

НЕКОТОРЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕМЕНТАМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД

В.А. Дятлов
(Новосибирск)

1. В в е д е н и е

В настоящее время сформулированы требования к ЦВМ ближайшего будущего, необходимым для решения актуальных задач народного хозяйства, науки и т.д. [1,2]. Сформулированы и некоторые пути построения таких машин [1]. Эти машины должны обладать производительностью около 10^9 операций в секунду, иметь число элементов памяти не менее $10^{10} + 10^{11}$, что на несколько порядков превышает соответствующие параметры современных вычислительных машин. В связи с возникновением серьезных трудностей в создании таких машин на традиционных путях повышения скорости работы элементов, проблемой получения достаточной надежности при использовании столь большого числа элементов, предложено строить эти машины на принципах вычислительных систем и вычислительных сред [1,2,3]. Сформулированы и некоторые требования к элементам вычислительных систем, и в частности, сред [1,2,3]. К числу наиболее очевидных требований относится требование уменьшения стоимости элементов и стоимости их монтажа.

Очевидно, что при полном числе элементов среды порядка 10^{12} (включая логические элементы и соединительные элементы), их стоимость должна быть намного ниже стоимости, например, современных полупроводниковых элементов, которая достигает нескольких десятков рублей за элемент [1]. В работах Евреинова Э.В. и Косарева Ю.Г. [1,2] показано, что при использовании принципов предельного распараллеливания операций более высокую производительность машины можно получить при уменьшении частоты работы элементов, таким образом показано, что элементы вычислительных сред не должны быть быстродействующими. Это положение открывает большие возможности в использовании новых, более эффективных физических принципов с точки зрения всей совокупности требований, ранее не представлявших большого интереса при стремлении использования быстрых процессов. В указанных работах [1,2] четко сформулированы требования к функциям и структуре элементов вычислительных сред.

Однако, так как еще не производилось систематического рассмотрения физических процессов в средах указанной производительности, остаются недостаточно ясными энергетические требования к элементам, требования к коммутационным компонентам элементов сред - триконам [1], недостаточно рассмотрены сравнительные характеристики линий связи, которые в средах могут быть, как следует из работ [1,2,3], по крайней мере, двух видов: пассивными и активными. В связи с последним, необходимо уточнение некоторых требований к временным характеристикам элементов, например, к временным задержкам на элементах сред, выполняющих роль логических элементов, к тактовой частоте и т.п. В средах, состоящих из очень большого числа элементов, могут возникнуть определенные осложнения, связанные с системой питания. Поэтому возникает необходимость рассмотрения требуемых параметров элементов сред, обеспечивающих нормальное функционирование этой системы*).

х) На возможные затруднения в системе питания для машин из микроэлементов указал впервые, по-видимому, Крейн [4].

Особый интерес представляет точная формулировка требований к элементам сред по надежности и разбросу параметров. Эти вопросы, как показывает специальное рассмотрение [5, 6, 7] связаны и с некоторыми физическими процессами в средах. Тем не менее, в первом приближении, требования к физическим параметрам элементов сред можно рассмотреть отдельно от требований к их параметрам по надежности и разбросу параметров.

В связи с перспективностью многих физических явлений для построения элементов сред и, соответственно, большим числом их разновидностей, возникают большие трудности в формулировке требований на параметры каждого из элементов в отдельности. В этой связи предлагается следующая схема рассмотрения требований к физическим параметрам элементов сред:

1. Выделяются основные физические параметры элементов сред, которые не зависят от используемого физического принципа. Такое выделение можно сделать, во всяком случае, для определенного наиболее перспективного класса элементов.

2. По значениям основных параметров среды определяются необходимые значения указанных параметров элементов.

3. Требуемые параметры элементов сравниваются с параметрами современных элементов.

В настоящей работе будет сделана попытка выделения указанных, независимых от физических принципов, параметров элементов. Следует заметить, что аналогичный подход сделан применительно к оценке качества элементов в работе Джироколетто [8]. Однако в этой работе свойства элементов не связываются с требуемыми параметрами машины в целом, что представляется при настоящем рассмотрении важным.

Безусловно, главным требованием к любым элементам высокопроизводительных сред является требование значительного **уменьшения стоимости** технологического процесса их изготовления по сравнению со стоимостью процессов изготовления элементов ЦВМ, применяемых в настоящее время. При этом должны учитываться и дополнительные затраты, связанные, например, с соответствующими источниками питания, системами и устройствами охлаждения и т.д. Поэтому при удовлетворении необходимых требований на параметры элементов необходимо произвести их сравнение по возможным технологическим и техническим затратам на создание соответствующих машин. В настоящее время

этот вопрос наиболее трудный, так как в области технологии еще не накоплено достаточно достоверных и определенных данных прежде всего в связи с тем, что многие перспективные технологические процессы еще недостаточно изучены и находятся в развитии (особенно это относится к пленочной электронике) [9]. Тем не менее, выбор элементов только по требуемым физическим параметрам позволит сконцентрировать внимание на ограниченном числе элементов, что позволит конкретизировать и технологические исследования.

II. ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД

В средах элементы могут быть совершенно одинаковыми и одинаково соединенными между собой, однако они должны выполнять как функции элементов обычных ЦВМ, а именно либо функцию логического элемента, либо элемента памяти, так и дополнительные функции соединительного элемента. Вся совокупность функций элемента среды может быть получена путем применения в одном комплексе следующих компонент: 1. логического элемента, реализующего полную систему функций алгебры логики (например, стрелку Дирса или штрих Шеффера), осуществляющего задержку сигналов. 2. Ряд коммутационных элементов - триконов, - в совокупности реализующих полную систему функций соединений с другими элементами среды (например, крест с точкой, крест без точки, пустое место [1]), обладающих возможностью настройки на выполнение указанных функций. Триконы могут представлять собой двухполюсники, сопротивления которых должны по настроечным командам принимать два значения, сильно отличающиеся друг от друга [1,2]. Элемент памяти на среде может быть построен путем создания из двух соседних элементов среды триггера или же путем применения в составе каждого элемента среды третьей компоненты, выполняющей роль элемента памяти, при соответствующем соединении и настройке триконов [1]. В частности, в работах Мишина А.И. [10], Бандман О.Л. [11] и др. [3] показано, что некоторые из указанных функций могут быть совмещены в какой-либо одной из компонент элемента среды, что сильно упрощает общую его структуру.

После соответствующей настройки элементов среды на ней строится схема определенной ЦВМ или системы ЦВМ[1]. Таким образом, после настройки часть элементов среды выполняет функции логических элементов или элементов памяти, часть элементов среды, соединенных последовательно в виде цепочек, выполняет роль каналов связи, часть элементов создает области, в которых не производится выполнение никаких функций. В этой связи можно и рассмотреть следующие группы физических параметров элемента среды:

а) Параметры элемента среды как логического элемента или элемента памяти.

б) Параметры элемента среды как элемента канала связи.

в) Паразитные параметры элемента среды, находящегося в отключенном состоянии (относящиеся как к логическим элементам и элементам памяти, так и к элементам каналов связи).

г) Параметры элемента среды относительно системы питания.

Выделенные группы параметров относятся к электрическим и временным — это, в конечном итоге, импедансы, напряжения, токи, постоянные времени, частоты. Естественно, что наряду с указанными параметрами необходимо рассмотреть и некоторые их общефизические параметры, среди которых особо выделим следующие:

д) Эффективные коэффициенты теплопроводности и теплоемкости элементов среды.

е) Допустимое изменение температуры элементов.

Рассмотрим каждую из групп параметров элемента среды более подробно.

А. Параметры элемента среды как логического элемента или элемента памяти

Среди этих параметров выделим следующие:

ΔW — энергия, необходимая на одно переключение элемента,

P — мощность, расходуемая постоянно при включенном питании,

f_{\max} — Максимально возможная частота работы элемента.

\bar{V} — объем тепловыделяющей части логического элемента или элемента памяти.

τ_p — временная задержка элемента.

При указанном выше выделении параметров логического элемента средняя мощность, выделяемая элементом, определится согласно выражению:

$$P_{\text{ср}} = \Delta W f + P, \quad (I)$$

где f - средняя частота работы элемента среды, которая будет определена позже. Эта частота, конечно, удовлетворяет условию $f < f_{\text{max}}$, однако она не может считаться в качестве параметр элемента.

Сделанное выше определение параметров логического элемента и элемента памяти требует пояснений.

За последние 10-15 лет сделано исключительно большое число предложений создания элементов ЦВМ на самых разнообразных физических принципах и по самым разнообразным техническим решениям. Достаточно указать на хорошо известные элементы ЦВМ на параметронах [12,13], на туннельных диодах [14], на транзисторах [15,16], на элементы на основе ферритовых и пермалловых сердечников типа феррит-диодных и феррит-транзисторных [17], чтобы представить все разнообразие применявшихся и применяемых принципов и подходов как по различию процессов в самих элементах, так и по различию их энергетических и временных характеристик, существенно определяемых и разнообразием соответствующих систем питания. Очевидно, что сделанное выделение основных параметров элементов не может характеризовать все многообразие возможных элементов. Однако за последнее время из всех элементов определенно выделилась некоторая группа элементов ЦВМ, отличающаяся повышенной экономичностью, что произошло, по-видимому, в связи с тем, что если в первое время развития вычислительной техники главное внимание уделялось повышению быстродействия элементов, то в последнее время большее внимание уделяется всей совокупности требований к элементам и особенно их экономичности. Принципы построения таких элементов, в общем, одинаковы и они могут быть проиллюстрированы на примерах элементов на основе полевых транзисторов и электростатических реле. На полевых транзисторах, как известно [15, 18,19] может быть построена схема, состоящая из двух последовательно включенных по цепям исток-сток транзисторов, один из которых p -типа, другой n -типа (рис.1а). Совершенно аналогичная схема может быть построена на основе двух одинаковых электростатических

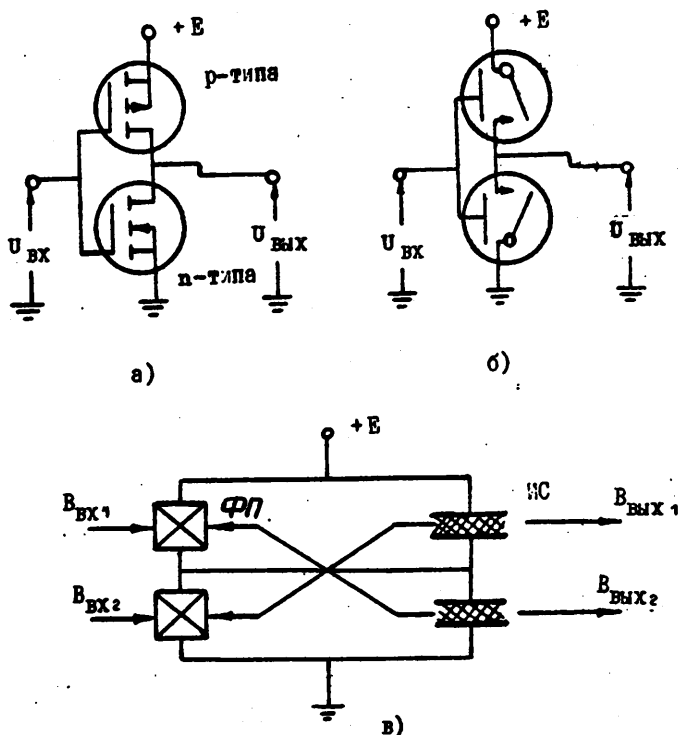


Рис. I.

- а) Схема на двух полевых транзисторах со взаимно дополняющими типами проводимости.
- б) Схема на двух одинаковых электростатических реле, позволяющая исключить балластное сопротивление.
- в) Схема оптоэлектрического элемента, построенная на основе принципа взаимно дополняющих элементов с двумя входами и двумя световыми выходами: ФП - приемник; ИС - источник света; В - световой сигнал.

реле [20]. Схема логического элемента с дополнительными элементами на основе двух электролюминисцентных конденсаторов и двух фотосопротивлений с двумя световыми входами и двумя выходами изображена на рис 1в.

Описанные выше схемы с так называемыми "дополнительными элементами" на несколько порядков экономичнее схем на таких же элементах с балластными сопротивлениями. В элементах на основе использования принципа дополнительности прежде всего снижается величина постоянной мощности p , что приводит к относительному возрастанию роли мощности ΔW_f .

Для схем с дополнительными элементами характерно то, что они, как правило, являются потенциальными. Потенциальные схемы на транзисторах в настоящее время находят наибольшее применение [16]. В этих схемах временной характеристикой элемента является величина τ , —задержка на элементе между поступлением и выходом сигнала. Указанный подход остается, в некотором смысле, справедливым и для всех потенциальных элементов и, в частности, для элементов на транзисторах, в которых, однако, величиной ΔW_f пренебрегают [8, 15].

Особо следует подчеркнуть полную применимость сделанного подхода и для элементов на основе криотронов [11, 21.]

В связи с тем, что построение ЦВМ на основе принципов сред особо необходимо при применении очень большого числа элементов, где вопросы экономичности элементов будут еще более актуальны, чем в настоящее время, выделение только класса наиболее экономичных элементов становится оправданным.

Б. Параметры элемента среды как элемента канала связи

Уже упоминалось, что в ряде работ [1, 2, 3] было показано, что каналы связи в средах могут быть пассивными и активными. Пассивные каналы связи образуются при применении элементов сред, которые при настройке образуют цепную двухпроводную линию. Активные каналы связи образуются при настройке элементов сред на функции усилителей-формирователей с одним входом и одним выходом, включаемых в определенной цепочке последовательно. Свойства этих каналов связи существенно различны и поэтому они должны быть рассмотрены по отдельности.

I. Свойства пассивных каналов связи определяются RLCC параметрами цепочечной линии, числом элементов цепочки, импедансами в начале и конце линии. При рассмотрении схем логических элементов с дополнительными элементами в начале и конце цепочки задача упрощается, так как в этом случае внутренних импеданс источника в начале линии можно считать равным нулю, а импеданс на конце линии — равным бесконечности, и считать, что в начале линии напряжение источника прикладывается скачком.

Остановимся на одном частном решении возникающей задачи при условии, что линия состоит из достаточно большого числа цепочечных элементов и её можно считать распределенной и при условии пренебрежения величинами G и L . Процесс изменения напряжения в такой линии описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = a^2 \frac{\partial u}{\partial t}, \quad (2)$$

где

$$a^2 = R_0 C_0, \quad R_0 = \frac{R}{L_{эф}}, \quad C_0 = \frac{C}{L_{эф}},$$

$L_{эф}$ — эффективная длина элемента среды вдоль распространения сигнала при следующих граничных условиях:

$$x = 0, \quad u = u_0; \quad x = lL_{эф}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} = 0,$$

где l — число элементов в цепочке. И при следующих начальных условиях: $t = 0$, $u = 0$ при $0 < x \leq lL_{эф}$, и при $x = 0$, $u = u_0$.

Решение поставленной задачи имеет вид:

$$u = u_0 - \frac{4u_0}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} e^{-\frac{\lambda_n^2 t}{a^2}} \sin \lambda_n x, \quad (3)$$

где

$$\lambda_n = \frac{(2n+1)\pi}{2L_{эф}}.$$

Согласно (3), напряжение на конце линии изменяется так:

$$u = u_0 \left(1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{2n+1} \cdot e^{-\frac{t\pi^2}{1^2\tau} \left[\frac{2n+1}{2} \right]^2} \right), \quad (4)$$

где

$$\tau_n = RC.$$

Анализ выражения (4) показывает, что при величине

$$\frac{\pi^2 t}{1^2 \tau_n} > 4,$$

первый член ряда значительно больше остатка ряда и уже в районе этого значения напряжение изменяется экспоненциально, а при значении времени

$$\Delta t = 1,02 1^2 \tau_n, \quad (5)$$

напряжение на конце линии достигает 90% напряжения в начале линии. Величину Δt , определяемую согласно (5), можно считать задержкой в линии, состоящей из 1 последовательно включенных элементов, каждый из которых характеризуется постоянной времени τ_n .

Теперь рассмотрим задачу при учете всех четырех параметров R, L, C, G для бесконечно длинной линии, считая её также распределенной. Согласно Смирнову В.И. [22], общее решение такой задачи имеет вид:

$$\begin{aligned} u = & \frac{1}{2} e^{-\mu x} \{ \Phi(x - v_c t) + \Psi(x + v_c t) + \\ & + \frac{4}{v_c} \int_{x-v_c t}^{x+v_c t} [\mu \Phi(\alpha) + \Psi(\alpha)] \cdot I \cdot \left(\frac{c}{v_c} \sqrt{v_c^2 t^2 - (\alpha - x)^2} \right) \cdot d\alpha \quad (6) \\ & + \frac{ct}{2} \int_{x-v_c t}^{x+v_c t} \frac{1}{\sqrt{v_c^2 t^2 - (\alpha - x)^2}} I' \cdot \left(\frac{c}{v_c} \sqrt{v_c^2 t^2 - (\alpha - x)^2} \right) \Phi(\alpha) \cdot d\alpha \}, \end{aligned}$$

где

$$v_c = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}, \quad L_0 = \frac{L}{L_{\text{эф}}}, \quad G_0 = \frac{G}{L_{\text{эф}}}, \quad \mu = \frac{L_0 G_0 + R_0 C_0}{2 L_0 C_0},$$

$$\rho = \frac{|L_0 G_0 - R_0 C_0|}{2 L_0 C_0}; \quad \Phi(x) = u|_{t=0}, \quad \Psi(x) = \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{t=0}$$

Формула (6) отражает одновременно как волновой, так и диффузионный характер распространения сигнала в линии. Однако сразу следует обратить внимание на тот факт, что такие линии, в которых существенны волновые процессы, совершенно невозможно согласовать на концах по величинам волновых сопротивлений при использовании экономичных элементов с высокими входными сопротивлениями. Простейшие оценки показывают, что величины возможных волновых сопротивлений линий связи на много порядков должны быть меньше возможных значений входных сопротивлений элементов на концах. Поэтому остается единственная возможность согласования линии связи - путем устранения в ней волновых процессов. Так как первый член формулы (6):

$$e^{-\mu t} \{ \Phi(x - v_0 t) + \Phi(x + v_0 t) \}$$

отражает волновую составляющую, то указанную возможность устранения волновых процессов можно реализовать при следующем условии:

$$\mu t > 1, \quad (7)$$

где

$$t = \frac{1L}{v_0}, \quad (8)$$

время распространения сигнала на возможной длине линии связи (состоящей из 1 элементов). Кроме этого условия, на параметры линии связи надо наложить условие, обеспечивающее малое отличие напряжения в начале и конце линии после прекращения переходных процессов. Это условие, очевидно, налагается только на параметры R и G, и для цепочки, состоящей из 1 элементов, может быть сформулировано так [23]:

$$\sqrt{RG} \cdot 1 < 1. \quad (9)$$

Легко установить, что применение условий (8) и (9) одновременно приводит к справедливости определения величины времени задержки в линии согласно (5).

Условия на параметры Δt , τ_n и G удобно выразить следующими уравнениями и неравенствами:

1. Задержка в пассивном канале связи определяется формулой (5).

2. Условие "диффузионного" распространения сигнала, соглас-

но (7) и (8):

$$\tau_n \geq \frac{I_n \varphi}{V_c} \quad (10)$$

3. Условие прохождения сигнала по цепочке "длиною" l , согласно (9):

$$G < \frac{1}{Rl^2} \quad (11)$$

Для токовых элементов, например, криотронов, в связи с дуальностью соответствующей задачи можно выделить те же параметры элемента среды, только надо считать $\tau_n = lG$.

Величины G в криотронных схемах надо подбирать в ряде случаев искусственно, соответственно (10) и (11).

2. Свойства длинных цепочек: активно-ограничительных элементов постоянно привлекали внимание [2,4,25]. Несмотря на сложность соответствующих задач, в первом приближении время задержки в такой линии выражается просто:

$$\Delta t = \tau_A l, \quad (12)$$

где τ_A — некоторое эффективное время задержки на одном из элементов цепочки. Последней формулой и выражаются основные параметры активного канала связи из элементов среды.

В. Паразитные параметры элемента среды

Паразитные параметры элементов среды в пассивных каналах связи, как уже указывалось выше, могут быть учтены соответствующим подбором величины G . Ограничения величин этих параметров определяются неравенством (11). Паразитные параметры в элементах среды выполняющих роль логических элементов, элементов активных каналов связи и т.д. требуют специального рассмотрения в каждом конкретном случае.

Г. Параметры элементов среды относительно системы питания

Рассмотрим эти параметры только для случая элементов, питаемых от источников постоянного напряжения (элементы на полевых транзисторах и обычных транзисторах, элементы на электростатическом реле, некоторые оптоэлектронные элементы на ос-

нове электролюминесценции и т.п.).

Системы питания на основе источников напряжения позволяют достичь высокой степени надежности благодаря применению двух сеток разноименно заряженных проводников, когда большое число обрывов в сетках может не привести к отключению питания элементов. В этой связи рассмотрим две модели системы питания, в виде двух близко расположенных плоских сеток (рис. 2) и в виде двух расположенных одна в другой объемных сеток (рис.2б).

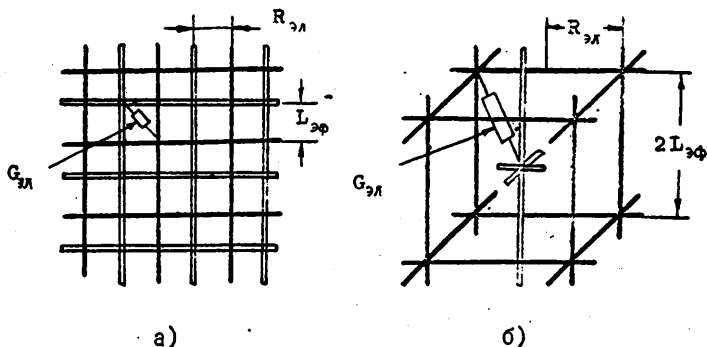


Рис.2.

- а) Система питания элементов среды в виде двух близко расположенных сеток.
- б) Система питания в виде двух объемных сеток, расположенных одна в другой.

$G_{эл}$ - эквивалентная проводимость элемента среды. $R_{эл}$ - сопротивление проводников сеток на длине $L_{эф}$.

Основными параметрами элементов среды относительно системы питания при принятых моделях будут: $G_{эл}$ - эквивалентная проводимость элемента среды по питанию и $R_{эл}$ - сопротивление проводников сеток на длине $L_{эф}$.

Величины эквивалентных проводимостей элементов среды могут быть определены для элементов, выполняющих роль логических элементов, элементов памяти и активных каналов связи,

согласно выражению:

$$G_{\Sigma A} = \frac{\Delta W_T + P_A}{u^2}, \quad (I3)$$

для элементов, выполняющих роль элементов пассивных каналов связи, и для отключенных элементов - согласно выражению:

$$G_{\Sigma П} = \frac{P_{\Pi}}{u^2}, \quad (I4)$$

где P_A - постоянно выделяемая мощность в элементе, выполняющем активные функции, P_{Π} - постоянно выделяемая мощность в элементе, выполняющем пассивные функции, u - напряжение питания каждого данного элемента.

Следует заметить, что для многих элементов сред надо учитывать мощность P_{Π} и в отключенном состоянии, так как необходимые функции многих триконов могут быть выполнены только под напряжением (электростатические реле, полупроводниковые транзисторы и элементы с В и N характеристиками и т.д.).

III. ПАРАМЕТРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД

Основные параметры среды высокой производительности следующие [I] :

P - средняя производительность - число элементарных логических, арифметических и др. операций, выполняемых в единицу времени;

M - число параллельно работающих устройств или элементарных машин в среде;

f_T - тактовая частота устройств среды, работающих синхронно;

f - средняя частота выполнения операций, которая отражает асинхронную работу некоторых устройств среды и, в частности, устройств памяти (будет определена в конце пункта III);

N - общее число элементов среды;

N_1 - число элементов среды, выполняющих функции логических элементов и элементов памяти;

N_2 - число элементов среды, выполняющих соединительные функции - элементы каналов связи, отключенные элементы и т.п.

Причем:

$$N = N_1 + N_2. \quad (15)$$

В работе Евреянова Э.В. [2] сделана оценка наибольшего числа необходимых соединительных элементов, согласно которой:

$$N_2 = N \left(1 - \frac{1}{\log_2 N} \right). \quad (16)$$

Приведенные основные параметры вычислительных сред удобны при рассмотрении процессов решения различных задач. Однако при рассмотрении физических процессов в средах основной параметр P теряет свою конкретность. Действительно, отдельные операции могут иметь разную сложность, например, операция сложения с одной стороны, и операция умножения двух чисел с другой стороны и т.д.

Поэтому вместо величины P введем следующую величину:

Π — среднее число переключений элементов сред в секунду по всей среде.

Величину Π можно, например, определить так: если Z — общее число переключений элементов за время решения задачи, а T — общее время решения задачи, то:

$$\Pi = Z/T.$$

Можно предположить, что

$$\Pi = \alpha P. \quad (17)$$

где, очевидно, $\alpha > 1$.

В качестве дополнительных параметров среды введем еще следующие:

N_A — число элементов среды, включая логические, памяти, а также элементы каналов связи при активных связях;

N_{Π} — остальные элементы среды,

Очевидно, что для сред с пассивными связями

$$N_A = N_1, \quad N_{\Pi} = N_2,$$

а для сред с активными связями $N_A > N_1$. Введем также величины:

$$v_A = \frac{N_A}{N} \quad \text{и} \quad v_{\Pi} = \frac{N_{\Pi}}{N}, \quad (v_A + v_{\Pi} = 1).$$

V - полный объем среды,

l_m - число элементов в канале связи на максимальном пути распространения сигнала;

$n = \frac{N}{M}$ - число элементов в одном параллельно работающем устройстве.

Величину l_m можно связать с величиной n следующими соотношениями:

$$l_m \cong n^{\sqrt[3]{3}},$$

для объемного расположения элементов сред в устройстве,

$$l_m \cong n^{\frac{1}{2}},$$

для расположения элементов сред в устройстве на плоскости.

В общем случае:

$$l_m = n^a, \quad (18)$$

где

$$a = \frac{1}{3}, \frac{1}{2}.$$

Наконец, один из основных параметров среды - средняя частота определяется так:

$$f = \frac{\Pi}{N_A} = \frac{\Pi}{V_A N}. \quad (19)$$

IV. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ. ТРЕБУЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ДЛЯ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ С ОСНОВНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ: $P = 10^9$ опер/сек, ЧИСЛО ЭЛЕМЕНТОВ ПАМЯТИ $10^{10} - 10^{11}$

При заданных параметрах среды, а также размерах элементов среды, основные ограничения их параметров будут определяться следующими факторами:

а) Допустимым перегревом элементов среды, находящихся во внутренних областях среды, по сравнению с элементами, находящимися во внешних областях.

б) Допустимым временем распространения сигналов в максимально длинных связях.

в) Допустимыми значениями параметров элементов среды по системе питания.

Рассмотрим каждое из этих ограничений в отдельности.

А. Ограничения на параметры элементов среды, определяемые допустимым перегревом

Задачи по определению перегрева элементов ставились и решались в целом ряде работ [26,27,28]. Однако в этих работах устанавливались только зависимости числа элементов машины, средней мощности, выделяемой одним элементом, некоторых параметров типа плотности упаковки и т.п. от величины допустимого перегрева, и эти параметры не связывались с основным параметром любой вычислительной машины — производительностью. В настоящем рассмотрении связь параметров элементов среды с производительностью среды (величиной Π) считается основной.

Будем предполагать, как обычно принимается при аналогичных рассмотрениях [26], что среда имеет форму шара.

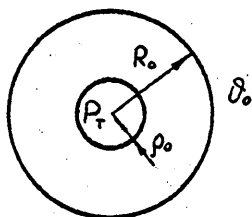


Рис. 3. Два совмещенных центрами шара. Тепловые источники расположены во внутреннем шаре. На поверхности внешнего шара температура одинаковая θ_0 .

Рассмотрим вначале следующую задачу. На поверхности шара радиуса R_0 задана некоторая температура. Тепло выделяется только в шаре радиуса ρ_0 , расположенного внутри шара радиуса R_0 , причем центры шаров совпадают (рис.3). Пусть P_T — мощность, выделяющаяся в единице объема шара радиуса ρ_0 . Перепад температуры между поверхностью шара радиуса R_0 и центрами шаров $\Delta\theta$ в этом случае определяется выражением:

$$\Delta\theta = \frac{R_T}{k} \left(\frac{\rho_0^2}{2} - \frac{\rho_0^3}{3R_0} \right), \quad (20)$$

где k — эффективный коэффициент теплопроводности среды.

В среде тепловые источники должны быть распределены весьма неравномерно, так как на каждый активный элемент будет приходится довольно большое число пассивных элементов. По —

этому надо выделить перегрев, определяемый всей совокупностью элементов, и локальный перегрев, определяемый отдельным, наиболее напряженным в тепловом отношении элементом, рассматривая его положение в центре шара. С этой целью определим величины:

$P_{\text{тср}} = P_{\text{эср}} \frac{N}{V}$ - средняя мощность, выделяемая в единице объема всей среды, где $P_{\text{эср}}$ - средняя мощность, выделяемая одним элементом среды, и

$P_{\text{тлок}} = \frac{\Delta W_{\text{т}} + P_{\text{А}}}{V}$ - локальная мощность, выделяемая в единице объема наиболее тепловыделяющей части элемента среды, находящегося в активном состоянии и работающего с максимальной частотой (например, тактовой). Средняя мощность, выделяемая одним элементом среды, может быть определена следующим выражением:

$$P_{\text{эср}} = v_{\text{А}} (\Delta W_{\text{т}} + P_{\text{А}}) + v_{\text{П}} P_{\text{П}}.$$

и так как, в свою очередь, согласно (21), $\tau = \frac{\Pi}{v_{\text{А}} N}$, то:

$$P_{\text{эср}} = \Delta W \frac{\Pi}{N} + v_{\text{А}} P_{\text{А}} + v_{\text{П}} P_{\text{П}}. \quad (21)$$

Перегрев указанной тепловыделяющей области будет складываться из двух составляющих, определяемых величинами $P_{\text{тср}}$ и $P_{\text{тлок}}$. Согласно (20), принимая коэффициент теплопроводности k одинаковым для всей среды и для выделенной локальной области и пренебрегая величиной ρ_0 , определяющей размеры локальной области, по сравнению с величиной R_0 , для суммарного перегрева можно получить следующее выражение:

$$\Delta \theta = \frac{1}{k} \left(P_{\text{тср}} \frac{R_0^2}{6} + P_{\text{тлок}} \frac{\rho_0^2}{2} \right). \quad (22)$$

Подставляя в (22) выражения для $P_{\text{тср}}$, $P_{\text{тлок}}$, получим следующее выражение для суммарного перегрева:

$$\Delta \theta = 0,0645 \frac{1}{k} \left(\Delta W \frac{\Pi}{N} + P \right) \frac{N}{V \sqrt{3}} + \Delta \theta_{\text{лок}}, \quad (23)$$

где

$$P = v_{\Delta} P_{\Delta} + v_{\Pi} P_{\Pi} \quad (24)$$

$$\Delta\theta_{\text{лок}} = 0,194 \gamma \frac{W_{\Sigma \text{max}} + P_{\Delta}}{k \sqrt{V}}.$$

Коэффициентом γ можно уточнить определение величины $\Delta\theta_{\text{лок}}$ в связи с возможными отличиями коэффициента теплопроводности локальной области от величины этого коэффициента для всей среды и отличиями формы этой области от формы шара. Следует особо подчеркнуть два интересных свойства формулы (28). Во-первых, она почти не зависит от деления элементов на активные и пассивные (v_{Δ} , v_{Π}), так как при $P_{\Delta} \approx P_{\Pi}$, $P = P_{\Delta} = P_{\Pi}$.

Во-вторых, величина $\Delta\theta$ не зависит от параметров среды и может быть определена как еще один параметр элемента среды. Эти свойства, особенно первое, весьма важны, так как в процессе решения различных задач на среде деление на активные и пассивные элементы может сильно изменяться. Считая, что перегрев не должен превышать некоторой заданной величины: $\Delta\theta \leq \Delta\theta_{\text{max}}$, после ряда несложных преобразований из (28) можно получить следующее неравенство:

$$\Pi \leq A \cdot N^{1/3} - B \cdot N, \quad (25)$$

где

$$A = \frac{1-c}{a} n_0^{-1/3}, \quad B = \frac{b}{a},$$

$$c = \frac{\Delta\theta_{\text{лок}}}{\Delta\theta_{\text{max}}}, \quad a = 0,0645 \Delta W_0, \quad b = 0,0645 P_0,$$

$$\Delta W_0 = \frac{\Delta W}{k \Delta\theta_{\text{max}}}, \quad P_0 = \frac{P}{k \Delta\theta_{\text{max}}};$$

$n_0 = \frac{N}{V}$ - число элементов среды в единице объема.

Из рассмотрения неравенства (25) следует, что допустимые значения величины Π имеют максимум при некотором значении общего числа элементов:

$$N_{\text{opt}} = \frac{19,3}{n_0^{1/3} \cdot P_0^{1/2}}. \quad (26)$$

Эти значения определяются неравенством:

$$\Pi_{\text{opt}} \leq \frac{23,3}{n_0^{\frac{1}{2}} \cdot \Delta W_0 \cdot p_0^{\frac{1}{2}}} \quad (27)$$

(при определении максимума для простоты величина ϕ положена равной нулю).

Так как выбор величины N согласно (26) соответствует наилучшему использованию среды, то значение $N = N_{\text{opt}}$ и следует в дальнейшем брать за основу. При заданных Π и N , согласно (26) и (27), можно определить необходимые энергетические параметры элементов, соответствующие оптимальному использованию среды

$$p_0 \leq \frac{7,2 L_{\text{эф}}}{N^{\frac{2}{3}}}, \quad (28)$$

$$\Delta W_0 \leq \frac{5,3 N^{\frac{1}{3}} L_{\text{эф}}}{\Pi}, \quad (29)$$

где $L_{\text{эф}} = n_0^{-1/3}$ — эффективный размер элемента среды.

Б. Ограничения на параметры элементов среды по допустимому времени распространения сигнала в максимально длинных связях. Ограничение на максимальную частоту по заданной производительности.

Обычно, вопросы функционирования ЦВМ, в том числе и сред, рассматриваются при условии, что время задержки в линиях связи мало по сравнению со временем задержки на элементах [1,2] Это условие в принятых здесь обозначениях для случая пассивных связей, согласно (6), полагая $l = l_n$, будет иметь вид:

$$\Delta t = 1,02 l_n^2 \tau_{\Pi} < \tau_{\Sigma} \quad (30)$$

Используя для максимальной частоты, за которую примем тактовую f_T , неравенство вида [18]:

$$f_T < \frac{1}{2 \tau_2} ,$$

согласно (30) и выражению для l_m (28), для пассивных связей получим следующее неравенство:

$$f_T < \frac{1}{2 \tau_{II} n^2 a} . \quad (31)$$

Для активных связей, при применении в качестве логических элементов таких же элементов, как и в канале связи, условие, аналогичное (30), уже выполнить невозможно. Необходимое условие в данном случае можно сформулировать, исходя из требования совпадения сигналов при любых длинах связей, не превосходящих "длины" l_m [1, 28]. Это условие налагается на величину f_T , τ_A согласно (12), имеет вид:

$$\Delta t_{\max} = \tau_A l_m < \frac{1}{2 f_T} ,$$

откуда, используя выражение для l_m (18), получим следующее условие для активных связей:

$$f_T < \frac{1}{2 \tau_A n^a} \quad (32)$$

Оба условия (31) и (32) для пассивных и активных связей могут быть представлены в виде одного неравенства следующего вида:

$$f_T < \frac{1}{2 \tau_b n^{ab}} , \quad (33)$$

которое при $b=1$, считая $\tau_1 = \tau_A$, представляет условие (32) для активных связей, и при $b=2$, считая $\tau_2 = \tau_{II}$, представляет условие (31) для пассивных связей.

С другой стороны, согласно (19), относительно частоты f_T

можно ввести также такое неравенство:

$$f_T > \frac{\Pi}{v_A N} , \quad (34)$$

так, как, очевидно, что $f_T > f$.

Таким образом, на тактовую частоту f_T накладываются следующие условия:

$$\frac{\Pi}{v_A N} < f_T < \frac{1}{2 \tau_b n^{ab}} , \quad (35)$$

определяемые, с одной стороны, заданной производительно - стью Π , с другой стороны, заданными ограничениями на длительность распространения сигнала в связях.

В. Ограничения на параметры элементов сред по системе питания

Так как проводимости $G_{элА}$ и $G_{элП}$ в системе пи - тания включаются параллельно, то можно произвести опреде - ление усредненной проводимости по активным и пассивным элемен - там среды так:

$$NG_{эл} = Nv_A G_{элА} + Nv_{П} G_{элП} ,$$

что, согласно (I3) и (I4), дает следующее выражение:

$$G_{эл} = \frac{1}{u^2} (v_A \Delta W f + v_A P_A + v_{П} P_{П}) ,$$

которое, с учетом (I9), принимает вид:

$$G_{эл} = \frac{\Delta W \frac{\Pi}{N} + p}{u^2} \quad (36)$$

где, как и раньше, $p = v_A P_A + v_{П} P_{П}$.

Таким образом, величина $G_{эл}$, согласно вышесказан - ному, несущественно зависит от деления элементов на активные (v_A) и пассивные ($v_{П}$).

При заданных значениях $R_{\text{эл}}$ и $G_{\text{эл}}$ и при определенных модулях системы питания могут быть рассчитаны изменения напряжения u по среде при заданных напряжениях на её периферии.

I. Для объемной модели системы питания среды (рис.26), в предположении, что размеры ячеек сеток значительно меньше, размеров среды, уравнения для токов и напряжений между соседними узлами будут иметь вид:

$$\begin{aligned} L_{\text{эф}} \operatorname{div} \vec{I} + 4G_{\text{эл}} u &= 0, \\ L_{\text{эф}} \operatorname{grad} u + R_{\text{эл}} \vec{I} &= 0. \end{aligned} \quad (37)$$

Относительно напряжения u эти уравнения приводятся к уравнению Гельмгольца вида:

$$\Delta u - \frac{4}{L_{\text{эф}}} R_{\text{эл}} G_{\text{эл}} u = 0. \quad (38)$$

Это уравнение необходимо решать при граничном условии $R = R_0$, $u = u_0$. Решение уравнения (38) относительно δu — изменения напряжения от периферии до центра шара для малых изменений δu , будет иметь вид:

$$\delta u = - \frac{2R_{\text{эл}} G_{\text{эл}} R_0}{3L_{\text{эф}}^2} \cdot u_0 \quad (39)$$

Учитывая выражение (36), для $G_{\text{эл}}$ после ряда простых преобразований из (39) получим:

$$\delta u = \frac{0,257 R_{\text{эл}} N^{2/3}}{u_0} \cdot \left(\Delta W \frac{\Pi}{N} + p \right). \quad (40)$$

Согласно (26) и (27), величина:

$$\frac{\Pi}{N} \leq \frac{I, 2I p}{\Delta W}, \quad (41)$$

откуда, согласно (40), получаем следующее ограничение для величины сопротивления проводника объемной сетки в пределах элемента среды:

$$R_{\text{эл}} \leq \frac{I, 76 u \cdot \delta u}{p N^{2/3}} \quad (42)$$

2. Для плоской модели системы питания среды (рис.2а) в предположении, что размеры ячеек сеток значительно меньше размеров соответствующей плоской части среды, уравнения для токов и напряжений между соседними узлами будут иметь вид:

$$\begin{aligned} L_{\text{эф}} \operatorname{div} \vec{I} + 2 G_{\text{эл}} u &= 0, \\ L_{\text{эф}} \operatorname{grad} u + R_{\text{эл}} \vec{I} &= 0; \end{aligned} \quad (43)$$

из которых следует уравнение относительно напряжений, вида:

$$\Delta u - \frac{2R_{\text{эл}} G_{\text{эл}}}{L_{\text{эф}}^2} u = 0. \quad (44)$$

Применим уравнение (44) для части среды в виде прямоугольной матрицы, содержащей $\frac{N}{s}$ элементов, имеющей свою автономную систему питания, соответствующую указанной выше плоской модели.

Для рассматриваемого случая уравнение (44) будет иметь вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} - \frac{2R_{\text{эл}} G_{\text{эл}}}{L_{\text{эф}}^2} u = 0, \quad (45)$$

а граничные условия будут следующими:

$$x = \pm \frac{L_{\text{эф}}}{2} \left(\frac{N}{s} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad u = u_0;$$

$$y = \pm \frac{L_{\text{эф}}}{2} \left(\frac{N}{s} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad u = u_0,$$

где u_0 - напряжение по краям сеток.

Решение (45) при указанных выше граничных условиях упрощается благодаря тому, что необходимо предполагать незначительным изменение напряжения к середине сеток. При этом можно приближенное решение искать в виде следующего ряда:

$$u = a_1 + a_2 x^2 + a_3 y^2 + a_4 x^2 y^2 + \dots \quad (46)$$

Используя (46), (45) и граничные условия, можно получить выражение для изменения напряжения δu от периферии до центра сеток в виде:

$$\delta u = \frac{N R_{\text{эл}} G_{\text{эл}} u_0}{8s},$$

и после подстановки выражения для $G_{эл}$, согласно (36), в
иде:

$$\delta u = \frac{N \cdot R_{эл}}{8 \pi \epsilon_0} \left(\Delta W \frac{\Pi}{N} + p \right). \quad (47)$$

Далее, используя неравенство (41), получим следующее не-
равенство для величины допустимого сопротивления одного про-
водника сетки, в пределах элемента среды:

$$R_{эл} \leq \frac{3,62 \pi u \cdot \delta u}{p N}. \quad (48)$$

Основные формулы (42) и (48), определяющие ограничения
на параметры элементов сред по системе питания, справедливы,
очевидно, только для элементов, питаемых от источников на-
пряжения.

Г. Требуемые параметры элементов среды для
вычислительной среды с основными параметрами: $P =$
 10^9 опер/сек, число элементов памяти $10^{10} + 10^{11}$.
Сопоставление параметров современных элементов
требуемыми.

Параметры элементов среды в зависимости от параметров
среды определяются формулами (28), (29), (85), (42), (48),
(10), (11) и (24).

Ниже приводятся эти формулы, выписанные для удобства их
одновременного обзора:

1. Ограничения по перегреву отражают формулы (28), (29) и
(24):

$$P_0 = \frac{P}{k \Delta \theta_{\max}} \leq \frac{7,2 L_{\infty}}{N^{2/3}}, \quad (49)$$

$$\Delta W_0 = \frac{\Delta W}{k \Delta \theta_{\max}} \leq \frac{5,3 N^{1/3} L_{\infty}}{\Pi}, \quad (50)$$

$$\frac{\Delta \theta_{\text{лок}}}{\Delta \theta_{\max}} = \frac{0,194 \gamma (\Delta W_{\text{т}} + P_0)}{k \cdot \Delta \theta_{\max} \sqrt[3]{V}} < 1. \quad (51)$$

2. Ограничения по допустимым задержкам сигналов отражает двойное неравенство (35):

$$\frac{\Pi}{v_A N} < \tau_T < \frac{1}{2 \tau_b n^{ab}}, \quad (52)$$

где $b = 1$, $\tau_1 = \tau_A$ - для активных связей, $b = 2$, $\tau_2 = \tau_{\Pi}$ - для пассивных связей; $a = \frac{1}{3}$ - для объемных сред, $a = \frac{1}{2}$ - для плоских сред.

3. Ограничения на величины сопротивлений системы питания при объемной среде (42):

$$R_{эл} \leq \frac{1,76 \text{ и } 6u}{p N^{2/3}}; \quad (53)$$

при плоской среде (48):

$$R_{эл} \leq \frac{3,62 \text{ и } 6u}{pN}. \quad (54)$$

4. Условие "диффузионного" распространения сигнала в пассивном канале связи (10):

$$\tau_{\Pi} \geq \frac{L_{эф}}{v_c}. \quad (55)$$

5. Условие прохождения сигнала по цепочке пассивного канала связи (11):

$$G < \frac{1}{R n^{2a}}, \quad (56)$$

где $a = \frac{1}{3}$ - для объемной среды и $a = \frac{1}{2}$ - для плоской среды.

Для определения необходимых параметров элементов среды (для среды с параметрами: $P = 10^9$ опер/сек, число элементов памяти $10^{10} + 10^{11}$) нужно прежде всего определить величины: Π , N , v_A , $n = n_{\max}$.

Согласно [1], число элементов, выполняющих логические функции, должны быть намного меньше числа элементов памяти, и поэтому можно положить: $N = 10^{10} + 10^{11}$. Тогда согласно (16), общее число элементов будет определяться величинами:

$$N = 3,9 \cdot 10^{11} + 4,2 \cdot 10^{12}.$$

Можно принять $N = 10^{12}$.

Величина Π должна иметь разные значения для сред с пассивными и активными связями (предполагается, что емкости триконов в пассивных каналах связи значительно меньше емкостей элементов, выполняющих роль логических и памяти).

Можно принять, что на одну элементарную операцию необходимо затрачивать 300 логических элементов и элементов памяти. При этом для сред с пассивными связями $\Pi = \Pi_{\Pi} = 3 \cdot 10^{11}$. В средах с активными связями величина Π должна быть больше Π_{Π} на число элементов в каналах связи. Общее число элементов среды, которое необходимо затратить на выполнение функций соединений (каналы связи, отключенные поля), согласно (16), должно быть больше N_1 , на величину $\log_2 N \approx 40$ при $N = 10^{12}$. Таким образом, величина Π для сред с активными связями должна иметь значения, лежащие в интервале:

$$q \Pi < \Pi_A < 40 \Pi_{\Pi},$$

где q - число выходов элемента среды, выполняющего роль логического элемента. Можно принять $\Pi_A = 3 \cdot 10^{12}$. Соответственно, согласно (16), можно принять для сред с пассивными связями: $\nu_{\Delta\Pi} = 1/40$ и для сред с активными связями: $\nu_{\Delta A} = 1/4$.

Величину Π_{\max} можно определить, исходя из предположения, что на среде действуют по крайней мере $100 + 1000$ параллельно работающих элементарных машин ($M = 100 + 1000$) [1]. Для определенности принято $M = 300$. Следует заметить, что при больших значениях M ограничения (52) и (56), в которые только и входит эта величина, становятся менее жесткими.

На рис. 4 представлены ограничения на параметры элементов среды заданной производительности Δw_0 и ρ_0 для значения $L_{эф} = 1$ мм в виде двух областей допустимых значений для сред с пассивными (П) и сред с активными (А) связями. На рис. 5а изображены области допустимых значений τ_{Π} и f_{Π} для сред с пассивными связями для объемной среды $1/3$ и для плоской среды $1/2$, а на рис. 5б - области допустимых значений τ_A и f_A , также для объемной $1/3$ и плоской $1/2$ сред. На рис. 6 изображены области допустимых значений ρ и u (полагая $\delta u = 0,1u$) при заданных значениях $R_{эд}$ для объемной среды. Согласно (53) и (54), для плоских сред при тех же значениях ρ и u , что и для объемных, величины $R_{эд}$

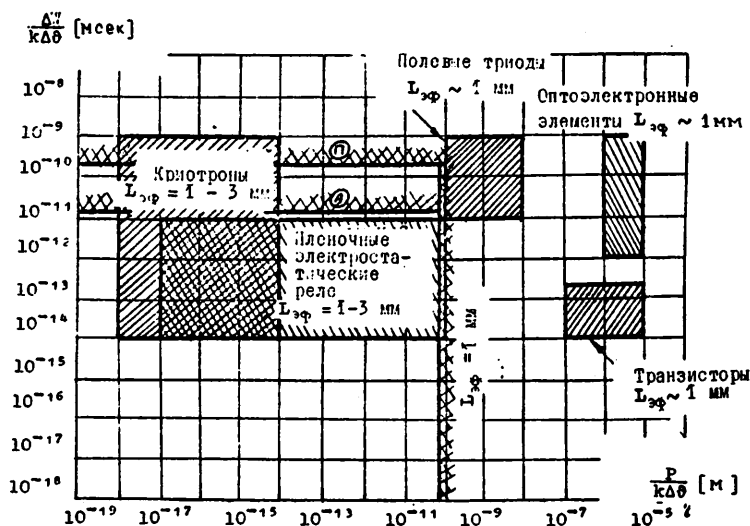


Рис. 4.

Ограничения на параметры элементов среды $P = 10^9$ опер/сек для сред с пассивными Π и активными A связями. При изменении на один порядок границы отодвигаются по осям абсцисс и ординат также на один порядок.

должны быть в 500 раз меньше при $\alpha = 1$ (однослойная система питания), или при тех же значениях $R_{эл}$, что и для объемных сред, система питания плоской среды должна быть разбита на 500 слоев ($\alpha = 500$). На рис. 7 представлены области допустимых значений α^{-1} и R для объемных 1/3 и плоских 1/2 сред. На рис. 4, 5, 6 и 7 приведены также области соответствующих параметров возможных элементов сред на современных элементах: криотронах, электростатических реле, полевых триодах,

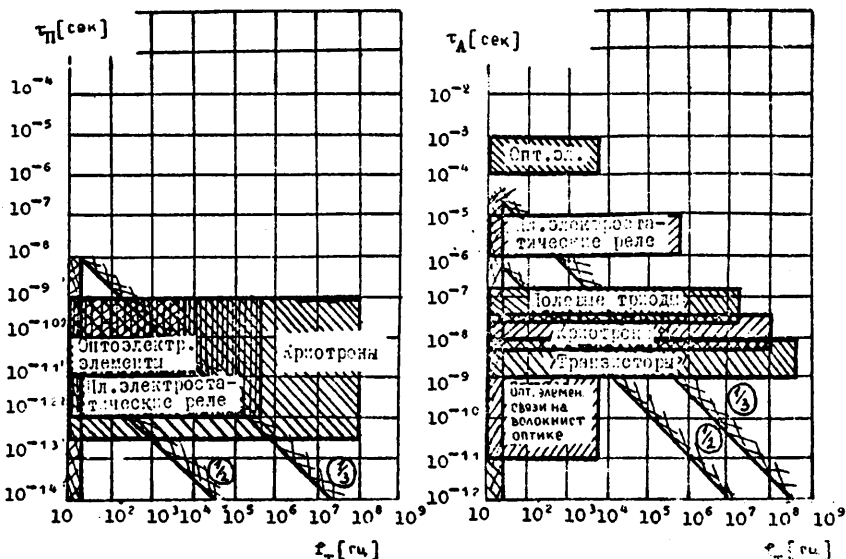


Рис. 5

- а) Области допустимых значений параметров $\tau_{\text{П}}$ и f_T для среды $\rho=10^9$ опер/сек для объемной 1/3 и плоской 1/2 среды.
- б) Аналогичные области значений параметров $\tau_{\text{Л}}$ и f_T .

оптоэлектронных элементах на основе электролюминесцентных конденсаторов, транзисторах, которые позволяют сделать их оценку в качестве компонент среды с указанной производительностью. Параметры современных элементов приведены в таблице I, где приведены и соответствующие литературные источники. Предполагалось, что для элемента среды необходимо несколько десятков компонент, поэтому на указанных рисунках величины ρ завышены в 10 раз по сравнению с этими величинами компонент, приведенными в таблице I. Также предполагается, что

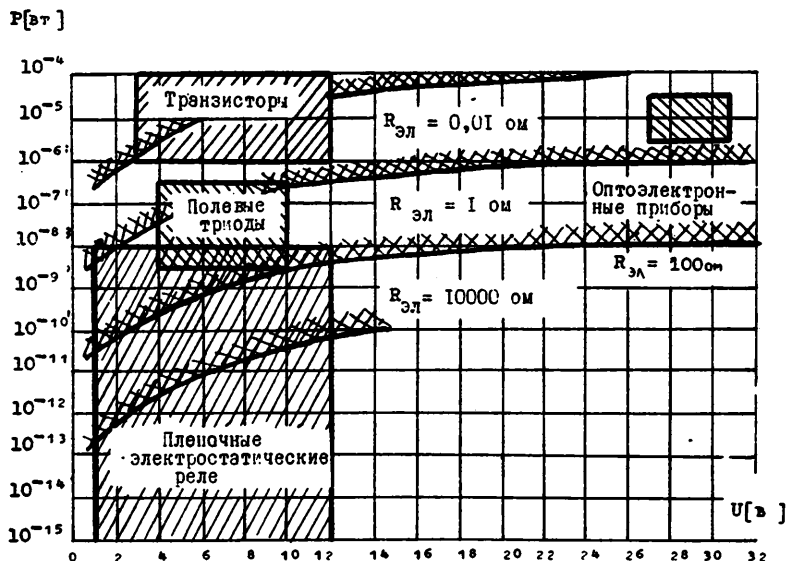


Рис. 6

Области допустимых значений p и u при заданных значениях $R_{эл}$ для объемной среды. Для плоских сред сопротивления $R_{эл}$ должны в 500 раз меньше.

активные функции выполняет несколько единиц компонент, поэтому величина ΔW на указанных рисунках оставлена без изменений по сравнению с данными таблицы I. В таблице I приведены также значения $s = \frac{\Delta \theta_{лок}}{\Delta \theta_{max}}$, оцененные согласно формуле (5I), которые показывают, что локальный перегрев для рассматриваемых элементов незначителен.

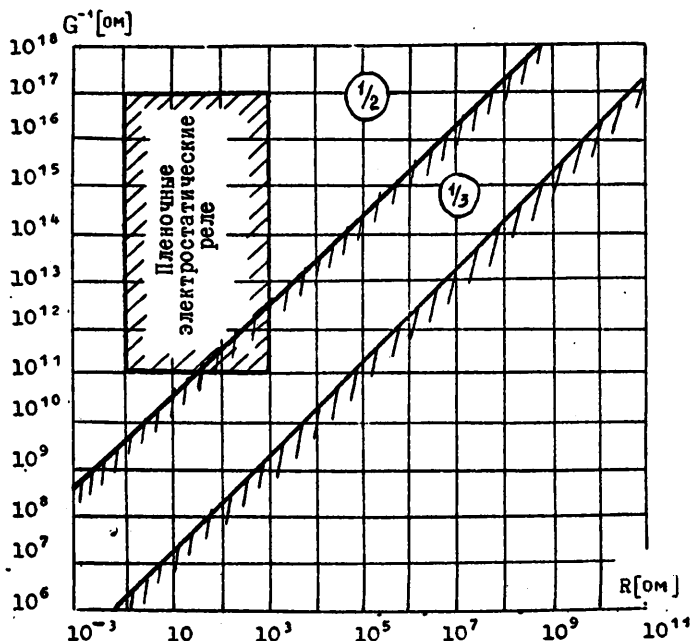


Рис. 7

Области допустимых значений G^{-1} и R для объемных $\left(\frac{1}{3}\right)$ и плоских $\left(\frac{1}{2}\right)$ сред.

У. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СОПОСТАВЛЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕМЕНТОВ. ВЫВОДЫ.

1. Результаты сопоставлений требуемых параметров элементов среды и параметров современных элементов показывает, что три вида элементов: криотроны, электростатические реле и полевые триоды перспективны для создания среды, имеющей производительность 10^9 опер/сек.

2. Наиболее удовлетворительные энергетические параметры имеют элементы сред на криотронах и пленочных электростатиче-

ских реле (рис.4).

3. При принятом минимальном делении среды на 300 параллельно работающих элементарных машин ($M = 300$), при криотронах, электростатических реле и полевых триодах необходимы среды, соединения элементов в которых должны быть плоско-объемными (необходимо использовать более широкую область по сравнению с областью, которая определяется для плоской среды согласно рис.5а и рис.5б). При возможности произвести минимальное деление на значительно большее число элементарных машин вполне допустимо построение плоских сред.

4. Значения тактовых частот, необходимых для достижения указанной производительности, оказываются весьма низкими для сред на криотронах, пленочных электростатических реле и полевых триодах. Они составляют $10^2 + 10^3$ гц.

5. При значениях тактовых частот порядка $10^2 + 10^3$ гц вполне пригодными оказываются элементы среды, имеющие ресурс срабатываний порядка $10^9 + 10^{10}$. Первые результаты экспериментального обследования пленочных электростатических реле показывают [20], что они вполне могут иметь указанный ресурс, особенно, если учесть крайне незначительную нагрузку на контакты в схемах, построенных по принципу взаимно дополняющих элементов (на контакт разряжаются емкости реле, имеющие энергии порядка $10^{-10} + 10^{-12}$ дж).

6. Наименьшие требования к сопротивлениям проводников системы питания могут быть предъявлены в средах на основе электростатических реле (рис.6).

7. В средах на основе электростатических реле допустимы весьма большие значения последовательных сопротивлений в каналах связи ($R \sim 10^6$ ом), благодаря возможности получения очень больших значений паразитных сопротивлений ($G \sim 10^{17}$ ом). Это обстоятельство позволяет применять в средах электростатические реле с очень большими сопротивлениями замкнутых контактов, что в свою очередь открывает большие возможности получения реле с большим ресурсом срабатываний (полупроводниковые контакты по Хольму [39]).

8. На основе криотронов и пленочных электростатических реле открываются исключительные возможности создания сред с очень малыми размерами. Согласно рис.4 и уравнениям (49) и (50), размеры элементов среды на криотронах и пленочных электростатических реле могут быть доведены до значений порядка 1

микрона, что соответствует предельно возможным значениям [26, 27, 28].

Если не окажется возможным резко улучшить энергетические параметры современных полупроводниковых элементов, то для соответствующих сред, имеющих производительность, указанную выше, не представляется возможным сколько-нибудь уменьшить размеры элементов без специальных мер по дополнительному охлаждению.

На рис. 8 приводится сравнение затрат мощности средами указанной производительности на основе принятых к рассмотрению элементов. Эта мощность рассчитана по формуле $p = \Delta W_{\text{П}} + p_{\text{Н}}$. Значения этой мощности отложены (в соответствии

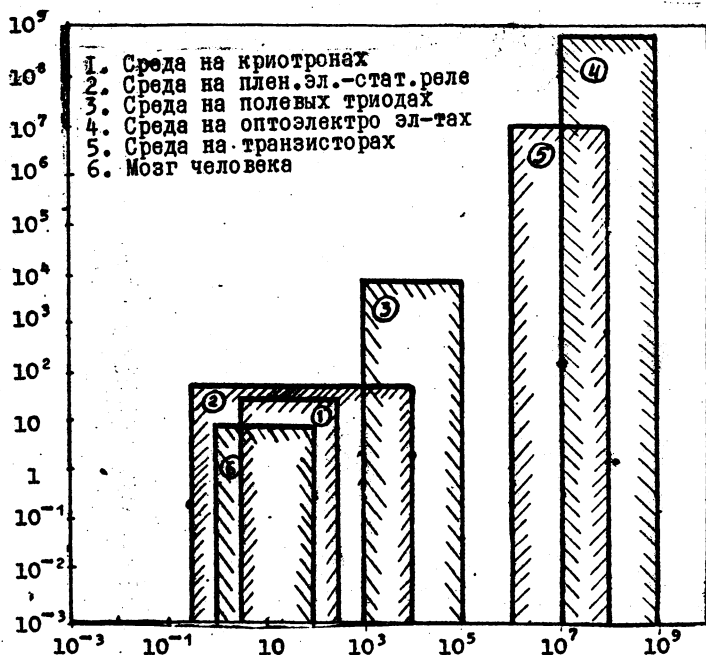


Рис. 8

Сравнение затрат мощности средами $P = 10^9$ опер/сек для различных элементов. По оси ординат отложены среднегеометрические значения мощностей.

Примечания, литература.	[15], [16]	1. Общие электрические активные связи. 2. Связь на волоконно-стой оптике. 3. Электрические пассив- ные связи [36], [37], [38]	[18], [19], [15]	[20], [31], [32], [33], [34], [35]	[21], [29], [30]
P Вт	$10^{-6} - 10^{-5}$	10^{-5}	10^{-9}	$10^{-9} - 10^{-17}$	$10^{-10} - 10^{-19}$
ΔW дБ	10^{-12}	$10^{-8} - 10^{-10}$	10^{-9}	$10^{-10} - 10^{-12}$	$10^{-12} - 10^{-16}$
$\Delta \alpha_{\text{полк}}$ $\frac{\text{дБ}}{\text{м}}$	10 - 100	10 - 100	10 - 100	10 - 100	$10^{-3} - 1$
P_0 м	$10^{-8} - 10^{-10}$	$10^{-5} - 10^{-6}$	$10^{-9} - 10^{-10}$	$10^{-10} - 10^{-17}$	$10^{-10} - 10^{-16}$
ΔW_0 м сек	$10^{-11} - 10^{-16}$	$10^{-9} - 10^{-12}$	$10^{-10} - 10^{-14}$	$10^{-11} - 10^{-16}$	$10^{-9} - 10^{-11}$
τ_2 сек	$10^{-9} - 10^{-8}$	$10^{-7} - 10^{-1}$	$10^{-8} - 10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-3}$	10^{-9}
τ_A сек	$10^{-9} - 10^{-8}$	а) $10^{-9} - 10^{-8}$ б) $10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-8} - 10^{-7}$	$10^{-6} - 10^{-3}$	10^{-9}
τ_H сек	-	в) $10^{-11} - 10^{-9}$	-	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-12} - 10^{-9}$
$L_{\text{эф}}$ м	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
G ом	-	-	10^{-9}	$10^{-11} - 10^{-17}$	-
R ом	-	-	-	1 - 10^3	-
U в	3 - 12	25 - 30	4 - 8	1 - 10	-
$c = \frac{\Delta \alpha_{\text{полк}}}{\Delta \alpha_{\text{свх}}}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	10^{-1}	$10^{-1} - 10^{-1}$	$10^{-1} - 10^{-3}$	-
$f_{\text{полк}}$ Гц	$10^8 - 10^7$	$10^3 - 10^6$	$10^7 - 10^8$	$10^5 - 10^6$	10^8
	Биполярные транзисторы	Оптоэлектр. элементы	Полевые триоды	Пленочные электростатич. реле	Криотроны

с данными таблицы I) по оси абсцисс. По оси ординат отложены среднегеометрические крайних значений этой мощности. Для сред на криотронах мощность завышена в 1000 раз, чем учитываются дополнительные затраты мощности в системе охлаждения [21]. На рис. 8 приводятся также значения мощности, затрачиваемые человеческим мозгом [40]. Сравнение показывает, что в средах на криотронах и электростатических реле затраты мощности оказываются приблизительно такими же, как и в человеческом мозге.

Проделанные сопоставления еще не позволяют сделать вывод о том, что наиболее перспективными элементами для сред производительностью 10^9 опер/сек являются криотроны и пленочные электростатические реле. Возникает необходимость более глубокого изучения путей создания сред на основе, прежде всего, сравнительной оценки необходимых экономических затрат на каждом из возможных путей, а также на основе оценки элементов по их рабочим характеристикам, что можно сделать только на базе вероятностных расчетов соответствующих схем.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Э.В. Евреинов, Ю.Г. Косарев. Однородные универсальные вычислительные системы высокой производительности. Новосибирск, изд-во "Наука", 1966.
2. Э.В. Евреинов. Однородные цифровые автоматы с программируемой структурой. Автореферат диссертации на соискание учен. степени доктора техн. наук, Новосибирск, 1967.
3. И.В. Прангисвили, Н.А. Абрамова, Е.В. Бабичева, В.В. Игнатушенко. Микроэлектроника и однородные структуры для построения логических и вычислительных устройств. Москва, Изд-во "Наука", 1967.
4. Крейн. Труды института радиоинженеров, № 10, октябрь, 1962, русский перевод, стр. 2081 + 2094.
5. А.В. Николаев, Г.М. Паратов, Б.Л. Доннер. Синтез элементов интегральных схем при разбросе параметров. Настоящий сборник, 1967.

6. Е.И. Беляев. К вопросу о совместной оптимизации электрических и конструктивных параметров интегральных схем. Настоящий сборник, 1967.
7. Л. Рагонис. Метод проектирования схем с целью увеличения выхода сложных воспроизводимых интегральных электронных подсистем. Труды ИЭЭР, 1964, т.52, № 12, с.1750-1753.
(русский перевод).
8. Джоколле. За рубежом Р.Э. № 11, стр. 34-59.
9. Микроэлектроника. Москва, Изд-во "Советское радио", 1966.
10. А.И. Мишин. Об элементах вычислительной среды. Система "среда-машина". настоящий сборник, 1967 г.
11. О.Л. Бандман, В.Ф. Гурко, Н.И. Назаров, Б.И. Фомель. Криотронные элементы вычислительной среды, Настоящий сборник, 1967.
12. Параметроны. Москва, МИЛ, 1962.
13. Вычислительные системы, № 2, СО АН СССР, Институт математики, Новосибирск, 1962г.
14. Туннельные диоды. Москва, ИЛ, 1961.
15. Микромощная электроника. Москва, Изд-во "Советское радио", 1967.
16. Lawrence, Wagner, Meindl. Wescon/65, part 2 integrated circuits, technical papers, 1965, p.1.1.
17. Труды Московского ордена Ленина энергетического института, выпуск LX. Цифровые магнитные элементы, части I-4, Москва, 1965.
18. Mitchell, Ahrons, Wescon/65, part 2 integrated circuits, technical papers, 1965, p.1.1.
19. Коппен. Интегральные схемы на полевых транзисторах со взаимно дополнительными типами проводимости. Электроника, 1964, № 32, стр.25-28(русский перевод).
20. В.Л. Дятлов, Л.С. Содатенков. Некоторые результаты исследования статических характеристик пленочных электростатических реле, 1967, настоящий сборник.
21. Дз. Бреммер. Сверхпроводящие устройства, Москва, Изд-во "Мир", 1964.

22. В.И. Смирнов. курс высшей математики, т.П, Изд-е 10-е стереотипное, М.-Л. ГИТТЛ, 1950, с. 548.
23. А.В. Нетушил, С.В. Страхов. Основы электротехники, ч.П, М.-Л, ТЭИ, 1955, с.38-44.
24. В.П. Панферов. Труды МЭТУ, № 5, сер."Вычислительная техника", 1966,
25. В.К. Левин,. Анализ переходных процессов в некоторых диодных и усилительных схемах. Диссерт. на соискание канд. техн. наук. М., 1965, с.84.
26. В.Л. Дятлов, И.С.Солдатенков, Е.И.Черепов. Электростатическое реле. А.С.СССР № 204440. Заявл.12.X. 1966. Оpubл. 20.X.1967 г. - Изобретения, промышленные образцы и товарные знаки, 1967, № 22, с.54.
27. А.А. Колосов, Ю.И. Горбунов, Ю.Е. Наумов. Полупроводниковые твердые схемы, Москва, Изд-во "Советское радио", 1965, стр. 463-495.
28. Дж. Уоллмарк, Микроэлектроника, гл.П, М., Изд-во "Советское радио", 1966, стр. 28-124.
29. К. Мендельсон. Физика низких температур, Москва, ИИЛ, 1966 .
30. С.Я. Беркович, П.П. Головистиков, Р.А. Ченцов. К расчету нестационарной теплопередачи от пленки на подложке. -Инженерно-физический журнал, 1963, № 5, Минск, Изд-во АН БССР, с.99.
31. В.Л. Дятлов, И.С. Солдатенков, Е.И. Черепов. Электро - статическое реле. Авт.свид. № 204440.Оpubл. 20.X.1967 г. - Изобретения, промышленные образцы и товарные знаки, 1967, № 22, с.54.
32. Б.С. Сотсков. Элементы автоматической и телемеханической аппаратуры. М., Госэнергоиздат, 1950.
33. М.И. Виттенберг. Расчет электромагнитных реле. М.-Л, Изд-во "Энергия", 1966, стр. 594.
34. Дж.Кей, Т.Леби. Таблицы физических и химических постоянных. М., ГИИД, 1962, стр. 99.
35. А.В. Нетушил, К.М. Поливанов. Основы электротехники, ч.Ш, М.-Л, ТЭИ, 1956, с.190.
36. Оптическая обработка информации. М, Изд-во "Мир", 1966 г.
37. С.В. Свечников. Фотоэлектрические функциональные преобразователи как перспективное направление полупроводниковой электроники. - Полупроводни-

ковая техника и микроэлектроника, Киев, изд-во "Наукова думка", 1966.

38. С.В. Свечников. Перспективы применения оптоэлектроники в вычислительной технике. 1967, настоящий сборник.
39. Р. Холм. Электрические контакты. - Москва, НИЛ, 1961, стр. 373.
40. И.Б. Гутчин, А.С. Кузнецов. Бионика и надежность. М., Изд-во "Наука", 1967, стр. 9.