштабнo-временных преобразователей по физико-технологическим принципам построения. Большое внимание уделено вопросам практической реализации масштабнo-временных преобразователей и перспективам их развития в освоении пикосекундного диапазона. Работа выполнена по материалам отечественной и зарубежной печати за 1968—1977 гг.

Рис. 36, табл. 3, список лит. — 55 назв.

О
б
з
о
р
н
а
я
и
н
ф
о
р
м
а
ц
и
я

**МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ
КОРОТКИХ ОДНОКРАТНЫХ СИГНАЛОВ**

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Краткая характеристика современного состояния общих вопросов построения масштабнo-временных преобразователей	5
1.1. Теоретические основы масштабнo-временного преобразования	5
1.2. Классификация масштабнo-временных преобразователей	7
1.3. Основные характеристики (параметры) масштабнo-временных преобразователей	10
1.4. Масштабно-временные преобразователи однократных сигналов нано- и микросекундной длительности	12
2. Масштабно-временные преобразователи на параметрических системах	13
2.1. Общие положения	13
2.2. Преобразователи на линии задержки с последовательным управлением	15
2.3. Преобразователи на линии задержки с одновременным управлением	17
2.4. Преобразователи на линии задержки со скачкообразным управлением	18

Москва
ЦНИИАтоминформ
1979

2.5. Преобразователи на электронных пучках	21
2.6. Выводы и предложения	24
3. Масштабно-временные преобразователи на линиях задержки с элементами отбора	25
3.1. Преобразователи на одной линии задержки с n элементами отбора	25
3.2. Преобразователи на параллельных линиях задержки с элементами отбора	28
3.3. Преобразователи на линии задержки с одним элементом отбора	32
3.4. Выводы и предложения	32
4. Масштабно-временные преобразователи на запоминающих электронно-лучевых трубках	34
4.1. Принципы работы преобразователей на ЗЭЛТ	34
4.2. Запоминающие электронно-лучевые трубки	37
4.3. Регистратор ОКЗ5М	49
4.4. Двухканальная телеметрическая система ССТП1	52
4.5. Цифровой регистратор ОКЗ9	55
4.6. Измеритель наносекундных импульсов ИНИ1	56
4.7. Двухканальный регистратор РП1	59
4.8. Телеметрическая система ПСДМ	61
4.9. Масштабно-временной преобразователь ССТП2	62
4.10. Цифровая система для регистрации наносекундных процессов	67
4.11. Цифровой преобразователь R7912	71
4.12. Выводы и предложения	75
5. Перспективы развития мВП	77
Заключение	80
Список литературы	80

ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие науки и техники требует автоматизации научного эксперимента. Многие исследовательские установки (такие, как мощные лазерные установки получения плазмы, ускорители электронов, установки для изучения свойств различных сред методами лазерной и радиолокации, установки для изучения кратковременных нестационарных химических реакций и т.п.) характеризуются тем, что регистрации и обработке подлежат однократные короткие электрические сигналы.

Развитие измерительной техники идет по пути автоматизации процесса измерений. Это осуществляется созданием автоматических регистрирующих приборов, которые производят несложные математические операции по определению параметров сигнала (длительности фронта, полуширины, площади и т.п.), а также включением в измерительные тракты ЭВМ, т.е. созданием информационных измерительных систем. Во всех этих случаях необходимо согласование времени существования регистрируемого сигнала с временем обработки или ввода его в ЭВМ. Это согласование можно осуществить методом масштабного преобразования сигналов.

В настоящее время масштабные преобразователи (МВП) все шире используются в радиоэлектронике, вычислительной технике и смежных областях науки и техники. Это привело к возрастанию спроса на них и формированию нового направления в радиоэлектронике — техники масштабного преобразования.

Однако отсутствие систематизированной информации существенно ограничивает число потенциальных разработчиков и потребителей новой аппаратуры, так как предварительное ознакомление с ней по многочисленным статьям и патентам часто неприемлемо для инженеров, не уверенных в полезности этого направления. Кроме того, излишне осторожные или чрезмерно оптимистические выводы авторов отдельных статей могут привести к неправильной ориентации читателя, в то время как анализ материалов способствует более всестороннему и объективному

подходу к проблеме. Поэтому анализ методов и аппаратуры для обеспечения масштабно-временного преобразования является актуальной задачей и представляет значительный интерес для широкого круга специалистов.

К настоящему времени в отечественной и зарубежной печати появились лишь отдельные сведения по МВП однократных электрических сигналов нано- и микросекундного диапазона длительности.

В работе [1] рассмотрены принципы построения и функциональные схемы большого числа типов преобразователей, предназначенных для сжатия и растягивания сигналов во времени. Предложена классификация преобразователей, рассмотрены методические погрешности, дана методика инженерного расчета. Все эти вопросы в основном касаются разработки МВП микро- и миллисекундного диапазонов (например, на магнитной ленте, магнитном барабане и др.).

Возможность масштабно-временного преобразования однократных сигналов нано- и микросекундного диапазонов при помощи запоминающих электронно-лучевых трубок (ЗЭЛТ) показана в работе [2]. В ней изложены основы теоретического анализа различных режимов работы трубки как основного узла МВП и рассмотрены некоторые вопросы построения МВП на ЗЭЛТ. После выхода в свет этой работы началась интенсивная практическая реализация МВП именно на основе ЗЭЛТ [3,4]. За 1968-1975 гг. только в СССР разработано и запланировано свыше десяти типов таких преобразователей. Тем не менее фундаментальные теоретические работы по МВП на ЗЭЛТ до сих пор не появились.

Возможность масштабно-временного преобразования однократных сигналов нано- и пикосекундного диапазонов с использованием систем на линиях задержки (ЛЗ) и электронных пучках была показана в работах [5-8]. Однако эти МВП широкого распространения в настоящее время не получили ввиду трудностей практической реализации.

В зарубежной печати рассматриваются лишь отдельные вопросы общих проблем МВП.

Данный обзор является попыткой систематизировать имеющийся литературный материал по МВП однократных электрических сигналов нано- и микросекундного диапазонов за 1968-1977 гг.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ОБЩИХ ВОПРОСОВ ПОСТРОЕНИЯ МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

1.1. теоретические основы масштабно-временного преобразования

Из теории спектров известно, что при изменении масштаба времени сигнала $f(t)$ в K_M раз масштаб частот спектральных составляющих сигнала меняется в $1/K_M$ раз [9]:

$$S^*(j\omega) = 1/K_M S\left(\frac{j\omega}{K_M}\right), \quad (1)$$

где $S^*(j\omega)$ и $S(j\omega)$ - комплексные спектральные плотности:

$$S(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \exp(-j\omega t) dt,$$

$$S^*(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t K_M) \exp(-j\omega t) dt.$$

Формула (1) показывает, что сжатие спектра сигнала без изменения его формы возможно лишь при пропорциональном временном расширении этого сигнала. Такое преобразование называется линейным преобразованием временного масштаба электрических сигналов.

Величина K_M , показывающая отношение длительности преобразованного сигнала к длительности входного сигнала, называется коэффициентом масштабно-временного преобразования (трансформации):

$$K_M = \tau_{\text{вых}} / \tau_{\text{вх}}. \quad (2)$$

Согласно теории [5] для всех без исключения идеальных линейных МВП связь между входным и выходным сигналами может быть представлена в виде

$$K(j\omega, t) = K \exp[-j\omega(\tau_0 + \alpha t)], \quad (3)$$

где K - модуль передаточной функции;

τ_0 - начальный временной сдвиг между входным и выходным сигналами;

$\alpha = 1 - 1/K_M$ - коэффициент пропорциональности.

Из-за ограниченной полосы пропускания реальных преобразователей соотношение (3) можно практически использовать лишь в определенном диапазоне частот.

Обобщенная передаточная функция реального преобразователя записывается в виде

$$K(j\omega, t) = K(j\omega) \exp[-j\omega(\tau_0 + \alpha t)], \quad (4)$$

где $K(j\omega) = K(\omega) \exp[-j\varphi(\omega)]$;

$K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ - соответственно амплитудно- и фазочастотная характеристики преобразователя.

Так, например, для МВП на ЗЭЛТ $K(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ - амплитудно- и фазочастотная характеристики сигнального тракта соответственно. Для МВП на ЛЗ с отводами $K(j\omega)$ учитывает неидеальность процесса дискретизации, т.е. отличие реальной дискретной выборки от δ -функции.

Если верхняя граничная частота спектра преобразуемого сигнала в 2-3 раза меньше полосы пропускания преобразователя, то в диапазоне частот преобразуемого сигнала такой преобразователь можно считать частотно-независимым и для него справедлива формула (3).

Формулы (3) и (4) показывают, что линейное масштабное-временное преобразование сигналов произвольной формы возможно с помощью четырехполюсника, осуществляющего задержку сигнала, линейно изменяющуюся во времени по закону

$$\tau_3(t) = \tau_0 + \alpha t. \quad (5)$$

Такой четырехполюсник можно реализовать с помощью запоминающего устройства (ЗУ).

Для согласования ЗУ с источником сигнала и устройством вывода необходимы соответственно входное и выходное устройства.

Обобщенная структурная схема МВП может быть представлена в виде, изображенном на рис.1.

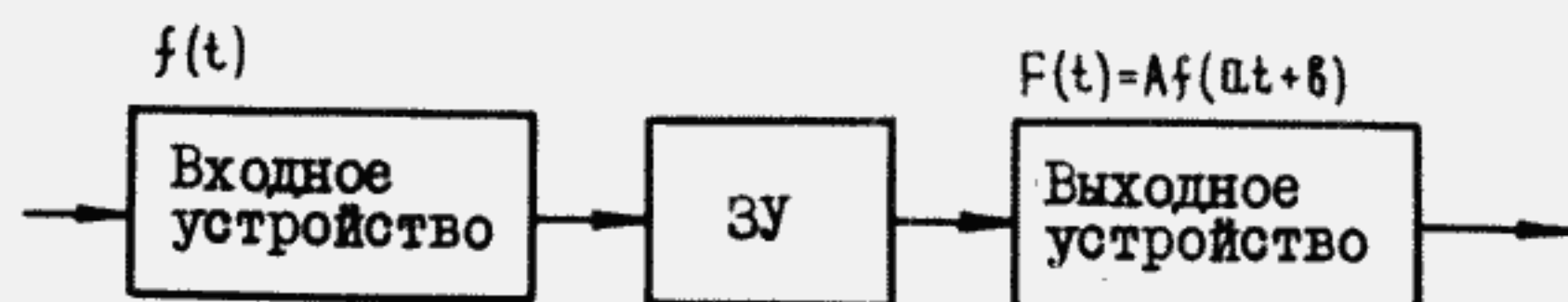


Рис.1. Структурная схема МВП

Функциональная зависимость (5) в явном виде в наносекундном диапазоне возможна лишь в замедляющих системах с распределенными параметрами, изменяющимися во времени (ЛЗ, электронные пучки). Для других систем, которые будут рассмотрены ниже (например, на ЗЭЛТ), функциональная зависимость (5) сохраняется.

Принципиально линейное преобразование временного масштаба сигналов возможно и в системах с сосредоточенными параметрами. Алгоритм построения этой схемы описывается формулой

$$F(t) = \frac{K}{2\pi} \sum_{n=0}^{\infty} a_n(t) \frac{d^n f(t)}{dt^n}, \quad (6)$$

где $a_n(t) = \frac{(-1)^n t^n (1 - 1/K_M)^n}{n!};$

K - модуль коэффициента передачи [5].

Однако этот метод преобразования может найти применение, если будут решены практические вопросы, связанные с точным дифференцированием наносекундных импульсов.

Следует подчеркнуть, что преобразование временного масштаба не вызывает потери информации, заключенной в выбранной реализации исходного сигнала [1].

В дальнейшем будут рассмотрены МВП, обеспечивающие на выходе только временное расширение (сжатие спектра) однократных электрических сигналов. Математически это условие определяет область существования коэффициентов α и K_M в формуле (3):

$$\alpha > 0, \quad K_M > 1.$$

1.2. Классификация

масштабно-временных преобразователей

В работе [1] приведена классификация МВП по следующим основным признакам:

- типу входного устройства;
- характеру памяти;
- типу ЗУ;
- режиму работы;
- типу выходного устройства.

Эти признаки легли в основу предлагаемой классификации МВП (рис.2).

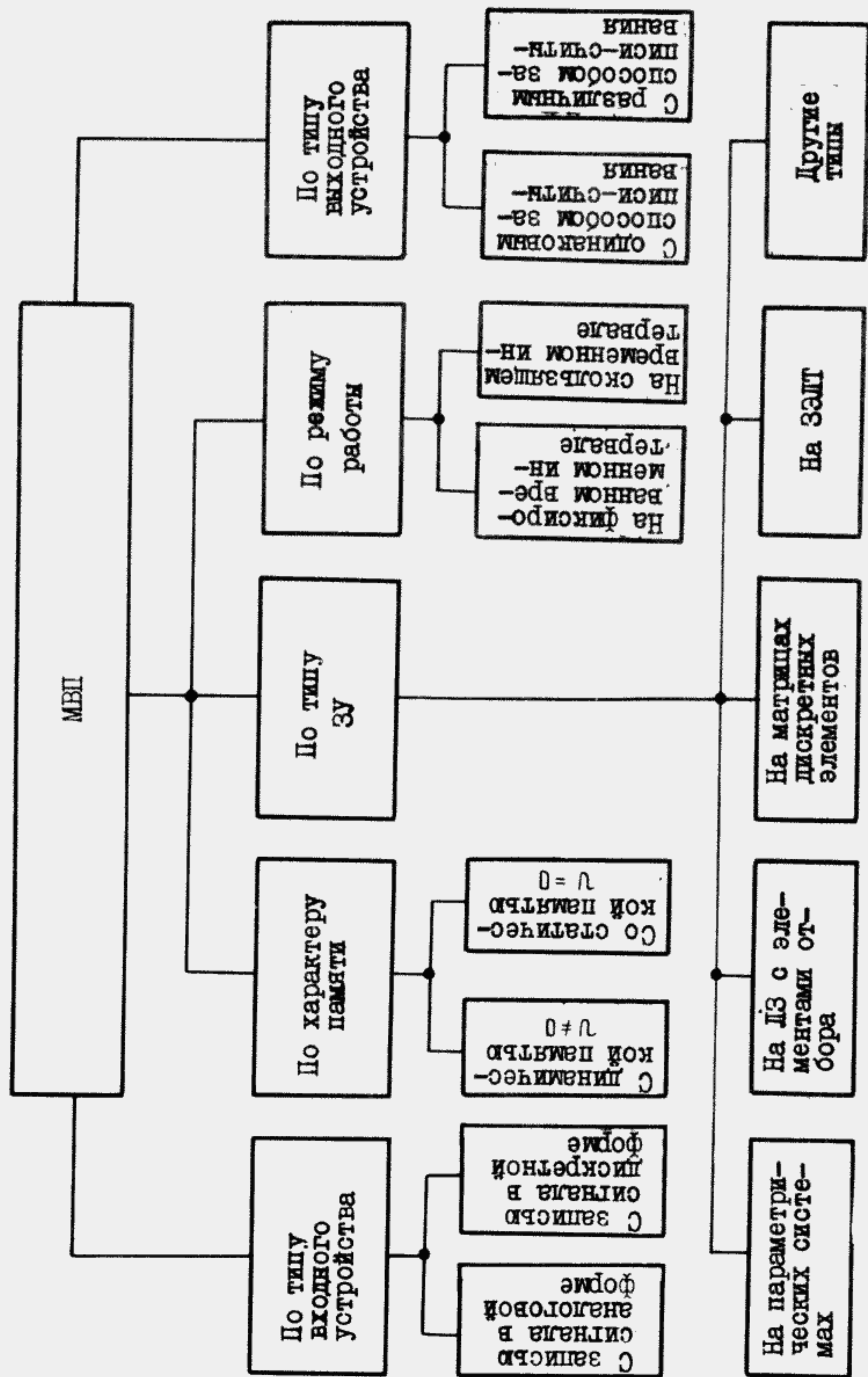


Рис. 2. Классификация МВП

При этом указаны в основном лишь те типы ЗУ, которые нашли наибольшее применение при построении быстродействующих МВП.

Предложенная классификация МВП не является единственно возможной и окончательной. Теория и техника преобразования временного масштаба бурно развиваются, что может привести к появлению новых МВП, не предусмотренных приведенной классификацией (например, голографических и др.).

Можно также классифицировать МВП по некоторым иным признакам, например по виду информации на выходе, которая может быть представлена в виде аналогового сигнала, в виде посылок импульсов с фазоимпульсной модуляцией, в виде посылок импульсов цифрового кода и др. Это обстоятельство отражает основное целевое назначение МВП - преобразование входного сигнала в выходной без потери информации.

Перечисленные выше признаки, по которым предлагается различать МВП, не являются независимыми. Так, например, матричное ЗУ однозначно предполагает и характер памяти, и тип входного устройства, и тип выходного устройства, которые должны быть соответственно: со статической памятью, с записью сигналов в дискретной форме, с одинаковым способом записи и считывания ("сигнал-сигнал").

Нетрудно убедиться в том, что наиболее существенные признаки и возможности МВП определяются именно выбором типа ЗУ. Поэтому в дальнейшем при анализе работы и характеристик различных МВП они будут классифицироваться в первую очередь по этому основному признаку. Следует подчеркнуть, что и математическое описание масштабно-временного преобразования сводится в конечном итоге к формуле (5), которая в физической интерпретации подразумевает также некое ЗУ (аналоговое, дискретное).

Необходимо отметить, что использование аппаратуры МВП для проведения измерений конкретных характеристик или параметров сигналов требует четкого разграничения функций МВП и всего измерительного комплекса в целом, в состав которого кроме МВП входят ЭВМ, устройства вывода, обработки и представления информации [10-15].

Основная функция аппаратуры масштабно-временного преобразования в таком комплексе заключается только в преобразовании временного масштаба сигнала без потери информации, заключенной в этом сигнале. Измерение конкретных характеристик или параметров сигналов обеспечивается всем измерительным комплексом.

На современном уровне развития измерительной техники правильность этого положения подтверждается практикой проведения измерений. На-

пример, последняя модель сверхбыстродействующего цифрового МВП В7912 фирмы "Тектроникс" (США) [16] и аналогичный отечественный МВП ССТП2 [17] построены именно по такому принципу.

1.3. Основные характеристики (параметры) масштабно-временных преобразователей

Регистрируемые в физическом эксперименте сигналы представляют собой обычно какую-либо изменяющуюся во времени электрическую величину, чаще всего - напряжение. Следовательно, задание некоторой функции времени полностью определяет сигнал. Вместе с тем при разработке регистрирующей аппаратуры можно ограничиться выбором показателей, которые достаточно полно характеризуют сигнал. Таких показателей три [3]:

- длительность;
- динамический диапазон изменения;
- ширина спектра.

Указанные показатели очевидны, тем не менее третий из них требует пояснений.

Как известно, однократные сигналы обладают бесконечно широким спектром. В то же время общепринято под шириной спектра понимать полосу частот, в которой сосредоточена основная доля энергии сигнала [9]. Во многих случаях радиоприема сигналов (например, обнаружение цели и др.) такое определение полосы пропускания вполне допустимо. Однако отбрасываемая часть энергии свыше $F_{\text{верхн}}$ существенно определяет форму преобразуемого сигнала и в конечном итоге погрешность МВП. Поэтому вопрос об ограничении ширины спектра принципиально важен и определяется требованиями к допустимой погрешности регистрации.

Следует также отметить, что для целого класса сигналов (например, прямоугольного, треугольного и др.) существует соотношение между длительностью и шириной спектра [9]. Тем не менее эти два показателя разделены, так как ширина спектра определяет полосу пропускания сигнального тракта преобразователя, а длительность сигнала - число регистраторов.

Основные характеристики МВП должны обеспечивать возможность преобразования сигналов в указанном динамическом диапазоне его изменения с сохранением линейности временных (частотных) и амплитудных показателей сигнала.

В настоящее время в определении характеристик МВП нет единой терминологии и не определен их объем. Разные авторы дают разные названия, к тому же количественно одну и ту же характеристику определяют в разных единицах измерения. Так, например, быстродействие МВП характеризуется максимальной скоростью записи сигнала V_3 и выражается в километрах в секунду, линиях в секунду либо в тех и других единицах измерения соответственно в работах [2,3,16].

Однако максимальная скорость записи, существенно определяющая возможности МВП, у которого в качестве ЗУ используется ЗЭЛТ, не может быть использована как мера быстродействия МВП, у которого в качестве ЗУ применена, например, ДЗ, матрица дискретных элементов и др.

Очевидно, более общей характеристикой, позволяющей оценивать быстродействие МВП, является минимальная длительность фронта преобразуемого сигнала τ_{ϕ} .

Не вызывает сомнения, что другой общей характеристикой является время нарастания переходной характеристики τ_n или полоса пропускания тракта преобразования ΔF .

По-видимому, общими характеристиками также являются:

- динамический диапазон регистрации входного сигнала D_u ;
- минимальная величина преобразуемого сигнала $U_{\text{мин}}$;
- коэффициент трансформации K_m ;
- максимальная длительность преобразуемого сигнала $t_{u \text{ макс}}$;
- погрешность преобразования $\delta_n(\delta_u, \delta_t)$.

Следует пояснить последнюю характеристику преобразователя. Погрешность преобразования формы сигнала - весьма емкое понятие, и мера ее измерения до сих пор полностью не определена, так как она существенно зависит от конкретного класса сигналов. В то же время в практике проведения измерений экспериментатора часто интересует лишь определенный параметр сигнала (например, площадь и др.). Поэтому целесообразно под погрешностью преобразования δ_n подразумевать амплитудную δ_u и временную δ_t погрешности. Задание этих погрешностей позволяет в принципе определить погрешность измерения конкретного параметра исследуемого процесса для определенного класса сигналов, например полуширину импульса гауссовой формы, постоянную нарастания экспоненты и др.

Перечисленные выше характеристики МВП целесообразно отнести к основным. Дополнительными характеристиками МВП являются:

- число каналов преобразования m ;
- входное сопротивление $R_{\text{вх}}$;

- время преобразования входного сигнала T_n ;
- вид выходной информации;
- напряжение питания и потребляемая мощность;
- характеристики надежности (среднее время наработки на отказ $T_{ср}$ и т.п.);
- другие характеристики.

Предложенные показатели достаточно полно характеризуют возможности МВП любого типа. Тем не менее при сравнении разных типов МВП, особенно при проведении технико-экономических расчетов, было бы целесообразно ввести коэффициент качества преобразователя. Однако это не входило в задачу авторов обзора, так как этот вопрос представляет самостоятельную проблему.

1.4. Масштабно-временные преобразователи однократных сигналов нано- и микросекундной длительности

За последнее десятилетие как в СССР, так и за рубежом (в основном в США) интенсивно проводились НИР и ОКР, направленные на выявление возможностей масштабного преобразования, с целью создания МВП однократных сигналов нано- и микросекундной длительности. Изучение и анализ этих работ, а также личный опыт авторов позволили сделать вывод о том, что наиболее перспективными в этом отношении являются следующие типы МВП:

- на параметрических системах;
- на ЛЗ с элементами отбора;
- на ЗЭЛТ.

Возможности указанных МВП для целей преобразования однократных сигналов нано- и микросекундного диапазонов подтверждаются их основными характеристиками, приведенными в табл.1.

Таблица 1

Уровень развития современных МВП

Тип МВП	Минимальная длительность фронта преобразуемого сигнала $\tau_{ф}$, нс	Полоса пропускания тракта преобразования ΔF , МГц	Источник
На параметрических системах	7 - 30	200 - 400	[5,6,8,10]
На ЛЗ с элементами отбора	0,13 - 50	500 - 2800	[5,7,18,19]
На ЗЭЛТ	0,15 - 3,5	100 - 2300	[2,3,16,17,20-23]

2. МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

2.1. Общие положения

Масштабно-временное преобразование в параметрических системах осуществляется путем изменения характеристических параметров этих систем.

К настоящему времени известны два типа МВП, работающих по этому принципу:

- на ЛЗ;
- на электронных пучках.

В МВП на ЛЗ используется принцип изменения скорости распространения сигнала в линии путем изменения ее параметров (индуктивности, емкости). Как известно, скорость распространения сигнала в ЛЗ определяется по формуле

$$v = 1/\sqrt{LC}, \quad (7)$$

где L и C - погонные значения индуктивности и емкости линии.

Изменяя тем или другим способом значения L и C во время прохождения сигнала по линии, можно изменять скорость распространения его по тому или иному закону, в том числе и по линейному закону в соответствии с выражением (5). Наиболее удобно изменять значения L и C линии, воздействуя на них управляющим напряжением или током. При этом линия должна содержать элементы C или L , значения которых зависели бы от значения приложенного напряжения или протекающего тока.

Такой тип преобразователей иногда называют МВП на дисперсионных ЛЗ [1] или параметрическими преобразователями импульсных сигналов в волновых системах с нелинейными параметрами [8].

В МВП на электронных пучках масштабное-временное преобразование осуществляется за счет изменения времени пролета электронов между электродами электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) при изменении электрического поля

$$\tau_n \sim 1/\sqrt{U_y} \sim 1/v, \quad (8)$$

где U_y - управляющее напряжение между электродами.

Применительно к замедляющим системам с переменными во времени параметрами формула (5) приобретает вид

$$\tau_3(x, t) = A(x) + B(x)t_0, \quad (9)$$

где $A(x)$ и $B(x)$ – произвольные функции расстояния x данной точки замедляющей системы от ее начала;
 t_0 – временное расстояние данного мгновенного значения от начала сигнала [5].

Закон изменения скорости распространения сигнала, обеспечивающий линейное преобразование его временного масштаба, имеет вид

$$V = \frac{dx}{dt} = \frac{1 + B(x)}{A'(x) + A'(x)B(x) - A(x)B'(x) + B'(x)t}, \quad (10)$$

где $A'(x)$ и $B'(x)$ – производные функции $A(x)$ и $B(x)$.

Так как практическая реализация полученного закона (10) затруднительна, то в теории МВП на параметрических системах рассматриваются лишь три случая преобразования сигналов:

а) скорость распространения для выбранного мгновенного значения сигнала не изменяется вдоль всей системы, но различна для различных мгновенных значений:

$$V(t) = V_0 \frac{1 + \beta x / V_0}{1 + \beta t}, \quad (11)$$

где V_0 – скорость распространения в точке $x = 0$ при $t = 0$;

$$\beta = \frac{B(x)}{A(x)} = \text{const};$$

б) скорость распространения изменяется во времени, но в данный момент времени одинакова во всей системе:

$$V(t) = V_0 \frac{1}{1 + \beta t}; \quad (12)$$

в) скорость распространения меняется скачкообразно:

$$V(t) = \begin{cases} V_0, & t < \tau_{\beta x} \\ V_1, & t > \tau_{\beta x}, \end{cases} \quad (13)$$

где $\tau_{\beta x}$ – длительность входного сигнала.

МВП на параметрических линиях, реализующие указанные алгоритмы (11)–(13), соответственно именуется:

- а) преобразователи на ЛЗ с последовательным управлением;
- б) преобразователи на ЛЗ с одновременным управлением;
- в) преобразователи на ЛЗ со скачкообразным управлением.

2.2. Преобразователи на линии задержки с последовательным управлением

В соответствии с формулами (7) и (11) при таком способе управления закон изменения параметров L и C должен быть следующим:

$$L = L_0 \frac{1 + \beta t}{1 + \beta x / V_0}, \quad (14)$$

$$C = C_0 \frac{1 + \beta t}{1 + \beta x / V_0},$$

где L_0, C_0 – начальные погонные индуктивность и емкость линии.

Так как управление индуктивности обеспечивает пределы ее изменения $L_{\text{макс}} / L_{\text{мин}} \sim 3$, а управление емкостью $C_{\text{макс}} / C_{\text{мин}} \geq 10$, то ниже будут рассмотрены преобразователи на линии с управляемой емкостью. В этом случае

$$L = L_0, \quad C = C_0 \left(\frac{1 + \beta t}{1 + \beta x / V_0} \right)^2. \quad (15)$$

Решение телеграфных уравнений для этого случая имеет следующий вид [5]:

$$F(x, t) = \frac{1}{(1 + \beta x / V_0)^{3/2}} f \left[\frac{1}{1 + \beta x / V_0} \left(t - \frac{x}{V_0} \right) \right]. \quad (16)$$

Уравнение (16) описывает "падающую" волну, распространяющуюся вдоль линии с переменными параметрами при последовательном управлении. Из уравнения видно, что входной сигнал $f(t)$ и выходной сигнал $F(x, t)$ линии длиной x отличаются амплитудой, временным масштабом и временным сдвигом, причем формы этих сигналов полностью идентичны.

Коэффициент трансформации равен

$$K_M = 1 + \beta x / V_0. \quad (17)$$

Необходимый закон изменения емкости линии (15) позволяет определить закон изменения управляющего напряжения для конкретной конструкции линии. Так, для линии с использованием емкости p - n -переходов полупроводниковых диодов этот закон имеет вид

$$U_y(t) = \left[\frac{n^2}{(1 + \beta t)^4} - 1 \right] U_k, \quad (18)$$

где $n = C_{\text{макс}} / C_{\text{мин}}$;

$$\beta = \frac{\sqrt{n} - 1}{\tau_{\beta x}};$$

$\tau_{\beta x}$ - длительность входного сигнала;

$$U_k = \begin{cases} 0,3-0,5 & \text{для германиевых диодов;} \\ 0,5-0,7 & \text{для кремниевых диодов.} \end{cases}$$

Следует отметить, что поскольку $L = \text{const}$, а $C = \text{var}$, то волновое сопротивление линии $\rho = \sqrt{L/C}$ будет изменяться. Для согласования линии с нагрузкой в процессе преобразования в качестве последней можно применить четырехполюсник, входное сопротивление которого автоматически изменяется таким образом, чтобы в любой момент времени оно было равно волновому сопротивлению линии.

Как показывает анализ [5], в искусственной линии, состоящей из 20 звеньев с постоянной индуктивностью 0,05 мкГн и переменной емкостью 2-20 пФ, можно получить: $K_M \approx 15$, $\Delta F \approx 400$ МГц, $D_u \approx 50$ дБ, максимальную амплитуду входного сигнала $U_{\text{макс}} \approx 40$ В (амплитуда управляющего напряжения для сегнетоэлектрических конденсаторов равна приблизительно 500 В).

Преобразователь, осуществлявший параметрическое расширение импульсов, описан в работе [8]. Он содержал две линии (рис.3), звенья одной из которых имели нелинейные конденсаторы (на основе сегнетокерамики типа ВК-7), изменяющие под действием управляющего напряжения свою емкость от 3 до 12 пФ ($L = 0,05$ мкГн, $\rho_{\text{мин}} = 75$ Ом, $\rho_{\text{макс}} = 150$ Ом). По отношению к преобразуемому сигналу система работала в линейном режиме, поэтому исходный импульс с начальной длительностью $\tau_{\text{вх}} = 5$ нс и фронтом $\tau_{\text{ф}} \approx 1$ нс преобразовывался в линии в импульс аналогичной формы, растянутой во времени в два раза.

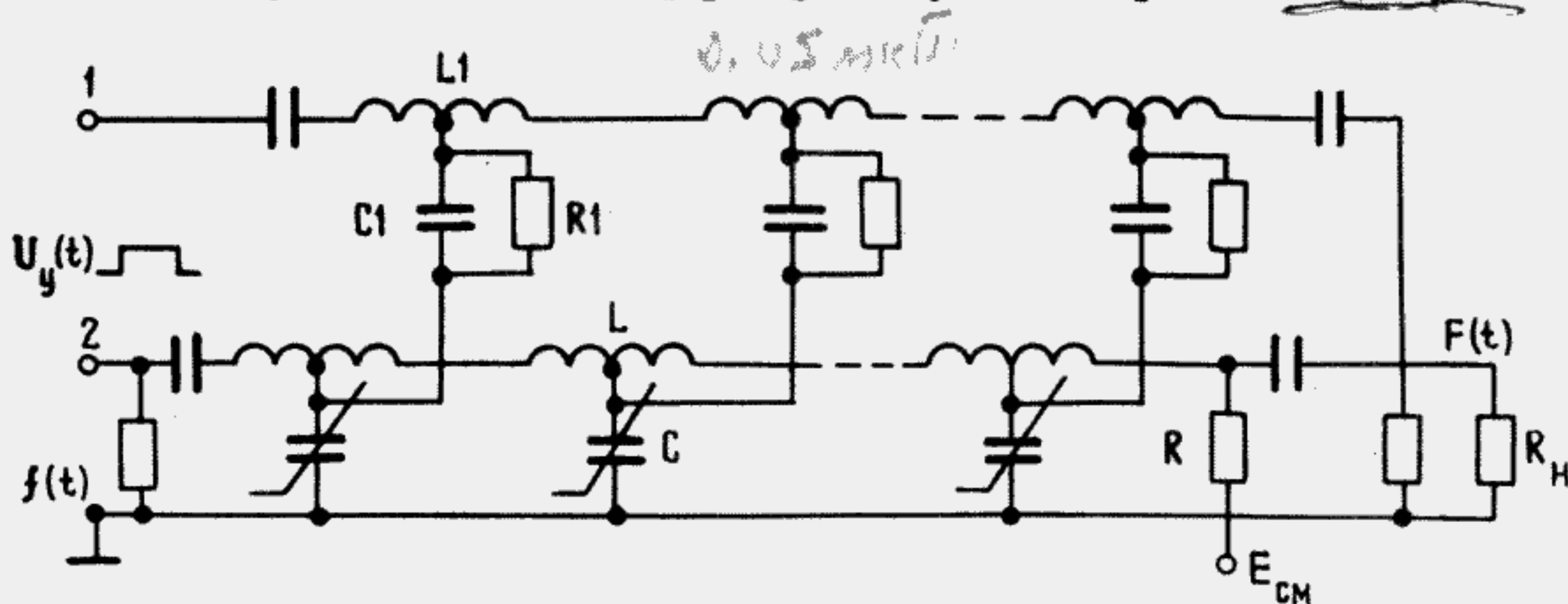


Рис.3. Схема МВП на ЛЗ с последовательным управлением емкостью

Рассматриваемым МВП присущи следующие специфические искажения преобразуемого сигнала:

- за счет отражения в линии из-за нарушения согласования ее с нагрузкой (или звеньев линии между собой);
- из-за отклонения формы управляющего сигнала от требуемой;
- в результате выделения преобразованного сигнала из управляющего.

Очевидно, что запаздывание или недостаточная длительность управляющего напряжения недопустимы, так как в противном случае преобразованию будет подвергаться лишь часть входного сигнала. Флуктуация управляющего напряжения является источником внутренних шумов преобразователя.

Как следует из уравнения (17), коэффициент K_M можно увеличить за счет замедления сигнала, а при прочих равных параметрах - за счет удлинения линии. При этом необходимо учитывать влияние длины линии на полосу пропускания.

Следует отметить, что в качестве распределенных систем с нелинейной управляемой погонной емкостью весьма перспективны полосковые линии на основе сегнетоэлектрических пленок из титаната (или цирконата) бария толщиной в единицы микрометров. Такие пленки имеют максимальную диэлектрическую проницаемость 1000 и сохраняют в СВЧ-диапазоне (до 3 ГГц) те же свойства, что и на низких частотах [8]. Таким образом, преобразователи на основе полосковых линий с указанным диэлектриком смогут обеспечивать как широкую полосу пропускания, так и полное использование всего диапазона изменения параметров линии (коэффициента K_M).

2.3. Преобразователи на линии задержки с одновременным управлением

В соответствии с формулами (7) и (12) при таком способе управления закон изменения параметров L и C должен быть следующим:

$$L = L_0(1 + \beta t), \quad (19)$$

$$C = C_0(1 + \beta t).$$

Решение телеграфных уравнений для этого случая имеет следующий вид [5]:

$$F(x, t) = \exp\left(-\frac{\beta x}{V_0}\right) f\left\{ t \exp\left(-\frac{\beta x}{V_0}\right) + \frac{1}{\beta} \left[\exp\left(-\frac{\beta x}{V_0}\right) - 1 \right] \right\}. \quad (20)$$

Из уравнения (20) видно, что выходной сигнал $F(x,t)$ отличается от входного $f(t) = F(0,t)$ амплитудой, временным масштабом и временным сдвигом, причем форма этих сигналов идентична.

Закон изменения управляющего сигнала во времени при последовательном и одновременном управлениях одинаков. Однако в последнем случае этот сигнал не зависит от x и должен прикладываться одновременно ко всем элементам искусственной ЛЗ.

Коэффициент трансформации равен

$$K_M = \exp \frac{bx}{V_0} \quad (21)$$

В работе [5] показано, что коэффициент b в формуле (17) больше, чем в формуле (21), поэтому максимально достижимый коэффициент K_M при одновременном управлении меньше, чем при последовательном. Остальные технические характеристики этого преобразователя примерно равноценны аналогичным характеристикам преобразователя с последовательным управлением и ограничиваются теми же факторами.

В соответствии с формулой (19) сопротивление $\rho = \sqrt{L/C}$ остается постоянным и легко согласуемым. Тем не менее в работе [5] отмечается, что при одновременном управлении проблема согласования линии с нагрузкой и подавления управляющего сигнала на выходе линии остается актуальной, как и при последовательном управлении.

Рассмотренный тип преобразователя позволяет обеспечить $K_M \approx 7$ и $\Delta F \approx 400$ МГц [5]. Линия состояла из двадцати звеньев с коэффициентом перекрытия параметров около трех.

2.4. Преобразователи на линии задержки со скачкообразным управлением

Рассматриваемые в литературе преобразователи известны как преобразователи на ключевых линиях, так как скачкообразное изменение реактивных параметров линии достигается путем подключения (или отключения) дополнительных реактивных элементов с помощью ключевых устройств (ключей) [8].

В общем случае с помощью ключей можно скачкообразно изменять как погонную индуктивность, так и погонную емкость линии. Однако последнее более удобно из конструктивных соображений.

Так как реальные ключевые устройства имеют конечное время переключения τ_n и внутреннее сопротивление R_i , отличное от нуля во включенном состоянии, то они оказывают заметное влияние на характеристи-

ки ключевых линий (рис.4). В работе [8] был проведен анализ влияния параметров τ_n и R_i на искажение формы преобразуемого сигнала, из которого можно сделать два практических вывода:

- время переключения ключей в линии должно быть равно или меньше τ_{ϕ} :

$$\tau_n = \pi \tau_{\phi} / (1 + C^*/2C), \quad C^* \gg C; \quad (22)$$

- величина внутреннего сопротивления ключей ограничивает максимально возможное значение скорости распространения преобразуемого сигнала и, следовательно, максимально возможный коэффициент трансформации, поэтому должно выполняться неравенство

$$R_i C^* \ll \Delta t = \sqrt{L(C+C^*)}. \quad (23)$$

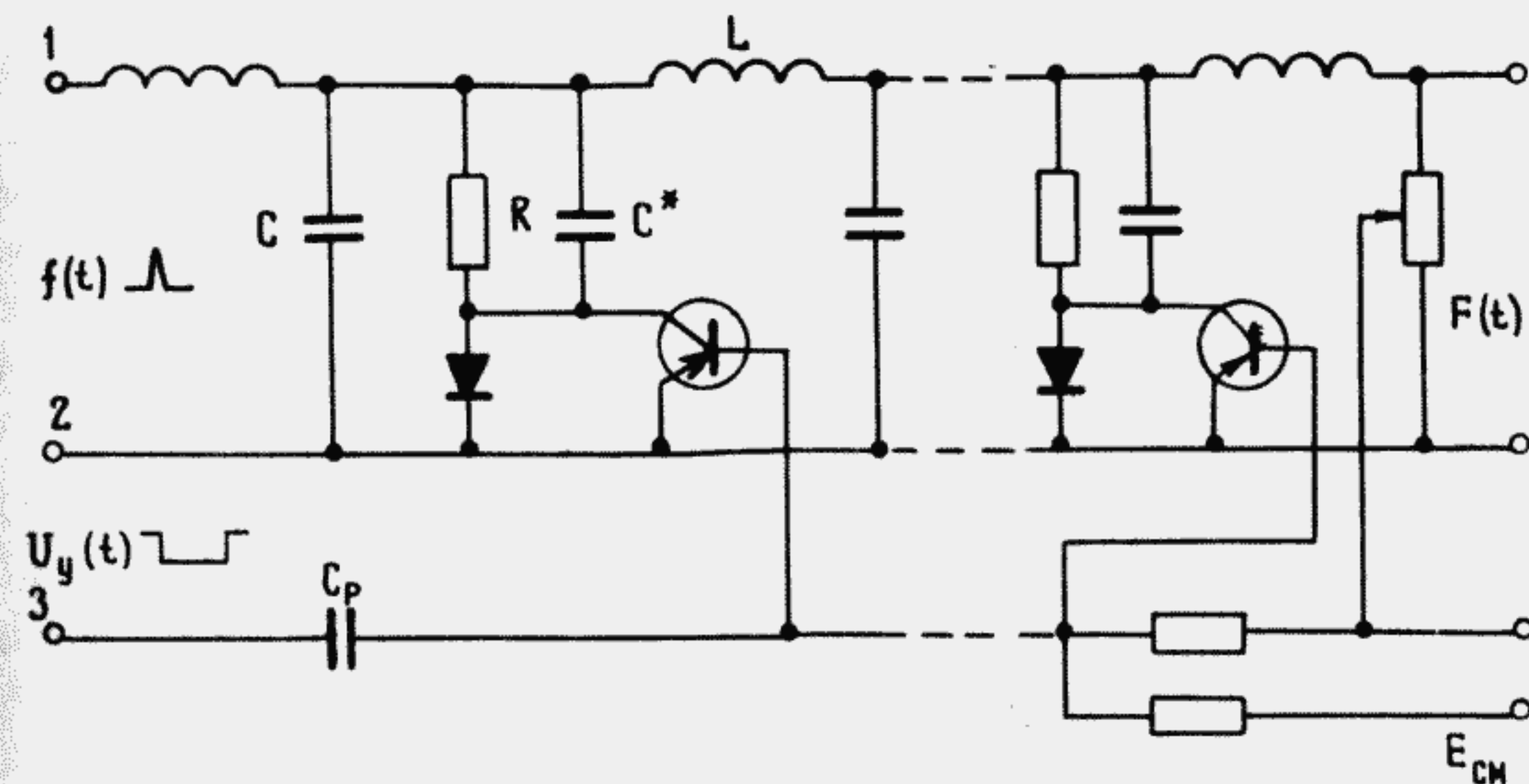


Рис.1. Схема ключевой линии, входящей в состав ЛВП со скачкообразным управлением емкостью ($L = 1,5 \cdot 10^{-7}$ Гн, $C = 10$ пФ, $C^* = 40$ пФ, $R = 11$ кОм)

Так как для преобразователей со скачкообразным изменением параметров линии

$$K_M = V_0 / V_1, \quad (24)$$

то соотношение (23) эквивалентно неравенству

$$K_M \ll \rho_0 / R_i, \quad (25)$$

где $\rho_0 = \sqrt{L/C}$ [5].

При $R_i \rightarrow 0$, $\rho_0 / R_i \rightarrow \infty$ коэффициент K_M можно существенно увеличить, так как неравенство (25) будет всегда выполняться. Даже в

случае $\tau_n \rightarrow 0$ необходимо учитывать соотношение (23), в противном случае форма преобразуемого сигнала будет искажена.

Ключевые линии должны удовлетворять общим требованиям, как и любая другая параметрическая линия, рассмотренная выше:

- обладать малой дисперсией и потерями во всем спектре частот преобразуемого сигнала;
- иметь, по возможности, наибольшее изменение величин реактивных параметров;
- быть линейными по отношению к преобразуемому сигналу;
- иметь небольшую амплитуду управляющего сигнала.

Преобразователи на ключевых линиях имеют существенные практические преимущества перед преобразователями с линиями, управляемыми последовательно и одновременно:

- уменьшается влияние формы управляющего сигнала;
- линия менее критична к нестабильности управляющего сигнала относительно преобразуемого;
- упрощается схема выделения преобразованного сигнала на выходе линии;
- упрощается согласование линии с источником сигнала и нагрузкой.

Так, например, для выполнения последнего требования достаточно обеспечить (при $K_M > 1$)

$$\begin{aligned} R_H &= \sqrt{L/C_{\max}} = \sqrt{L/(C+C^*)}, \\ R_{\text{вх}} &= \sqrt{L/C_{\min}} = \sqrt{L/C}. \end{aligned} \quad (26)$$

В рассмотренном МВЛ происходило увеличение длительности сигнала, который поступал на вход 1,2. Управляющий сигнал амплитудой 10 В подавался одновременно на все транзисторные ключи (вход 2,3), когда преобразуемый сигнал уже полностью находился внутри линии (см. рис.4).

Экспериментально было получено увеличение длительности сигнала с $\tau_{\text{вх}} \approx 25$ нс до $\tau_{\text{вых}} \approx 70$ нс. Искажения формы сигнала были незначительными (не более 10%) и в основном определялись ограниченностью полосы пропускания линии и наводками в цепи управления, обусловленными током, проходящим через емкость "коллектор-база".

В другом варианте (рис.5) преобразователя со скачкообразным управлением реактивного параметра линии (емкости) применена вспомогательная линия с малыми емкостями и большим волновым сопротивлением, по которой распространяется управляющее напряжение $U_y(t)$ со ско-

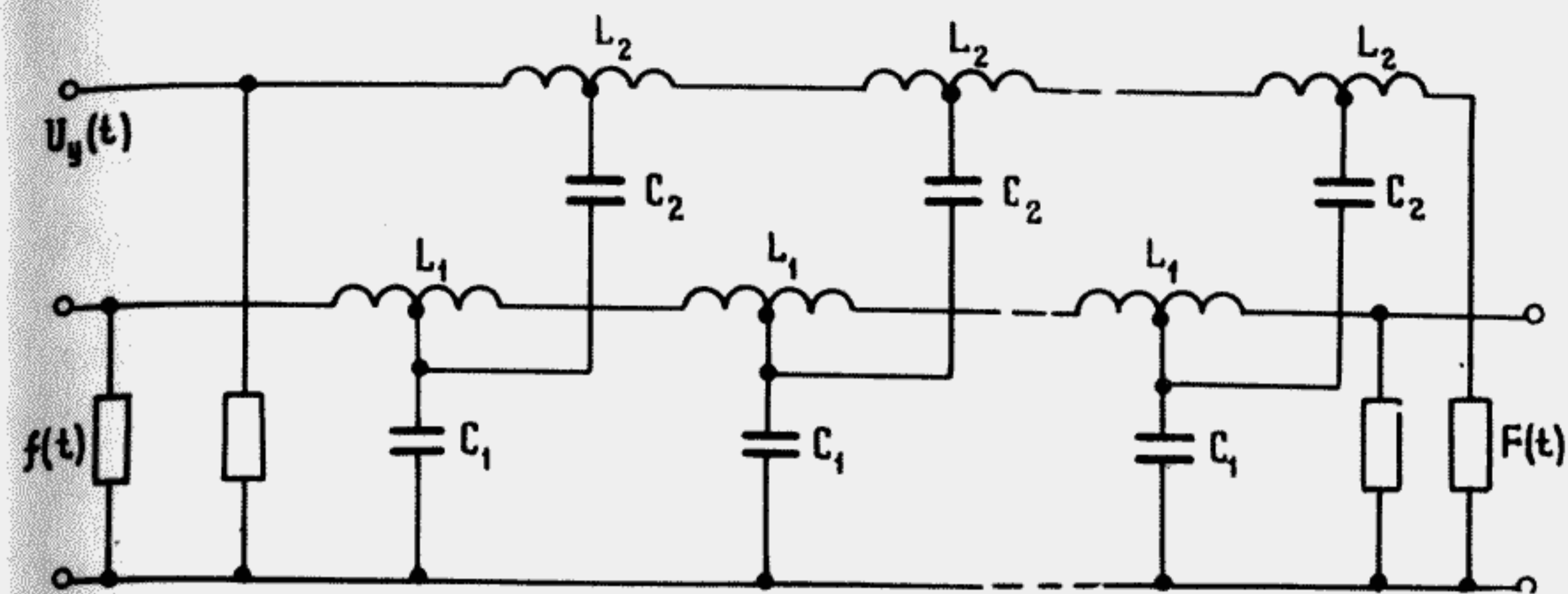


Рис.5. Схема МВЛ со скачкообразным управлением емкостью с помощью вспомогательной линии

ростью, значительно превышающей скорость распространения входного сигнала $f(t)$ в основной (преобразующей) линии [5]. Это позволяет уменьшить мощность источника управляющего напряжения и считать, что значения емкости вдоль основной линии изменяются одновременно по одинаковому закону. При $L = 0,05$ мкн и $C = 2-20$ пФ преобразователь обеспечивал $K_M \approx 5$ при $\Delta F \approx 230$ МГц.

2.5. Преобразователи на электронных пучках

Линейное преобразование временного масштаба можно также излучить в замедляющих системах с электронными пучками. При этом используется конечное время пролета электронов между электродами, которым можно управлять при помощи электрического поля.

В работе [5] показано, что объемная плотность заряда $\rho(x, t)$ на расстоянии x от катода изменяется во времени по тому же закону, что и объемная плотность заряда $\rho(t)$ при $x = 0$:

$$\rho(x, t) = \frac{1}{1 + \beta x/V_0} f \left[\frac{1}{1 + \beta x/V_0} \left(t - \frac{x}{V_0} \right) \right], \quad (27)$$

где V_0 - начальная скорость электронов в точке $x = 0$;
 β - коэффициент пропорциональности.

Формула (27) получена в результате решения уравнений Максвелла-Лоренца для движения электронов в электрическом поле. Входной сигнал $f(t)$ и выходной сигнал $\rho(x, t)$ в точке x отличаются амплитудой, временным масштабом и временным сдвигом, причем форма этих сигналов идентична.

Формула (27) получена в предположении, что скорость движения электронов изменяется по закону

$$V = V_0 \frac{1 + \beta x / V_0}{1 + \beta t} \quad (28)$$

Так как в ЭЛТ скорость электронов связана с ускоряющим напряжением функциональной зависимостью (8), то из формулы (28) можно найти закон изменения во времени управляющего напряжения

$$U_y(t) = \frac{U_y(0)}{(1 + \beta t)^2} \quad (29)$$

Коэффициент трансформации равен

$$K_M = 1 + \frac{\beta x}{V_0} \quad (30)$$

Сравнение выражений (27), (28) и (30) соответственно с выражениями (16), (II) и (17) дает основание считать, что преобразователи на электронных пучках и на параметрических ЛЗ с последовательным управлением с точки зрения математического описания практически идентичны. Принципиальная возможность реализации такого преобразователя была проверена в работе [29]. Автором была разработана ЭЛТ с замедляющей системой для наблюдения субнаносекундных сигналов.

Как видно из рис. 6, входной сигнал $f(t)$ используется для модуляции объемной плотности электронного пучка. При прохождении электронного пучка через трубку дрейфа, к которой приложен управляющий сигнал $U_y(t)$ в виде уменьшающегося во времени импульса напряжения, электронный пучок растягивается, так как электроны пучка входят в трубку дрейфа с постоянно снижающимися энергиями и, следовательно, пролетают через нее с постоянно уменьшающимися скоростями. В пределах трубки дрейфа электроны продолжают двигаться с той же скоростью, что и при входе в нее, независимо от изменяющегося потенциала трубки дрейфа относительно катода. Эта же трубка экранирует электроны дрейфа от внешних полей. Для удержания электронов вдоль оси трубки используется продольное магнитное поле, создаваемое соленоидом. После выхода из трубки дрейфа электроны поступают в электронный умножитель, поскольку ток пучка равен приблизительно 1 мкА. Напряжение $U_{\text{вых}}(t)$ снимается с сопротивления нагрузки R_H . Трубка дрейфа совместно с цилиндром большого диаметра образуют отрезок коаксиальной линии передачи. Управляющий импульс распространяется в ней и поглощается на сопротивлении нагрузки, равном ее волновому сопротивлению ρ .

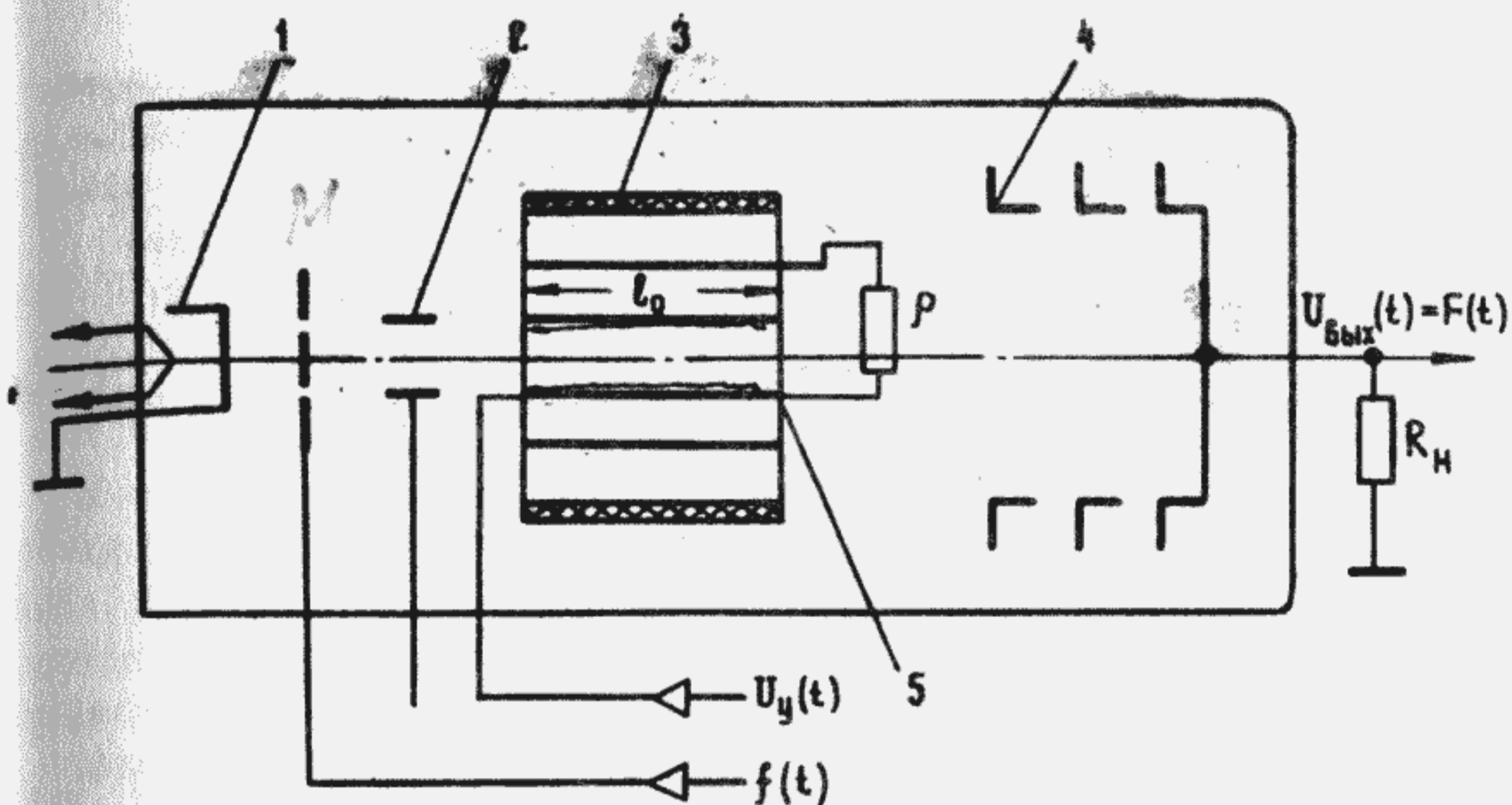


Рис. 6. Схема МВП на электронных пучках:

1 - катод; 2 - экран; 3 - соленоид; 4 - электронный умножитель; 5 - трубка дрейфа

Управляющее напряжение $U_y(t)$ имело форму спадающей экспоненты, созданную с помощью лавинного транзистора и простой RL -цепочки:

$$U_y = \frac{U_0}{1 + (K_M - 1) \frac{t}{\tau_n}} \quad (31)$$

где U_0 - первоначальный потенциал на трубке дрейфа;

τ_n - время пролета электронов через трубку.

Начало управляющего сигнала должно быть синхронизировано с моментом входа в трубку дрейфа модулированного по плотности электронного пучка.

Преобразователь обеспечивал пятикратное увеличение масштаба времени для сигнала с $\tau_{\text{ф}} \approx 3$ нс, длительностью на уровне $0,5 t_u \approx 7$ нс и амплитудой ≈ 360 мВ.

По-видимому, в таких МВП в качестве электронного умножителя может быть использована полупроводниковая мишень (например, из кремния), которая при бомбардировке ее электронами с энергией около 10 кэВ может выполнять функции усилителя тока, обладающего временными характеристиками в области десятков гигагерц [30].

Как уже отмечалось выше, рассмотренный преобразователь аналогичен преобразователю на ЛЗ с последовательным управлением, поэтому все

указанные закономерности будут действительны и здесь. Однако полоса пропускания, точность преобразования и максимальная амплитуда входного сигнала в преобразователе на электронных пучках будут значительно выше из-за большей полосы пропускания самой замедляющей системы, отсутствия разброса характеристик нелинейных элементов и отсутствия влияния входного сигнала на скорость электронов. Значительно упрощается конструкция генератора скачкообразного управляющего напряжения из-за его малой мощности.

2.6. Выводы и предложения

Принцип работы МВП на параметрических системах предполагает изменение скорости распространения сигналов в ЛЗ или изменение времени пролета электронов в ЭПТ.

Рассмотренные выше различные законы изменения скорости распространения сигнала позволяют разрабатывать МВП с разной эффективностью.

Оптимальным для большинства практических случаев является, по-видимому, выбор таких законов изменения скорости, которые обеспечивают максимальное значение коэффициента трансформации K_M при одной и той же длине параметрической линии и равных максимальной и минимальной скоростях распространения сигнала в линии. Если же разные законы изменения скорости дают одинаковое максимальное значение коэффициента K_M , то целесообразно выбирать тот закон, для практической реализации которого можно использовать наипростейшую по конструкции параметрическую систему.

Из анализа, проведенного в работе [6], следует, что оптимальным является закон "бегущей" волны:

$$V(\xi) = \begin{cases} V_0, & t < x/V_p \\ V_1, & t > x/V_p \end{cases} \quad (32)$$

где $\xi = x - V_p t$;

V_p - скорость движения волны параметра или волны накачки, на фронте которой происходит быстрое изменение параметров линии.

В этом случае искажение формы сигнала также наименьшее.

Следует отметить особенности работы МВП на параметрических системах.

Во-первых, у таких преобразователей при линейном временном увеличении длительности сигнала амплитуда преобразованного сигнала

уменьшается, что следует из инвариантного соотношения между длительностью и энергией сигнала в линии

$$t_u \varepsilon = \text{const}, \quad (33)$$

где $\varepsilon = \frac{t_u U_M^2}{\rho}$ - энергия сигнала;

t_u - длительность сигнала;

U_M - амплитуда сигнала;

ρ - волновое сопротивление линии [8].

Во-вторых, длина параметрической линии при заданном коэффициенте трансформации K_M пропорциональна длительности преобразуемого сигнала. Однако при увеличении длины линии полоса пропускания ее уменьшается, что приводит к разному искажению крутых и пологих участков входного сигнала.

Анализ основных характеристик рассмотренных МВП, полученных в результате расчета и экспериментальных исследований, дает основание считать, что эти МВП обеспечивают:

- сравнительно небольшой коэффициент трансформации $K_M = 2 - 15$;
- минимальную амплитуду преобразуемого сигнала $U_{\text{вх. мин}}$ от нескольких десятков до нескольких сотен милливольт;
- $\Delta F = 200-400$ МГц;
- $D_u = 40-50$ дБ.

Практически проверялась возможность масштабного-временного преобразования при длительности входных сигналов 7-30 нс.

Наиболее перспективными являются преобразователи на параметрических линиях со скачкообразным изменением параметров и преобразователи на электронных пучках. Особый интерес представляет последний тип преобразователей как наиболее быстродействующий и обеспечивающий сравнительно простое усиление преобразованного сигнала.

3. МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ЛИНИЯХ ЗАДЕРЖКИ С ЭЛЕМЕНТАМИ ОТБОРА

3.1. Преобразователи на одной линии задержки с n элементами отбора

Как видно из рис.7, исследуемый однократный электрический сигнал распространяется вдоль ЛЗ с n отводами, к которым подключены элементы отбора Θ_0 . Этот же сигнал запускает генератор строб-импульсов,

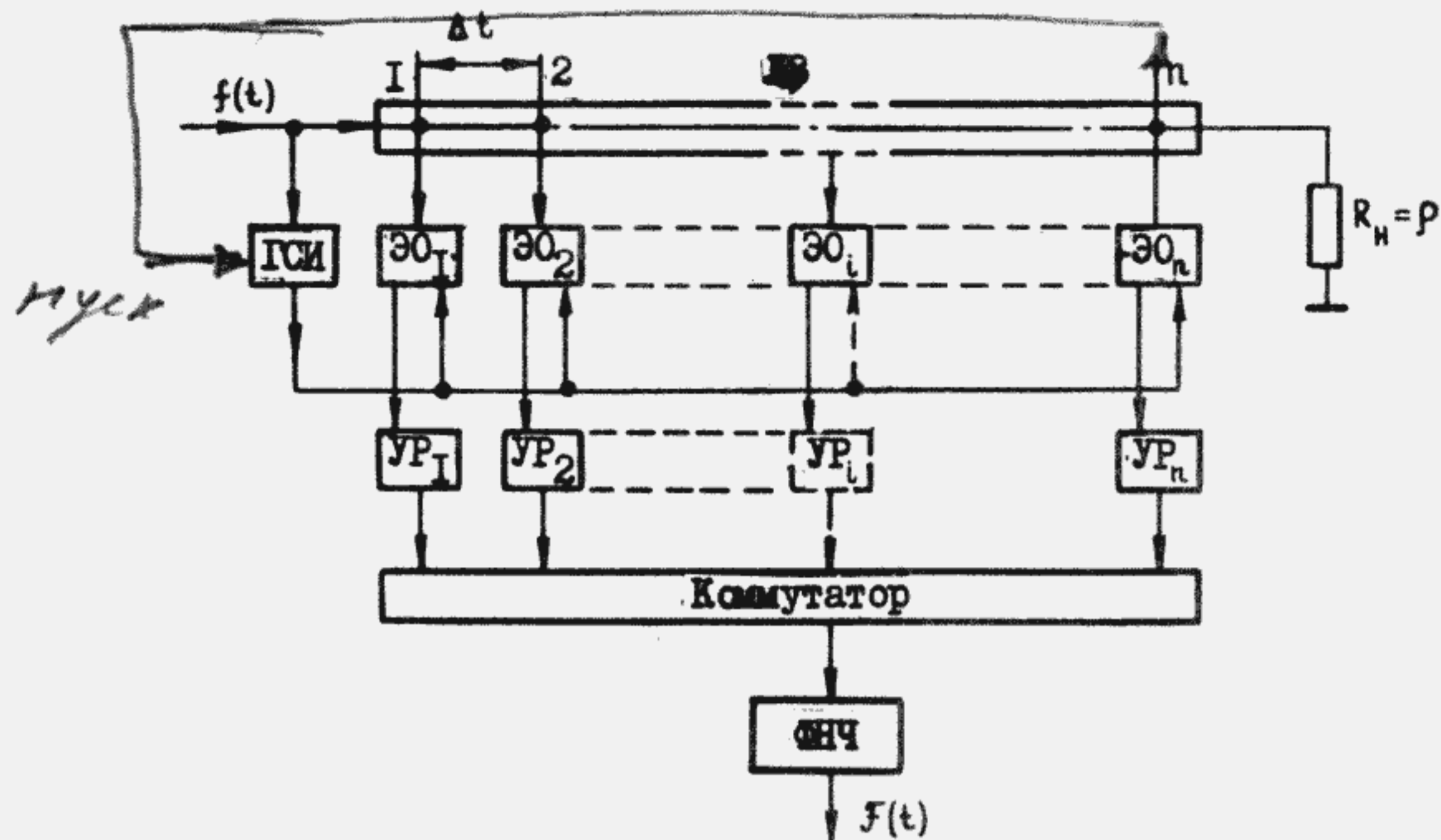


Рис.7. Структурная схема МВД на одной ЛЗ с n элементами отбора ($\text{ЭО}_i, i = 1, 2, \dots, n$):
 ГСИ - генератор строб-импульсов; УР - усилитель-расширитель;
 ФНЧ - фильтр нижних частот

который срабатывает в момент достижения передним фронтом сигнала последнего элемента отбора ЭО_n . Строб-импульс генератора подается одновременно на все элементы отбора. В результате этого на емкостных нагрузках элементов отбора выделяются расширенные импульсы, амплитуды которых пропорциональны мгновенным значениям исследуемого сигнала в момент стробирования. Далее эти импульсы поступают на усилители-расширители УР_i , а затем на коммутатор, с помощью которого обеспечивается считывание информации, поступившей на его входы, с относительно медленной скоростью. Выход коммутатора через фильтр нижних частот подключается непосредственно к индикаторному устройству (например, к входу осциллографа) или к входу информационно-измерительной системы [5]. В работе [18] импульсы с усилителя-расширителя поступали на аналого-цифровой преобразователь, выход которого подключался к ЗУ.

Длина ЛЗ выбирается из условия

$$l_3 \geq V t_{u.вх}, \quad (34)$$

где V - скорость распространения сигнала в линии;
 $t_{u.вх}$ - длительность входного сигнала.

Минимальный шаг считывания

$$\Delta t_{\text{мин}} \geq 2\tau_{\text{си}}, \quad (35)$$

где $\tau_{\text{си}}$ - длительность строб-импульса.

Минимальная длительность преобразуемого сигнала

$$t_{u.мин} = \Delta t(n-1), \quad (36)$$

где n - число выборок (число отводов ЛЗ).

Коэффициент трансформации определяется по формуле

$$K_M = T/\Delta t, \quad (37)$$

где Δt - шаг считывания (временное расстояние между выборками исследуемого сигнала);

T - временной промежуток между моментами считывания соседних значений преобразованного сигнала, задаваемый коммутатором.

Значение T выбирается из условия незначительного разряда накопительных конденсаторов-расширителей за время считывания коммутатором всех значений сигнала

$$T \ll \tau_p/n, \quad (38)$$

где τ_p - постоянная времени цепи разряда накопительного конденсатора;

n - число элементов отбора.

В работе [7] было определено оптимальное число выборок n при дискретном преобразовании однократного сигнала исходя из минимальных искажений дискретизируемого сигнала, обусловленных ослаблением сигнала при прохождении через неоднородности и отражения от этих неоднородностей, а также с учетом погрешности представления сигнала его дискретными значениями. Было показано, что для практических систем с неоднородностями в виде емкости $C_g \approx 1$ пФ и сигналов в виде треугольного импульса, а также полуволны косинусоиды $n_{\text{опт}} = 25-30$. При среднеквадратической погрешности около 3% получена полоса пропускания тракта преобразования примерно 500 МГц. Так как в настоящее время можно реализовать длительность строб-импульса $\tau_{\text{си}} \approx 0,3-1$ нс, то по формуле (36) можно оценить минимальную длительность преобразуемого сигнала

$$t_{u.мин} \approx 2\tau_{\text{си}} n_{\text{опт}} = 15-60 \text{ нс.}$$

Минимальная амплитуда преобразуемого сигнала и динамический диапазон по входу рассмотренного преобразователя примерно такие же,

как и в обычном стробоскопическом преобразователе (десятки-сотни милливольт, $D_{\mu} = 30-50$ дБ).

Коэффициент трансформации данного преобразователя на несколько порядков выше, чем у преобразователей на параметрических системах, и составляет $10^3 - 10^7$.

Рассмотренная схема преобразователя практически пригодна для преобразования однократных сигналов фиксированных длительностей, так как при заданном шаге считывания с возрастанием длительности входного сигнала пропорционально возрастают необходимая длина ЛЗ и число элементов отбора. Это не позволяет одновременно исследовать крутые и пологие участки сигнала большой длительности.

Из рассмотрения принципа работы преобразователей на одной ЛЗ с n элементами отбора следует, что при заданном числе выборок n минимальная длительность преобразуемого сигнала определяется минимально реализуемым шагом считывания Δt . Так как шаг считывания, с одной стороны, определяется электрической длиной отрезков ЛЗ τ_{Λ} , погрешность изготовления которой может составлять $3-5$ нс, а с другой стороны - длительностью строб-импульса, величина которого может составлять $0,3-1$ нс, то именно последнее обстоятельство определяет минимально возможный шаг считывания, который в соответствии с формулой (35) равен $0,6-2$ нс. По этой причине минимальная длительность преобразуемого сигнала составляет $15-60$ нс при числе выборок мгновенных значений сигнала $n = 25-30$.

С целью преобразования сигналов меньшей длительности в работе [5] предлагается другая схема преобразования, описываемая ниже.

3.2. Преобразователи на параллельных линиях задержки с элементами отбора

Структурная схема преобразователя (рис.8) во многом аналогична рассмотренной выше схеме преобразователя на одной линии при условии, что $n = 1$. Входной сигнал через разветвитель поступает на N параллельных ЛЗ, в каждую из которых включен элемент отбора. Импульс с генератора строб-импульса поступает одновременно на все элементы отбора в момент поступления переднего фронта входного сигнала $U_{вх}(t)$ на N -й элемент отбора. Расстояние всех элементов отбора от генератора строб-импульса одинаково. При совпадении строб-импульса с выходным сигналом на накопительном конденсаторе элемента отбора выделяется расширенный импульс, амплитуда которого пропорциональ-

на мгновенному значению входного сигнала в момент совпадения. Расположение элементов отбора вдоль ЛЗ обеспечивает совпадение строб-импульса с выходным сигналом в каждой линии в разные моменты времени относительно начала сигнала. При достаточном числе ЛЗ огибающая импульсов на накопительных конденсаторах элементов отбора, выделенная фильтром нижних частот, будет сохранять форму входного сигнала.

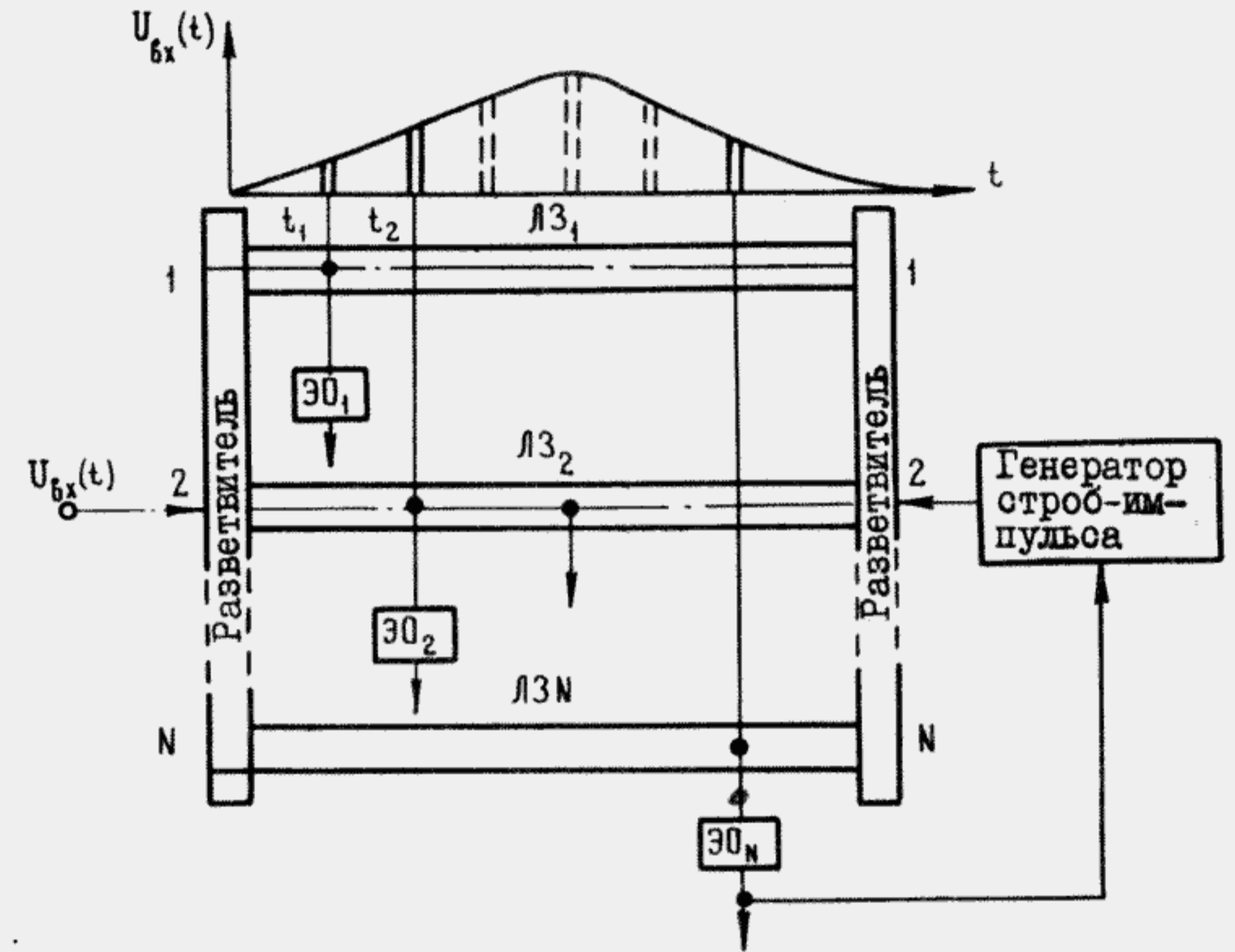


Рис.8. Структурная схема МВН на параллельных ЛЗ ($ЛЗ_i, i = 1, 2, \dots, N$) с элементами отбора ($ЭО_i, i = 1, 2, \dots, N$)

Следует отметить, что благодаря включению лишь одного элемента отбора в каждую из ЛЗ их влияние друг на друга существенно снижается, за счет чего может быть уменьшен шаг считывания, что в конечном итоге позволяет преобразовывать сигналы меньшей длительности. Однако из-за параллельного включения n ЛЗ минимальная амплитуда преобразуемого сигнала будет больше, чем у преобразователя на одной линии с n элементами отбора (при одинаковой чувствительности самого элемента отбора). Ее можно определить из формулы

$$U_{вх.мин}^* = \frac{U_{вх.мин}^* N}{\rho} R_{вх.разв} \quad (39)$$

где $R_{вх.разв}$ - входное сопротивление разветвителя;

- N - число параллельных ЛЗ;
- ρ - волновое сопротивление параллельной линии;
- $U_{вх. мин}^*$ - минимальная амплитуда преобразуемого сигнала для преобразователя на одной линии отбора (чувствительность элемента отбора).

Так как обычно $R_{вх. разв} = \rho/2$, то при $N = n_{опт} = 25-30$

$$U_{вх. мин} = (10-15)U_{вх. мин}^*$$

Полоса пропускания данного преобразователя выше, чем у преобразователя на одной линии с n отводами, и составляет примерно 900 МГц

В работе [19] описан и экспериментально проверен преобразователь, который является усовершенствованным вариантом рассмотренных МВП. Он представляет собой комбинацию ЛЗ с отводами и параллельных ЛЗ (рис. 9).

Преобразователь состоит из четырёх 50-Ом линий, в каждую из которых включено 10 элементов отбора с временным расстоянием между ними $T_G = 90$ пс. Обе пары линий соединены параллельно входу источника сигнала, причем временной сдвиг одной линии относительно другой в пределах пары равен 45 пс. Вторая пара линий по конструкции совершенно аналогична и сдвинута относительно первой пары на 900 пс. Во избежание проникновения строб-импульса в линию элементы отбора выполнены в виде двухдиодных схем, на каждую из которых поступает пара двухполярных строб-импульсов амплитудой 3 В и длительностью 80 пс. Благодаря такой конструкции шаг считывания стал равным 45 пс, а минимальная длительность преобразуемого сигнала $t_{н. мин} \approx 2$ нс. При числе дискретных значений сигнала, равном 40, полоса пропускания тракта преобразования $\Delta F \sim 2,8$ ГГц, минимальная амплитуда преобразуемого сигнала составляет десятки милливольт.

Несмотря на хорошие потенциальные возможности преобразования однократных сигналов длительностью около $10^{-8} - 10^{-9}$ с, описанные выше преобразователи имеют существенные недостатки:

- они сложны в настройке и регулировке, так как к параметрам формируемых импульсов выборки предъявляются жесткие требования по стабильности длительности, времени срабатывания и идентичности;
- ввиду конечной длительности импульсов выборки им всегда свойственна динамическая погрешность преобразования;
- вследствие влияния управляющего напряжения элемента отбора на соседние точки отбора на преобразуемый сигнал оказывают влияние импульсные помехи;
- отсутствует полное согласование элементов отбора.

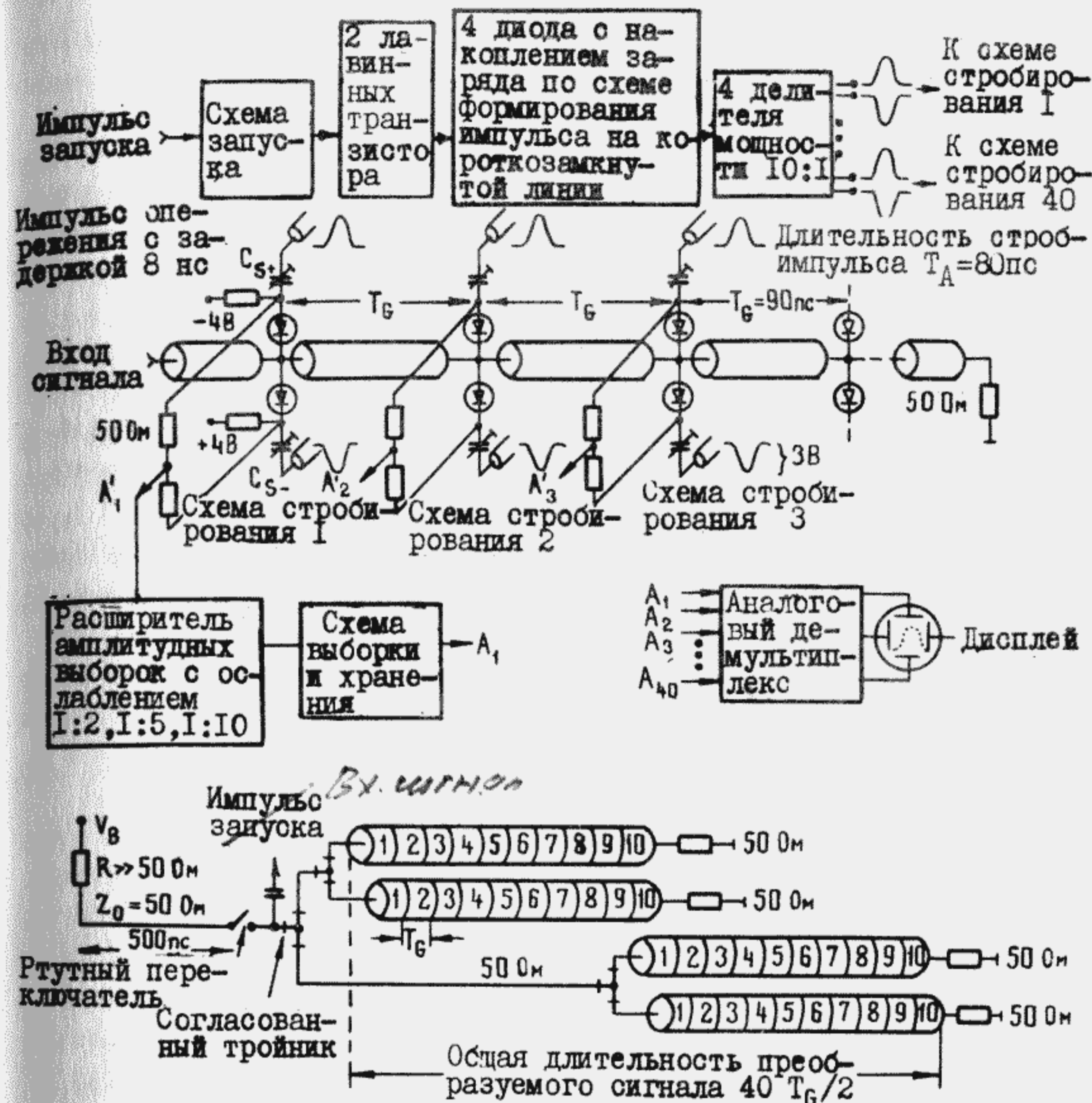


Рис. 9. Структурная схема усовершенствованного МВП на параллельных ЛЗ

По-видимому, методы технологии интегральных схем позволят уменьшить отмеченные выше недостатки (кроме второго). Так, например, для получения идентичных каналов преобразования целесообразно устройство формирования строб-импульса и элемент отбора (смеситель) выполнять методом единой технологии интегральных схем.

3.3. Преобразователи на линии задержки с одним элементом отбора

В рассмотренных преобразователях на одной ЛЗ с n отводами или на параллельных ЛЗ имеют место погрешности преобразования, обусловленные неидентичностью каналов дискретизации, например разной нестабильностью в срабатывании отдельных элементов отбора и др.

В работе [18] приведена структурная схема МВП, в которой стробирование входного сигнала производится с помощью одного элемента отбора с применением сверхбыстродействующих логических схем. Устройство имеет шаг считывания около 10 пс, что дает возможность преобразовывать сигналы с длительностью примерно 100 пс.

В работе [18] приведена также схема преобразователя с одним элементом отбора на ЛЗ, обладающей сверхпроводимостью (рис.10). Эта схема позволяет осуществить периодизацию однократного сигнала, так как добротность таких линий (отношение длительности задержки к длительности фронта сигнала) сравнительно высока и составляет примерно 10^4 [31].

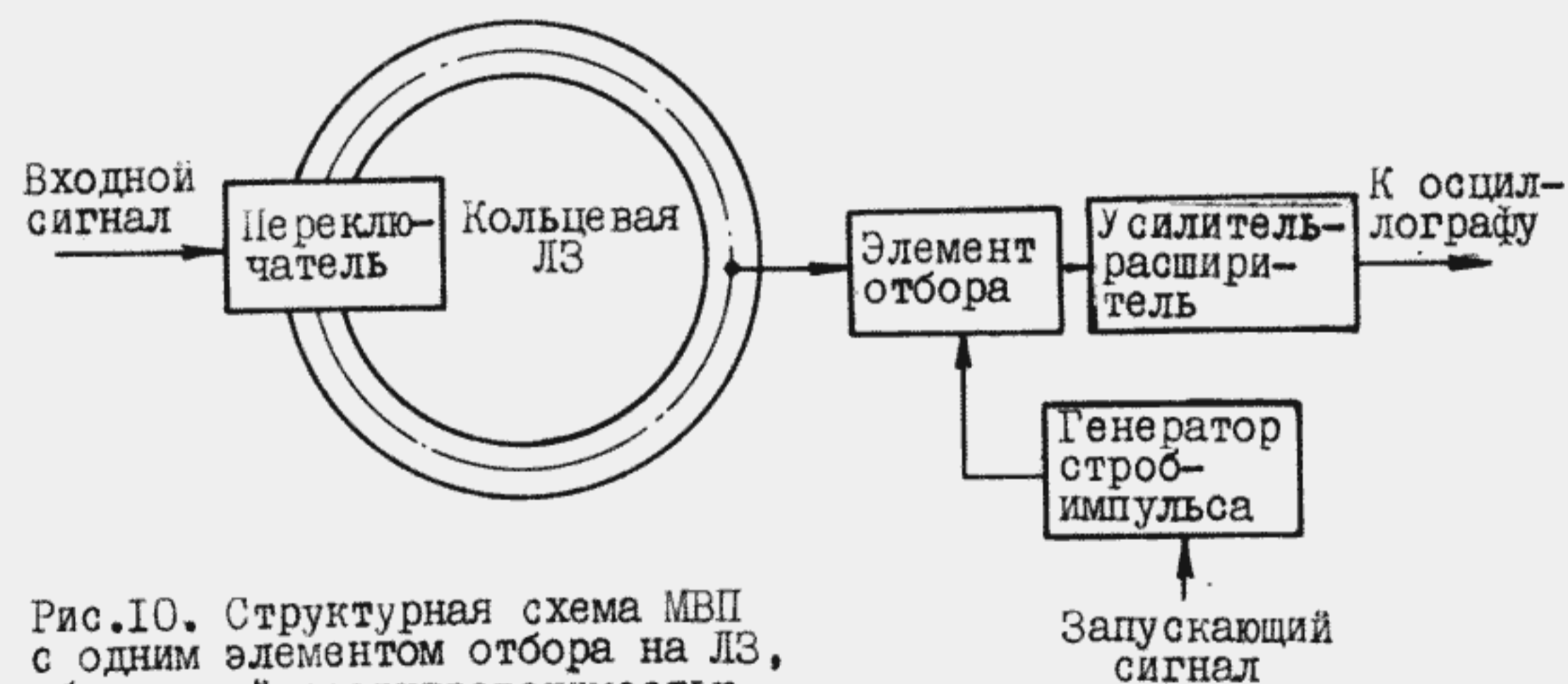


Рис.10. Структурная схема МВП с одним элементом отбора на ЛЗ, обладающей сверхпроводимостью

3.4. Выводы и предложения

МВП на ЛЗ с элементами отбора обеспечивают масштабно-временное преобразование формы однократных сигналов наносекундной длительности. Однако ввиду наличия неоднородностей, обусловленных элементами отбора, число выборок мгновенных значений сигнала у этих МВП огра-

ничено и составляет 25-30 для преобразователей на одной ЛЗ [7] и около 40 для преобразователей на параллельных ЛЗ [19].

Использование преобразователей на ЛЗ с одним элементом отбора требует наличия сверхбыстродействующей элементной базы или применения линии, обладающей сверхпроводимостью [18]. В настоящее время логическая аппаратура на интегральных схемах позволяет обрабатывать импульсы с максимальной частотой следования около 330 МГц [32]. Что касается широкого практического использования сверхпроводящих линий, то эта проблема, по-видимому, будет решена только в будущем [33].

Существенное ограничение с точки зрения преобразования однократных сигналов наносекундной длительности у МВП на ЛЗ с отводами накладывает длительность строб-импульса и инерционность элемента отбора (смесителя). В связи с этим, по-видимому, целесообразно устройство формирования строб-импульса и элементы отбора выполнять методами единой технологии интегральных схем.

Экспериментальные исследования рассмотренных в разд.3 МВП подтверждают возможность преобразования однократных сигналов минимальной длительностью около 2 нс [19] в диапазоне амплитуд от десятков до сотен милливольт.

По сравнению с МВП на параметрических системах (см.разд.2) преобразователи на ЛЗ с элементами отбора обладают коэффициентом трансформации на несколько порядков выше, что позволяет наблюдать форму исследуемого сигнала в преобразованном масштабе времени на экране сравнительно низкочастотного осциллографа [19] или после аналого-цифрового преобразования мгновенных значений сигналов вводить информацию в ЭВМ [18].

Несмотря на кажущуюся простоту практической реализации, многие схемные и конструктивные решения МВП на ЛЗ с элементами отбора весьма сложны и требуют индивидуальной настройки [19]. Они имеют специфические искажения формы преобразуемого сигнала, связанные, например, с прониканием строб-импульса в линию, неоднородностью самой линии, неравномерностью нулевой линии сигнала и ее сравнительно медленным дрейфом, нестабильностью формы строб-импульсов, неидентичностью каналов преобразования (в смысле временных и амплитудных соотношений).

Таким образом, рассмотренные МВП с точки зрения практического применения, по-видимому, целесообразно использовать для узкого диапазона длительностей преобразуемых сигналов в пределах 20-100 нс, когда не требуется сравнительно высокая точность регистрации.

4. МАСШТАБНО-ВРЕМЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ НА ЗАПОМИНАЮЩИХ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТРУБКАХ

Наибольшее распространение получили МВП на ЗЭЛТ в силу простоты построения и большой эффективности работы. МВП этого типа посвящено наибольшее число публикаций, и в этом направлении получены наилучшие практические результаты.

4.1. Принципы работы преобразователей на ЗЭЛТ

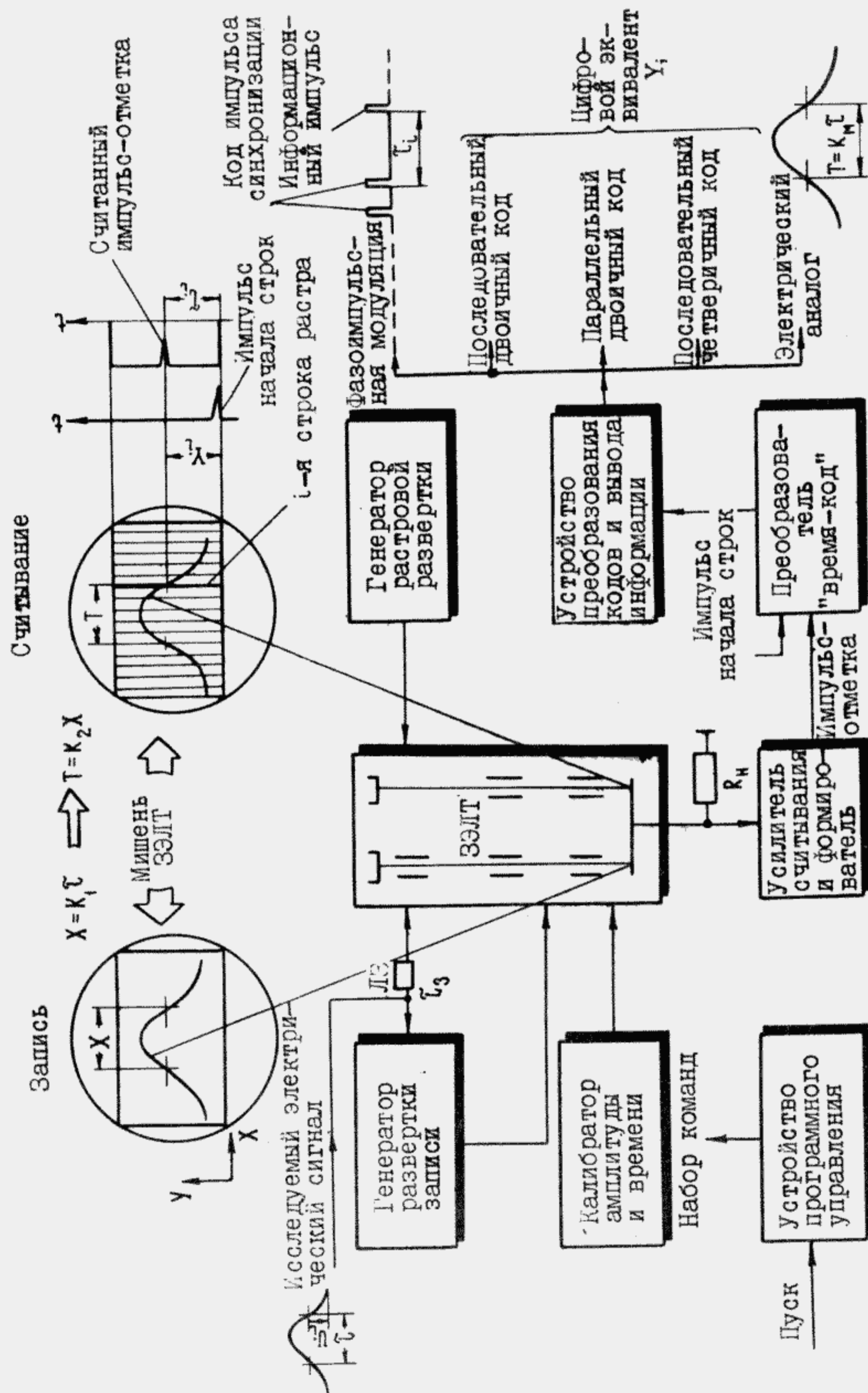
Принцип работы преобразователей на ЗЭЛТ сводится к записи электронным лучом на диэлектрической мишени трубки, обладающей вторично-эмиссионными свойствами, линии потенциального (зарядного) рельефа, соответствующей форме исследуемого сигнала в координатах "амплитуда-время", что соответствует координатам Y , X в плоскости мишени, и последующему дискретному считыванию этого рельефа также электронным лучом, развернутым в растр. Благодаря диэлектрическим свойствам мишени записанный рельеф сохраняется сравнительно длительное время, что позволяет производить запись информации с одной скоростью, а считывание - с другой.

Таким образом, процесс записи информации в преобразователе во многом аналогичен осциллографической записи, с той лишь разницей, что в первом случае информация об исследуемом сигнале заключена в скрытом потенциальном (зарядном) рельефе, хранящемся на мишени трубки, а во втором - в светящейся линии на экране трубки, которую можно наблюдать визуально. Однако непосредственное наблюдение однократного сигнала наносекундной длительности на экране осциллографа требует принятия специальных мер при эксплуатации и разработке конструкции ЭЛТ. Так, например, чтобы получить достаточно высокую скорость записи (10^{10} линия/с и более), необходима большая энергия луча (10 - 20 кэВ), что приводит к уменьшению чувствительности по отклонению, увеличению ширины луча и ухудшению разрешающей способности при прочих равных условиях. Запись сигнала может быть получена на высокочувствительной фотопленке, но это требует применения люминофора с голубым свечением, что ухудшает изображение с точки зрения непосредственного наблюдения. Более того, информация в виде фотоосциллограмм не может быть использована непосредственно для обработки и анализа на ЭВМ. Она должна быть преобразована ручным способом или с помощью полуавтоматических считывающих устройств (например, с при-

менением светового пера и др.) в цифровую форму, что приводит к увеличению времени обработки, особенно при большом объеме информации.

Преобразователи на ЗЭЛТ лишены указанных недостатков. С их помощью можно обрабатывать однократные сигналы наносекундной длительности с хорошим разрешением, а наличие цифрового выхода позволяет вводить информацию в ЭВМ. При необходимости форма исследуемого сигнала может быть воспроизведена на экране низкочастотного осциллографа (с полосой до 1 МГц) или телевизионного монитора, на электрохимической бумаге графических устройств и др.

Как видно из рис.11, исследуемый сигнал запускает генератор развертки записи и спустя время ее срабатывания T_3 поступает на вертикально-отклоняющие пластины ЗЭЛТ. Для полного отбора вторичных электронов, образующихся при взаимодействии первичных электронов записывающего луча с мишенью, на коллектор ЗЭЛТ подается высокое напряжение (1-3 кВ). Происходит запись исследуемого сигнала на мишени. Как уже указывалось, благодаря диэлектрическим свойствам материала мишени записанный потенциальный (зарядный) рельеф может сохраняться относительно длительное время (сотни миллисекунд и более). Для считывания записанной информации служит генератор растровой развертки (кадровой и строчной), обеспечивающей построчное перемещение электронного луча по рабочему полю мишени. В моменты пересечения считывающим лучом линии записанного потенциального рельефа происходит модуляция величины тока вторичных электронов, уходящих на коллектор, и вследствие этого - формирование считанных импульсов-отметок на сопротивлении нагрузки R_n , подключенном к сигнальному электроду трубки. Так как амплитуда импульсов-отметок составляет относительно малую величину (например, сотни микровольт), а устройства последующей обработки и преобразования информации обладают чувствительностью в единицы вольт, необходимо производить усиление указанных импульсов. Это осуществляется с помощью усилителя считывания. После временного замешивания импульсов-отметок с опорными импульсами (импульсами начала строк) информация о мгновенных значениях исследуемого сигнала U_i будет заключена во временных интервалах T_i между опорными импульсами и считанными импульсами-отметками. Текущее время с учетом коэффициента K_m будет соответствовать номерам строк считывающего растра. Указанной информации достаточно, чтобы восстановить первоначальную форму исследуемого сигнала, поступившего на вход преобразователя практически без потери информации. Алгоритм работы МВП обеспечивает устройство программного управления.



В зависимости от конкретных условий эксплуатации в состав преобразователей могут входить дополнительные устройства, осуществляющие амплитудную и временную калибровку, а также дальнейшее преобразование, запоминание, воспроизведение информации и др. (соответственно калибраторы амплитуды и времени, преобразователи "время-код", преобразователи цифрового кода, буферные ЗУ, индикаторные ЭЛТ и др.).

В рассматриваемых МВП первостепенную роль с точки зрения возможностей преобразования однократных сигналов наносекундной длительности играет ЗЭЛТ, которая в основном и определяет технические характеристики преобразователя.

4.2. Запоминающие электронно-лучевые трубки

Существующие ЗЭЛТ можно подразделить на следующие основные группы в соответствии с характером операций, выполняемых ими для преобразования входной информации в выходную:

- преобразование электрического сигнала в электрический;
- преобразование электрического сигнала в изображение;
- преобразование изображения в электрический сигнал.

Дальнейшее подразделение ЗЭЛТ можно производить по различным признакам, например по характеру физических процессов, используемых при записи, по способу считывания, типу мишеней и т.п. Такое деление ЗЭЛТ приведено в работе [4].

ЗЭЛТ, используемые в качестве быстродействующих аналоговых запоминающих устройств МВП однократных электрических сигналов микро- и наносекундной длительности, характеризуются следующими основными параметрами:

- наибольшей скоростью записи, реализуемой при считывании (не менее 10^9 линия/с или 10^3 км/с и более);
- полосой пропускания отклоняющих пластин и катодно-модуляторного узла (сотни мегагерц и более);
- временем хранения записанной информации (сотни миллисекунд);
- линейной и временной разрешающей способностью и др.

В современных быстродействующих МВП используются следующие типы ЗЭЛТ:

- с записью вторичной электронной эмиссией на отражение (толстые мишени);
- с записью вторичной эмиссией на прострел (тонкие мишени);

- с записью возбужденной проводимостью (тонкие мишени);
- с записью возбужденной проводимостью на матрицах из кремниевых диодов (тонкие мишени).

Указанные ЗЭЛТ различаются характером физических процессов, протекающих при записи и считывании. Однако общим признаком для них является преобразование входного электрического сигнала в электрический выходной сигнал путем записи и считывания электронным пучком.

В первых разработках быстродействующих МВП использовались осциллографические ЭЛТ без алюминирования экрана (например, 18Л047А) в специальном режиме накопления зарядов [2]. Это было вызвано тем, что ЗЭЛТ с видимым изображением (13ЛН2, 13ЛН5, 13ЛН8) имели относительно малые скорости записи (до 150 км/с) [34]. В сравнительно недавно разработанных ЗЭЛТ с видимым изображением (13ЛН7, 13ЛН10) достигнута скорость записи до 4000 км/с путем использования специальных приемов, таких, как перенос изображения с мишени на экран трубки [34]. Примерно такими же скоростями записи обладают ЗЭЛТ аналогичного типа, выпускаемые за рубежом [35,36].

Отечественные ЗЭЛТ С03У2, 2ЛТК6М, 2ТЗС2, 2ТЗС5 обладают скоростью записи до 20 000 км/с и полосой пропускания до 1500 МГц. Закончена разработка ЗЭЛТ "Магнолия-1". Однако эта ЗЭЛТ имеет сравнительно небольшую скорость записи (5000 км/с) и полосу пропускания до 250 МГц. Кроме того, она является однолучевой, что вызывает определенные технические трудности при разработке МВП на основе таких ЗЭЛТ (например, необходимость высоковольтной и высокочастотной коммутации электродов ЗЭЛТ для обеспечения режима "подготовка-запись-считывание").

К числу быстродействующих ЗЭЛТ, разработанных за рубежом, следует отнести трубки R6253 и R6288А фирмы "Рауланд" (США). Указанные ЗЭЛТ обладают скоростью записи до 10 000 км/с [4,11].

В настоящее время наиболее быстродействующей является ЗЭЛТ, разработанная для цифрового преобразователя R7912, выпускаемого фирмой "Тектроникс" (США). Эта трубка реализует скорость записи около 60 000 км/с и имеет полосу пропускания 2,3 ГГц [22]. Достигнутые успехи в разработке быстродействующих ЗЭЛТ являются результатом теоретических и экспериментальных исследований, проведенных советскими и зарубежными учеными с целью достижения таких скоростей записи, которые обеспечивают преобразование однократных сигналов с длительностью фронта менее 1 нс.

В данном обзоре описание принципов работы различных типов ЗЭЛТ будет дано лишь для понимания основных принципов построения МВП на их основе.

Принцип работы ЗЭЛТ с записью вторичной электронной эмиссией на отражение основан на использовании явления накопления зарядного рельефа на поверхности мишени трубки при записи и преобразования этого рельефа в электрический сигнал при считывании в результате модуляции потока вторичных электронов электрическим полем накопленных зарядов [2]. Для устранения "паразитной" модуляции, возникающей от остаточных зарядов (например, от предыдущей записи), перед записью новой информации производится подготовка мишени, которая в основном аналогична считыванию.

В качестве материала мишени используется диэлектрик, обладающий коэффициентом вторичной электронной эмиссии $b > 1$.

Толщина диэлектрика обычно составляет 5-10 мм. Поскольку энергия первичного пучка электронов до 3 кэВ, ее недостаточно, чтобы "прострелить" мишень, и основное количество вторичных электронов выходит из нее в направлении, противоположном первичному потоку, с энергией 2-5 эВ. По этой причине рассматриваемый тип ЗЭЛТ часто называют ЗЭЛТ с "толстой" мишенью со вторичной эмиссией на отражение [2].

В конструкции ЗЭЛТ, как правило, применяются два электронных прожектора соответственно для записи и считывания (подготовки). В принципе достаточно иметь один электронный прожектор, однако в этом случае возникает необходимость в коммутации сравнительно большого числа электродов трубки для обеспечения режима ее работы. Оба электронных прожектора располагают с одной стороны мишени. Коллектором вторичных электронов служит проводящее покрытие, нанесенное на внутреннюю поверхность колбы трубки. Коллектор удален от поверхности мишени на расстояние до пяти ее толщин, что дает увеличение амплитуды считанного сигнала (импульса-отметки) при прочих равных условиях [2].

В качестве сигнальной пластины для съема считанного сигнала используется покрытие из проводящего материала, наносимого на поверхность мишени со стороны, противоположной электронным прожекторам. Для возможности визуального наблюдения лучей в процессе настройки МВП "толстым" диэлектриком мишени служит плоский стеклянный диск (например, лобовое стекло ЭЛТ), на который наносят слой люминофора (ЭЛТ в режиме накопления зарядов) или сначала слой люминофора, а затем слой диэлектрика с коэффициентом $b \gg 1$ для энергии первично-

го пучка электронов 1-3 кэВ. Сигнальная пластина либо съемная, либо изготавливается из прозрачного проводящего материала.

Конструкция электронных прожекторов и отклоняющих систем секции записи ЗЭЛТ аналогична конструкции тех же узлов в широкополосной осциллографической ЭЛТ. Конструкция секции считывания ЗЭЛТ аналогична конструкции низкочастотной осциллографической ЭЛТ.

При разработке первых быстродействующих МВП наибольшее применение нашла двухлучевая осциллографическая трубка 18ЛЮ47А в специальном режиме накопления зарядов [4].

С целью получения максимальной скорости записи использовался режим работы, в котором при записи сигнала на коллектор подавалось напряжение 2500-3000 В, что обеспечивало полный отбор вторичных электронов на коллектор и вследствие этого приводило к увеличению глубины потенциального (зарядного) рельефа на мишени. При считывании на коллектор подавалось напряжение 100-200 В для уменьшения засева вторичными электронами соседних участков мишени, что обеспечивало формирование считанных импульсов-отметок минимально возможной длительности и тем самым увеличивало разрешающую способность трубки при считывании. Подготовка мишени к записи новой информации проводилась при напряжении на коллекторе, близком к нулевому. Указанный режим условно обозначается 0, +, + [2].

Энергия первичного пучка электронов при записи, считывании и подготовке равна 2000-2500 эВ.

Для съема считанных сигналов к лобовому стеклу колбы прикладывалась сигнальная пластина из медной фольги.

ЗЭЛТ обеспечивала максимальную скорость записи 5000 км/с ($7 \cdot 10^9$ линия/с) при числе строк в считывающем растре 100, амплитуде считанных сигналов 200 мкВ на нагрузке 10 кОм и отношении сигнал:шум около 5.

Дальнейшее увеличение скорости записи ограничивалось коэффициентом вторичной электронной эмиссии люминофора трубки ($\beta \approx 3$). Так как подключение источника сигнала к отклоняющим пластинам осуществлялось через цоколь трубки, полоса пропускания сигнальной системы не превышала 100 МГц.

Следует отметить, что данная трубка, используемая в другом режиме работы, когда на коллектор при подготовке подавалось напряжение -300 В, а при записи и считывании коллектор находился при нулевом потенциале (режим -, 0, 0), позволяет работать со скоростью записи 3700 км/с ($5 \cdot 10^9$ линия/с) [37].

Двухлучевая осциллографическая трубка 9ЛЮ1И в режиме 0, +, + обеспечивала максимальную скорость записи 500 км/с при числе строк в считывающем растре 500 и отношении сигнал:шум около 3. Нанесение на поверхность люминофора слоя MgO позволило при тех же условиях увеличить скорость записи в 2-3 раза [4].

Очевидно, разработка специальных ЗЭЛТ для быстродействующих МВП однократных электрических сигналов наносекундной длительности должна была существенно улучшить их основные характеристики (скорость записи, полосу пропускания и др.).

В работах [3,20] описана конструкция и приведены основные технические характеристики ЗЭЛТ 6ЛТК6М.

Трубка имеет два электронных прожектора: один для записи, другой для считывания и подготовки. Отклоняющая система записывающего луча состоит из четырех пар отклоняющих пластин: сигнальных, временных, предотклонения и калибровочных. Сигнальная отклоняющая система представляет собой отрезок ленточной линии с волновым сопротивлением 75 Ом. Основой мишени служит плоский экран, являющийся частью оболочки трубки. На внутреннюю поверхность экрана нанесен слой люминофора и затем слой диэлектрика с коэффициентом $\epsilon = 8-10$ [3]. Проводящее прозрачное покрытие на внешней поверхности экрана выполняет роль сигнальной пластины. Для отклонения считывающего луча имеются две пары пластин - кадровые и строчные. Коллектор вторичных электронов представляет собой проводящее покрытие, нанесенное на внутреннюю поверхность колбы трубки.

ЗЭЛТ используется в режиме работы 0, +, +, в котором при подготовке, записи и считывании на коллектор соответственно подается напряжение 0, 2000-3000, 50-500 В [3,20,21].

Максимальная скорость записи составляет около 20 000 км/с при амплитуде считанного сигнала 100 мкВ на нагрузке 10 кОм и числе строк в считывающем растре 100-150. Полоса пропускания сигнальной системы 0-1000 МГц, чувствительность 0,25-0,27 мм/В. Размер рабочей части мишени 100x100 мм, длина трубки 605 мм, наибольший диаметр колбы 172 мм, масса 3 кг.

Разработанная однолучевая ЗЭЛТ "Магнолия-1" обладает максимальной скоростью записи 5000 км/с (около 10^{10} линия/с) при амплитуде считанных сигналов не менее 500 мкВ на нагрузке 100 кОм и числе строк в считывающем растре 200. Полоса пропускания сигнальной отклоняющей системы 0-250 МГц, размер рабочего поля 25x35 мм. В конструкции электронного прожектора была применена система квадрупольных

линз, позволившая увеличить чувствительность сигнальных отклоняющих пластин до 0,6 мм/В. ЗЭЛТ используется в режиме 0, +, 0, в котором при подготовке, записи и считывании соответственно подается напряжение 0, 300, 0 В. Трубка имеет сравнительно небольшие размеры: длину около 300 мм, диаметр колбы 50 мм, диаметр колбы у экрана 80 мм.

В конце 60-х - начале 70-х годов авторами данной работы проводились теоретические и экспериментальные исследования с целью разработки высокоскоростной ЗЭЛТ. В ходе этих исследований определилась конструкция ЗЭЛТ, обеспечивающая наиболее оптимальное соотношение между максимальной скоростью записи, чувствительностью, полосой пропускания, разрешающей способностью и режимом работы.

Были исследованы два возможных варианта трубок, работающих по принципу вторичной электронной эмиссии на отражение: с барьерной сеткой вблизи мишени и без нее. Исследованиям подвергалось большое число макетов ЗЭЛТ, отличающихся основными конструктивными размерами и их соотношением, а также различной технологией изготовления (толщиной мишени, расстоянием до коллектора, расстоянием до барьерной сетки, прозрачностью сетки, материалом сетки и активного слоя мишени и др.). Исследования ЗЭЛТ с барьерной сеткой проводились с целью определения возможности получения более высокой разрешающей способности трубки по сравнению с ЗЭЛТ без барьерной сетки при прочих равных условиях (скорости записи, отношения сигнал:шум и др.). Как показали результаты экспериментальных исследований, существенно-го выигрыша в разрешающей способности получить не удалось. Более того, было замечено некоторое увеличение высокочастотной составляющей шума в считанном сигнале от присутствия барьерной сетки вблизи мишени. Так как существенного (в полтора раза и более) улучшения в разрешающей способности трубки получить не удалось, а конструкция узла памяти при этом усложнялась, дальнейшая разработка ее была прекращена.

Разработанная двухлучевая ЗЭЛТ без барьерной сетки С03У2 (рис.12) обеспечивает максимальную скорость записи 15 000 км/с ($0,43 \cdot 10^{11}$ линия/с) при амплитуде считанных сигналов 200 мкВ на нагрузке 10 кОм, числе строк в считывающем растре 200, отношении сигнал:шум 10 [38].

Трубка работает в режиме 0, +, +, в котором при подготовке, записи и считывании на коллектор соответственно подается напряжение 0, 2000, 150 В.

Рис.12. ЗЭЛТ С03У2



Сигнальная отклоняющая система выполнена в виде полосковой линии передачи с волновым сопротивлением 75 Ом. Чувствительность трубки обеспечивает отклонение сигнала амплитудой 100 В на все рабочее поле мишени. Полоса пропускания не менее 500 МГц.

Максимальная скорость записи ЗЭЛТ С03У2 позволяет преобразовывать однократные сигналы с длительностью фронта 1-2 нс. Увеличение полосы пропускания до 1000-1500 МГц за счет другой конструкции сигнальной системы (например, в виде коаксиальной линии) лишь привело бы к уменьшению чувствительности примерно в два раза. Следует отметить, что методы восстановления формы сигнала позволяют улучшить временную разрешающую способность системы регистрации в несколько раз. Наличие у МВП на ЗЭЛТ цифрового выхода и тем самым возможности ввода информации в ЭВМ, очевидно, упрощает задачу восстановления формы входного сигнала.

Конструкция и режим работы секции считывания обеспечивают сравнительно высокую разрешающую способность (примерно 3 линия/мм).

К числу ЗЭЛТ с записью вторичной электронной эмиссией на отражение относится трубка 2Т3С2 [3]. В ней применена коллекторная сетка между мишенью и коллектором на расстоянии 3-5 мм от рабочей поверхности мишени. По мнению авторов работы [3], это обеспечивает увеличение линейного разрешения при записи и считывании по сравнению с трубкой 2ЛТК6М, так как устраняет "засев" мишени вторичными электронами. Однако в работе [3] не приводятся полученные значения указанных параметров (исключение составляет трубка 18Л047А). Данные по максимальной скорости записи, числу строк в считывающем растре, диаметру луча записи и луча считывания и др., приведенные в работах [3, 20, 21, 24, 39, 40], в обобщенном виде представлены в табл.2. Анализ этих данных позволяет сделать вывод о том, что по основным характеристикам эти ЗЭЛТ примерно равноценны: по крайней мере судить о существенном выигрыше в разрешающей способности затруднительно.

В отличие от трубки 2ЛТК6М в трубке 2Т3С2 применена иная широкополосная проходная сигнальная система, представляющая собой коакси-

Таблица 2

Сравнительные характеристики
ЗЭЛТ 2ТЗС2 и 2ЛТК6М

Параметр ЗЭЛТ	2ТЗС2	2ЛТК6М	Источник
Диаметр луча записи $d_{лз}$ при токе луча записи 70-100 мкА, мм	0,35	-	[39]
	0,2 - 0,3	-	[40]
	< 0,35	< 0,35	[20]
	0,2 - 0,3	< 0,6	[3]
Возможный диапазон $d_{лз}$, мм	0,2 - 0,35	0,35 - 0,6	-
Диаметр луча считыва- ния $d_{лс}$ при токе луча счи- тывания 0,5-5 мкА, мм	0,12 - 0,18	-	[40]
	< 0,2	< 0,2	[20]
Возможный диапазон $d_{лс}$, мм	0,12 - 0,18	< 0,35	[3]
	0,12 - 0,2	0,2 - 0,35	-
Число строк в считы- вающем растре N_t	130 - 150	-	[39]
	200	100	[21, 24, 40]
	100 - 200	100	[20]
	100 - 200	100 - 150	[3]
Возможный диапазон N_t	100 - 200	100 - 150	-
Максимальная скорость записи $V_{макс}$ при скорости считывания 1 км/с (ампли- туда считанных сигналов ≥ 100 мкВ при нагрузке 10 кОм), км/с	$2,8 \cdot 10^{10}$ линия/с	-	[39]
	$3,3 \cdot 10^{10}$ линия/с	-	[39]
	-	$> 20 \cdot 10^3$	[21]
	$(15-20) \cdot 10^3$	-	[40]
	$(5-7) \cdot 10^{10}$ линия/с	-	[40]
	-	$> 20 \cdot 10^3$	[24]
	$20 \cdot 10^3$	$> 20 \cdot 10^3$	[20]
	$15 \cdot 10^3$ для ПСДМ	$> 20 \cdot 10^3$	[20]
	$(15-20) \cdot 10^3$	$> 20 \cdot 10^3$	[3]
	$(5-7) \cdot 10^{10}$ линия/с	-	[3]
-	$20 \cdot 10^3$ для ИНИ	[3]	
-	$20 \cdot 10^3$ для РП	[3]	
Возможный диапазон $V_{макс}$, км/с	$(15-20) \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	-
Возможный диапазон $V_{макс}$, линия/с	$(2,8-7) \cdot 10^{10}$	$(3,3-5,7) \cdot 10^{10}$	-

альную линию с волновым сопротивлением 75 Ом, к электродам которой присоединены узкие отклоняющие пластины. Полоса частот сигнальной отклоняющей системы 0-1500 МГц, чувствительность 0,14 мм/В [3, 39, 40].

Увеличение полосы частот сигнальной отклоняющей системы в 1,5 раза для трубки 2ТЗС2 по сравнению с трубкой 2ЛТК6М было бы оправдано при увеличении ее максимальной скорости записи также в 1,5 раза. Однако из рассмотрения табл. 2 видно, что по этому параметру обе ЗЭЛТ примерно равноценны. Во всяком случае без специального отбора не все трубки 2ТЗС2 имеют преимущества в скорости записи по сравнению с трубками 2ЛТК6М. Чувствительность сигнальной отклоняющей системы трубки 2ТЗС2 по сравнению с трубкой 2ЛТК6М ухудшилась в два раза.

В трубке 2ТЗС2 выбран режим работы, при котором коллектор и коллекторная сетка находятся при постоянных потенциалах соответственно 0 и -50 В, а потенциал сигнальной пластины мишени при подготовке, записи и считывании соответственно принимает значения 0, от -500 до -1000 и от -10 до -40 В. Однако этот режим по сравнению с известным режимом 0, +, + особых преимуществ не имеет. Трубка 2ТЗС2 имеет меньшие размеры и массу. Длина ее не превышает 480 мм, диаметр равен 105 мм, масса 2 кг.

Принцип работы и типичная конструкция узла памяти ЗЭЛТ с возбужденной проводимостью (рис. 13) описаны в работе [11]. Электроны считывающего пучка с энергией около 600 эВ, падающие на относительно тонкую мишень, изготовленную из сульфида цинка, вызывают вторичную электронную эмиссию. На каждый падающий первичный электрон мишень излучает примерно три вторичных электрона. Поскольку коллектор обладает более высоким потенциалом, чем мишень, то он собирает все вторичные электроны, в результате чего мишень становится более положительной. Потенциал мишени U_m продолжает расти до тех пор, пока его величина не сравняется с коллекторным потенциалом U_k , после чего излучаемые электроны возвращаются обратно на мишень. В этом режиме считывающий пучок непрерывно сканирует ее, поддерживая положительный потенциал. Записывающий пучок с энергией примерно 10 кэВ пронизывает мишень, образуя непрерывный след на ее поверхности. Когда считывающий пучок пересекает записанный след (т.е. разряженные участки мишени), коллекторный ток возрастает в три раза по сравнению с его равновесной величиной, а на сопротивлении нагрузки, подключенной к коллектору, формируется импульс-отметка. По такому принципу работают ЗЭЛТ R628A и R6253 фирмы "Рауланд".

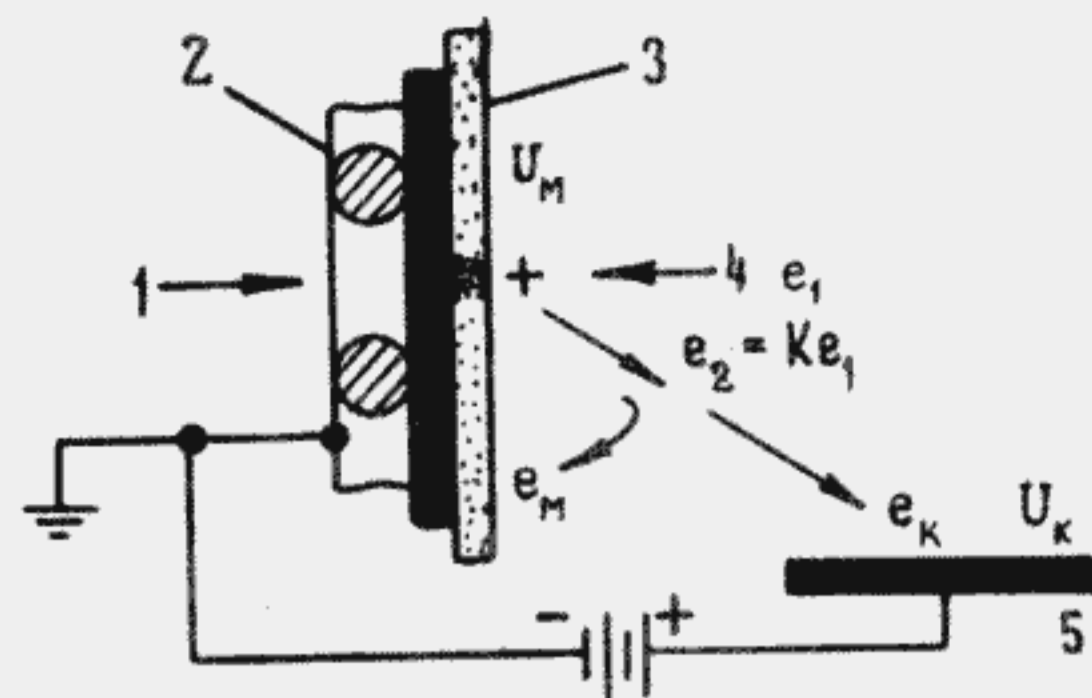


Рис. 13. Конструкция узла памяти ЗЭЛТ R6288A:

1 - записывающий луч, 10 кВ;
2 - держатель в виде никелевой сетки; 3 - мишень из сульфида цинка; 4 - считывающий луч;
5 - коллектор

По имеющимся литературным данным трудно однозначно судить о максимально реализуемой скорости записи ЗЭЛТ с возбужденной проводимостью. Так, например, для трубки R6253 приведены следующие значения максимальной скорости записи: $2 \cdot 10^5$ [41], $100 \cdot 10^3$ [42] и $10 \cdot 10^3$ км/с [4]. Аналогичная трубка R6288A была использована в цифровой системе для регистрации наносекундных процессов, в которой минимальная длительность развертки записи составляла 500 нс [11]. Можно предположить, что наиболее вероятная максимальная скорость записи таких ЗЭЛТ $(4-10) \cdot 10^3$ км/с, т.е. такая же, как у ЗЭЛТ с записью вторичной электронной эмиссией.

В настоящее время появились работы, доказывающие возможность значительного увеличения коэффициента б до 30-60 в объеме рыхлых диэлектрических пленок (например, на MgO, NaCl и др.) путем создания достаточно сильного электрического поля, ускоряющего вторичные электроны (так называемая вторичная эмиссия, усиленная полем величиной 10^5-10^6 В/см) [43,44]. Для ЗЭЛТ с возбужденной проводимостью это как бы эквивалентно увеличению первичного тока записи на порядок. Естественно было бы ожидать повышения скорости записи у таких ЗЭЛТ до $(40-100) \cdot 10^3$ км/с. Однако, поскольку конструкция узла памяти трубки такова, что толщина мишени на порядок меньше, элементарная емкость мишени возрастает также на порядок, а следовательно, время ее разряда практически не изменяется.

Лишь в тех случаях, когда величина емкости элементарного накопителя мишени увеличивается меньше, чем величина тока разряда, время перезаряда этой емкости может уменьшаться, что может привести к увеличению амплитуды считанных сигналов, т.е. к увеличению скорости записи трубки при прочих равных условиях. По этой причине можно ожидать увеличения скорости записи ЗЭЛТ с эмиссией, усиленной полем.

Это подтверждается и экспериментально на примере трубки 2ТЗС5 [3], которая обладает скоростью записи около $20 \cdot 10^3$ км/с, как и ЗЭЛТ с записью вторичной электронной эмиссией на отражение, например 2ТЗС2.

Экспериментальные исследования других ЗЭЛТ, работающих на прострел, также показали несущественное увеличение скорости записи по сравнению с ЗЭЛТ с записью вторичной электронной эмиссией на отражение. Технология изготовления тонких мишеней сравнительно сложна и существенно сказывается на основных параметрах ЗЭЛТ (например, скорости записи, длительности считанного сигнала и др.).

Существенного увеличения скорости записи ЗЭЛТ можно достичь, используя другие физические принципы работы мишени.

В последние годы за рубежом интенсивно проводятся теоретические и экспериментальные исследования в области разработки приборов с электронной бомбардировкой полупроводниковых мишеней [30]. Применительно к ЗЭЛТ перспективным в отношении повышения скорости записи является использование в ней в качестве материала мишени кремния, у которого энергия образования пары "электрон-дырка" составляет примерно 3,6 эВ. При энергии пучка электронов 12 кэВ это приводит к усилению тока в 2000 раз и более.

В работе [22] описана ЗЭЛТ типа "сигнал-сигнал" с кремниевой мишенью для исследования быстрых переходных процессов. Она имеет отдельные электронные прожекторы и отклоняющие системы для записи и считывания, расположенные по обе стороны кремниевой диодной мишени. Скорость записи составляет $2 \cdot 10^{12}$ линия/с, что обеспечивает запись синусоидального сигнала с частотой 2,4 ГГц на все рабочее поле мишени размером $9,5 \times 12,7$ мм.

Прожектор записи триодного типа имеет ускоряющий потенциал 10 кВ. Отклоняющая система состоит из двух симметричных спиральных ЛЗ типа "бегущей" волны и обеспечивает полосу пропускания 1,8-2,3 ГГц. Амплитуда сигнала 32 В отклоняет луч на полную высоту мишени. Импеданс пары линий равен 364 Ом, что позволяет согласовывать их с имеющимися широкополосными усилителями вертикального отклонения, например с усилителем 7A19 [16]. Максимальный ток луча записи 3-10 мкА при ширине луча около 25 мкм.

В трубке применена считывающая система типа FPS, в которой использована электростатическая отклоняющая система, помещенная в аксиальное магнитное поле, что обеспечило формирование низкоэнергетического (около 250 эВ) электронного луча с хорошим разрешением и минимальными шумами.