

УДК 519.95

**О ВОЗМОЖНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НА КРИОТРОНАХ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СРЕДЫ**

Я.С. Кан, В.А. Рагубовский, В.К. Бабайлов

Рассматриваются 3 варианта универсального элемента [УЭ] на криотронах однородной двумерной вычислительной среды [ВС] с прямоугольным покрытием. УЭ могут выполнять три соединительные функции:  $\rho$  - "крест с точкой",  $D$  - "крест без точки",  $O$  - "разрыв" [1] и релейно-контактную функцию  $f$ . Все образованные в среде схемы подчиняются законам сверхпроводящих цепей. Все варианты УЭ были собраны на проволочных свинцово-оловянных криотронах и проверены в работе. Приводятся результаты экспериментальных исследований схем УЭ.

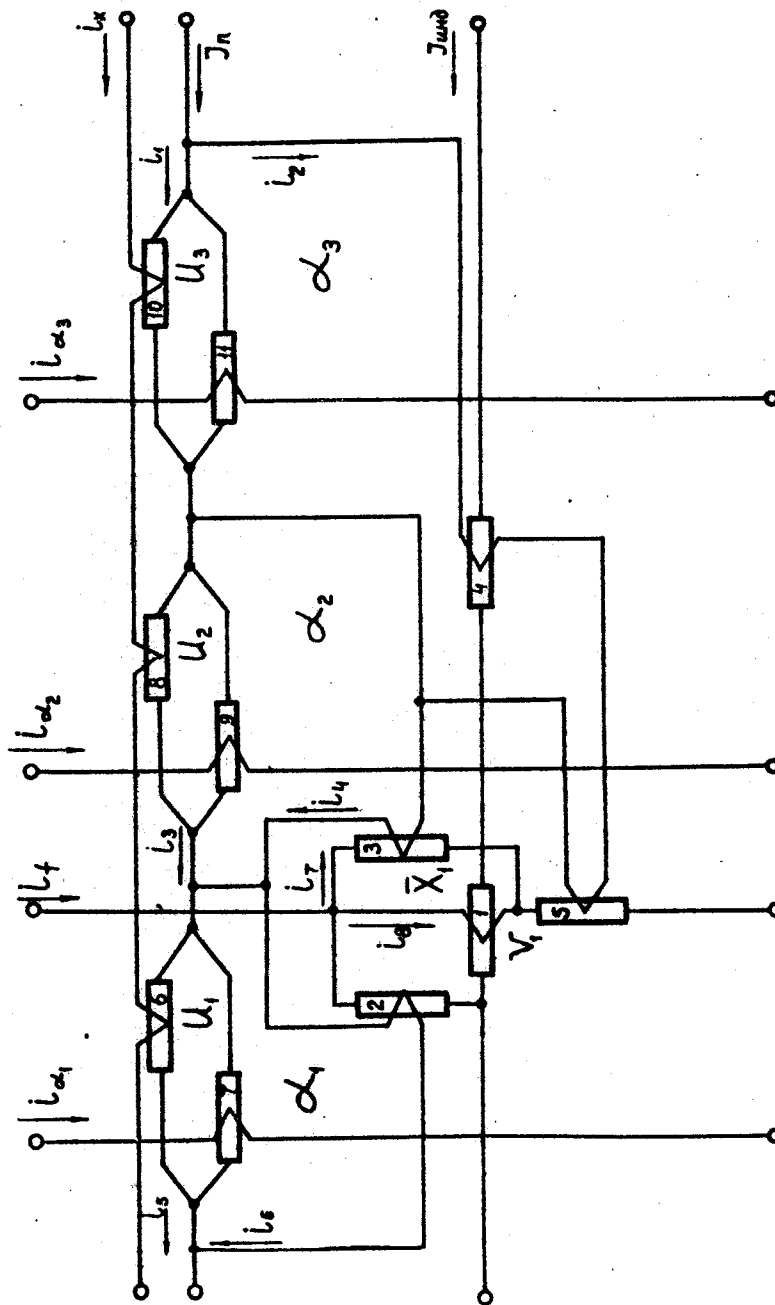
**I. Схема и устройство УЭ**

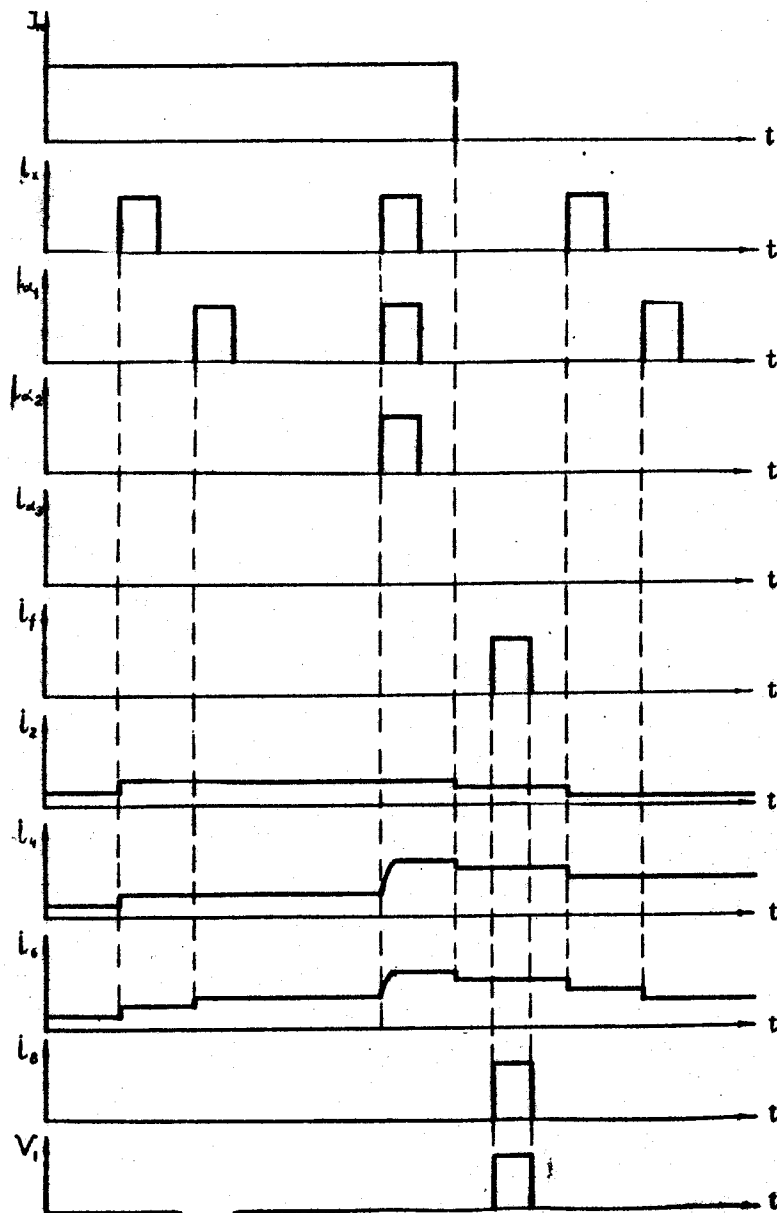
**Первый вариант**

Элемент криотронной ВС рассматриваемого типа, предложенный сотрудниками ИМ СО АН СССР, содержит 11 криотронов (рис.1). Его функциональная часть максимально проста. Она представляет собой один криотрон  $K_1$ , у которого ток в сердечнике является функцией отрицания от переменной  $X_1$ , подаваемой на вход его управляющей обмотки. Остальные 10 криотронов образуют настроечные контуры:  $\alpha_1 - K_2, K_6, K_7$ ;  $\alpha_2 - K_3, K_8, K_9$ ;  $\alpha_3 - K_4, K_5, K_{10}, K_{11}$ , необходимые для настройки УЭ на реализацию соединительных функций типа " $\rho$ ", " $D$ " или " $O$ " и релейно-контактной функции. Настройка элемента на выполнение одной из перечисленных функций

производится координатным способом при помощи записи токов в настроечные контуры. Для этого используются схемы  $I_1, I_2, I_3$ . Запись незатухающих токов в контуры производится подачей импульсов токов:  $I_n, i_x, i_{\alpha_i}$  по соответствующим горизонтальной и вертикальным шинам настройки. Ток  $I_n$ , вытесняясь в управляющие обмотки криотронов  $K_2, K_3, K_4, K_5$  настроечных контуров  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , приводит к разрушению сверхпроводимости сердечников этих криотронов, а это для сверхпроводящих цепей эквивалентно их полному размыканию. Так, например, разрушение сверхпроводимости сердечника криотрона  $K_2$  соответствует реализации элементом соединительной функции типа "Д",  $K_2$  и  $K_3$  - настройке УЭ на выполнение логической функции  $f = \bar{X}_1$ , а  $K_2, K_3, K_4, K_5$  - настройке УЭ на соединение типа  $O$ . Рассмотренный выше УЭ оказался непригодным для построения на его основе ВС по следующим причинам.

В-исходном состоянии, когда  $I_n$  подается в схему (рис.1), а  $i_x = i_{\alpha_i} = 0$ , ток разветвляется в ветвях схем  $I_1, I_2, I_3$  обратно пропорционально индуктивностям этих ветвей. Уже в этом случае, как будет показано ниже, из-за небольшого различия в величинах индуктивностей сердечника и управляющей обмотки ток в управляемой ветви может достигать значения  $> i_{кр}$  [2]. При поступлении же на вход схем  $I_1, I_2, I_3$  одного из настроечных токов  $i_x, i_{\alpha_i}$  (такой случай может иметь место при координатной настройке, когда настраивается один из элементов, а на соседние подается только лишь один из настроечных токов -  $i_x$  или  $i_{\alpha_i}$ ) ток  $I_n$ , вытесняясь в управляющие обмотки криотронов  $K_1, K_2, K_4, K_5$  контуров  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , может достичь значения  $> i_{кр}$ . В этом случае такая ячейка работает в режиме "насоса" Лакира [3]. Это может привести к ложной настройке и неправильной работе УЭ. По приведенной выше схеме (рис. 1) был собран из проволочных свинцово-оловянных криотронов УЭ и опробован в работе. В табл. I приведена экспериментально снятая зависимость величины тока ( $\Delta I_n$ ), ответвляющегося в управляющие обмотки криотронов  $K_4$  и  $K_5$  контура  $\alpha_3$ , от величины тока  $I_n$  при подаче в схему только тока  $i_x$  или только  $i_{\alpha_3}$ . В случае, если  $i_x$  и  $i_{\alpha_i}$  одновременно поступают на вход соответствующей схемы  $I_i$ , происходит ее правильное срабатывание и ток  $I_n$  полностью уходит в параллельную сверхпроводящую ветвь, составленную из управляющих обмоток криотронов и соединительных проводов.





$i_x = 300 \text{ ма}; i_{\alpha_3} = 0; i_{кр} = 100 \text{ ма}$			$i_x = 0, i_{\alpha_3} = 300 \text{ ма}$			
$I_n$ (ма)	330	350	400	520	550	600
$\Delta I_n$ (ма)	110	118	190	100	110	142

После выключения координатных настроечных токов  $i_x, i_{\alpha_1}$ , а затем  $I_n$  в соответствующем настроечном контуре  $\alpha_i$  будет циркулировать незатухающий ток. Таким образом, контур  $\alpha_i$  будет находиться в настроенном состоянии до тех пор, пока на соответствующую схему  $I_i$  этого контура не начнут вновь попеременно поступать координатные токи  $i_x, i_{\alpha_i}$  — токи полувыборки. Поступление этих токов приводит к затуханию тока, циркулирующего в ранее настроенном контуре  $\alpha_i$ , так как этот контур является в этом случае не чем иным, как ячейкой со многими устойчивыми состояниями. Работа такой ячейки подробно рассмотрена в работе [4]. В табл. 2 приведена экспериментально полученная зависимость суммарного числа попеременно поступающих на вход схемы  $I_3$  импульсов  $i_x, i_{\alpha_i}$  ( $n_x + n_\alpha = n$ ) от  $I_n$ , вызывающее затухание

Т а б л и ц а 2

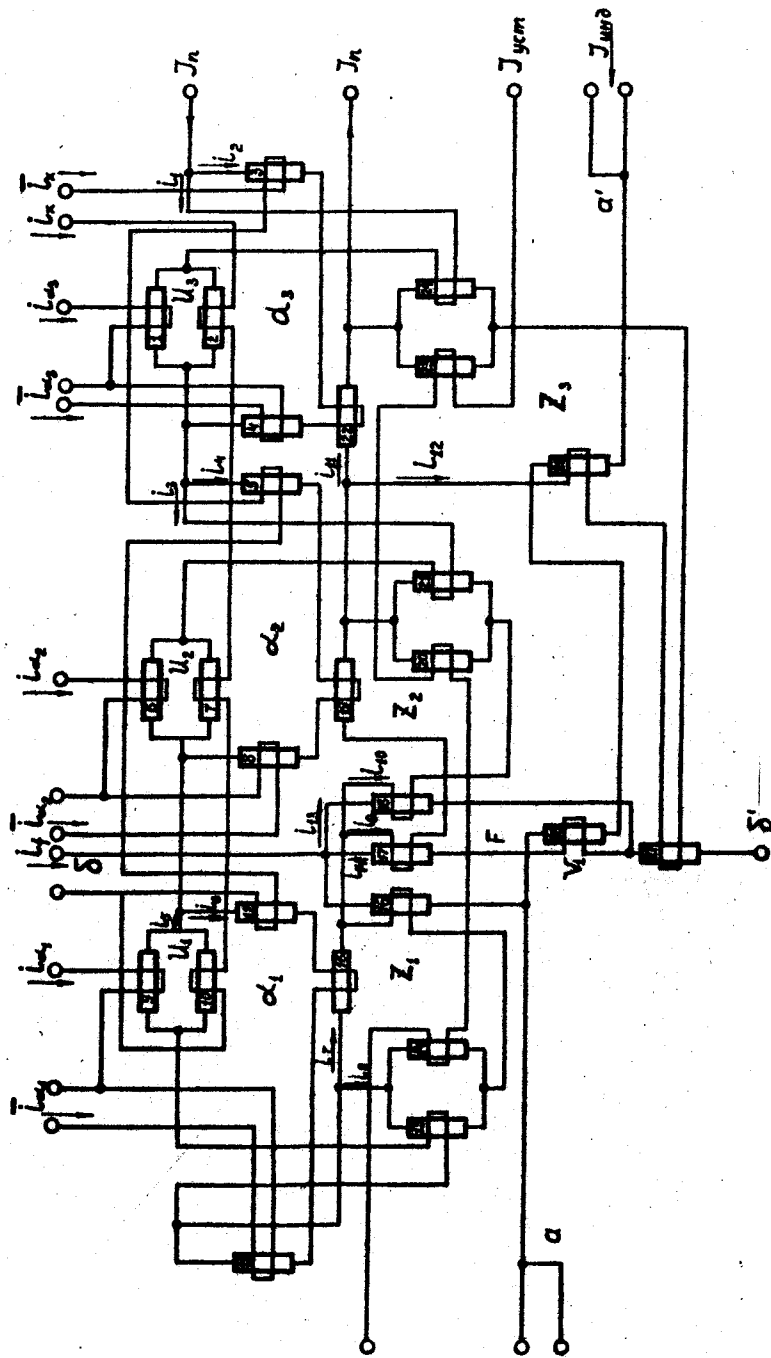
$I_n$ (ма)	150	200	250	300	400
$n$	3	4	5	5	6

тока в полувыбранном контуре  $\alpha_3$  до величины, меньшей  $i_{кр}$ . Временные диаграммы, поясняющие работу УЭ, приведены на рис. 2.

Отмеченные выше режимы работы ячейки при настройке и переключении ее после настройки показывают непригодность ее для работы в ВС, так как ячейка не выполняет ни функций настройки, ни функций запоминания настроенного состояния.

## 2. Второй вариант УЭ

Схема 2-го варианта УЭ, использующего так же, как и в рассмотренной выше схеме УЭ, молярное кодирование, показана на рис. 3. УЭ содержит 11 триодов. Отличительной особенностью этой схемы по сравнению с вышерассмотренной является использование полных схем  $I_1, I_2, I_3$  для координатной настройки. Рабо-



та схемы  $I_i$  происходит следующим образом. Один настроечный ток, например  $i_x$ , поступает в персисторный контур, составленный из сердечника одного криотрона, например  $K_1$ , из управляющей обмотки другого криотрона —  $K_2$  и из соединительных проводников.

Если принять, что индуктивность управляющей обмотки криотрона гораздо больше индуктивности сердечника криотрона, то ток  $i_x$  пройдет в основном через сердечник криотрона  $K_1$ . В том же случае, когда одновременно с  $i_x$  поступает  $i_{\alpha_i}$ , то  $i_x$  весь вытесняется в управляющую обмотку криотрона  $K_2$ , сердечник которого включен в настроечный контур  $\alpha_i$ . Разрушение сверхпроводимости сердечника этого криотрона  $K_2$  приводит к вытеснению тока  $J_n$  в управляемую обмотку криотрона  $K_7$ , разрушение сверхпроводимости которого, в свою очередь, приводит к реализации УЭ соединительной функции типа  $D$ .

После этого вначале выключается  $i_x$ , а затем, когда затухнет  $i_x$ , выключается  $i_{\alpha_i}$  и ток  $J_n$ . После этого в контуре  $\alpha_i$  запомнится ток  $J_n$ , что будет говорить о настройке УЭ на соединение типа  $D$ .

Аналогичным образом происходит настройка УЭ на другие соединительные или логическую функции.

В этом элементе попеременное поступление (до настройки и после нее) настроечных токов  $i_x$ ,  $i_{\alpha_i}$  (рис. 3) не приводит к ложному срабатыванию схем  $I_i$  или к затуханию запомненного в контурах  $\alpha_i$  тока и, соответственно, — к ложной настройке или расстройке УЭ, так как криотроны, образующие схемы  $I_i$ , гальванически не связаны и не образуют схем, подобных "насосу" Лакира или ячейке со многими устойчивыми состояниями.

Однако и этому типу УЭ присущ ряд крупных недостатков, заключающихся в следующем.

а) Токи в ветвях контуров схем  $I_i$  в момент включения  $i_x$  и  $J_n$  распределяются обратно пропорционально индуктивностям этих ветвей. Индуктивность каждого из контуров схем  $I_i$  состоит из индуктивности сердечника, соединительных проводников и управляющей обмотки криотрона, входящего в контур  $\alpha_i$ .

Проведенные экспериментальные исследования криотронных схем показали, что в самом лучшем случае индуктивность сердечника в 7 раз меньше индуктивности обмотки криотрона. В реальных же схемах индуктивность сердечника криотрона вместе с индуктивностями соединительных проводников (исходя из геометрии схемы) всего лишь в 2–4 раза меньше индуктивности управляющей обмотки

вместе с соединительными проводами. УЭ рассматриваемого типа был собран из проволочных свинцово-оловянных криотронов и проверен в работе.

Т а б л и ц а 3

$I_n$ (ма)	400	350	300	250	150
$i_x$ (ма)	210	300	360	360	380

В табл. 3 приведена полученная экспериментально зависимость между величинами тока  $I_n$  и настроечного тока  $i_x$ , вызывающими ложное срабатывание схемы  $I_1$ , т.е. разрушение сверхпроводимости сердечника криотрона  $K_7$  при подаче только  $I_n$  и  $i_x$  и при отсутствии  $i_{\alpha_1}$ . Из этой таблицы видно, что отмеченный выше недостаток резко уменьшает диапазон изменения рабочих токов в таком УЭ.

б) Токковые импульсы, проходящие по настроечным шинам, могут наводить в персисторных контурах незатухающие токи по величине, большей  $i_{кр}$ , которые приводят к ложной настройке и к неправильной работе УЭ.

в) В случае незначительных сопротивлений в контактах на месте спаев криотронов (при  $R_k \ll R_H$ , где  $R_k$  - сопротивление контакта;  $R_H$  - сопротивление сердечника криотрона в нормальном состоянии), в персисторных контурах  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  УЭ происходит неправильное перераспределение токов при настройке, а по окончании ее - полнейшее затухание записанных токов и тем самым стирание настройки.

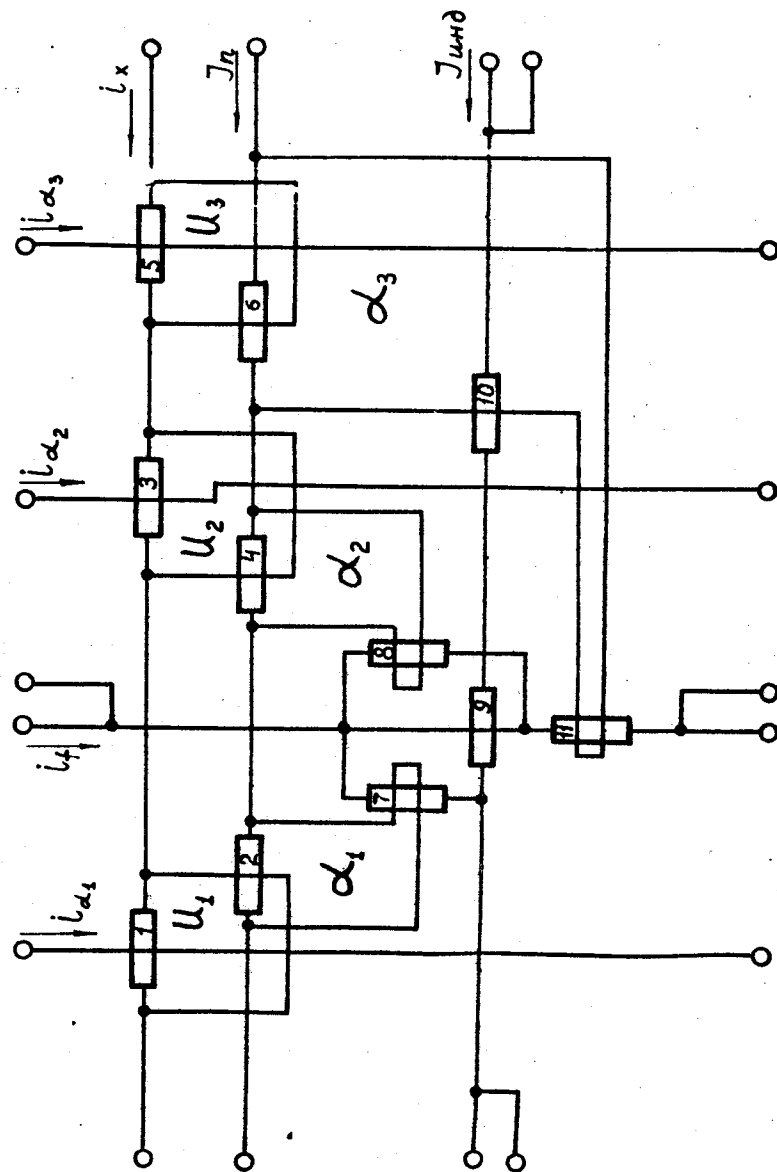
Эти обстоятельства также необходимо учитывать при создании УЭ на криотронах. Видимо, такой вариант УЭ кажется пригодным для построения ВС лишь в том случае, если ВС настраивать по частям, то есть если каждая строка настраивается целиком.

От перечисленных выше недостатков УЭ можно освободиться, если воспользоваться бинарным кодированием входных переменных. УЭ, использующий этот принцип кодирования, описан ниже.

### 3. Универсальный элемент, использующий бинарное кодирование

#### Третий вариант УЭ

Принципиальная схема УЭ этого типа приведена на рис. 4. В отличие от рассмотренных выше вариантов УЭ в данном элементе для координатной настройки используются схемы  $I_1, I_2, I_3$  с би-



нарным кодированием входных переменных [2]. Соединительные и логическая функции, реализуемые этим элементом, аналогичны тем, которые реализуются двумя вышеописанными элементами. В состав УЭ входят схемы  $I_1, I_2, I_3$ , являющиеся элементами настроечных контуров  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ , и контуры запоминания настроенного состояния  $Z_1, Z_2, Z_3$ .

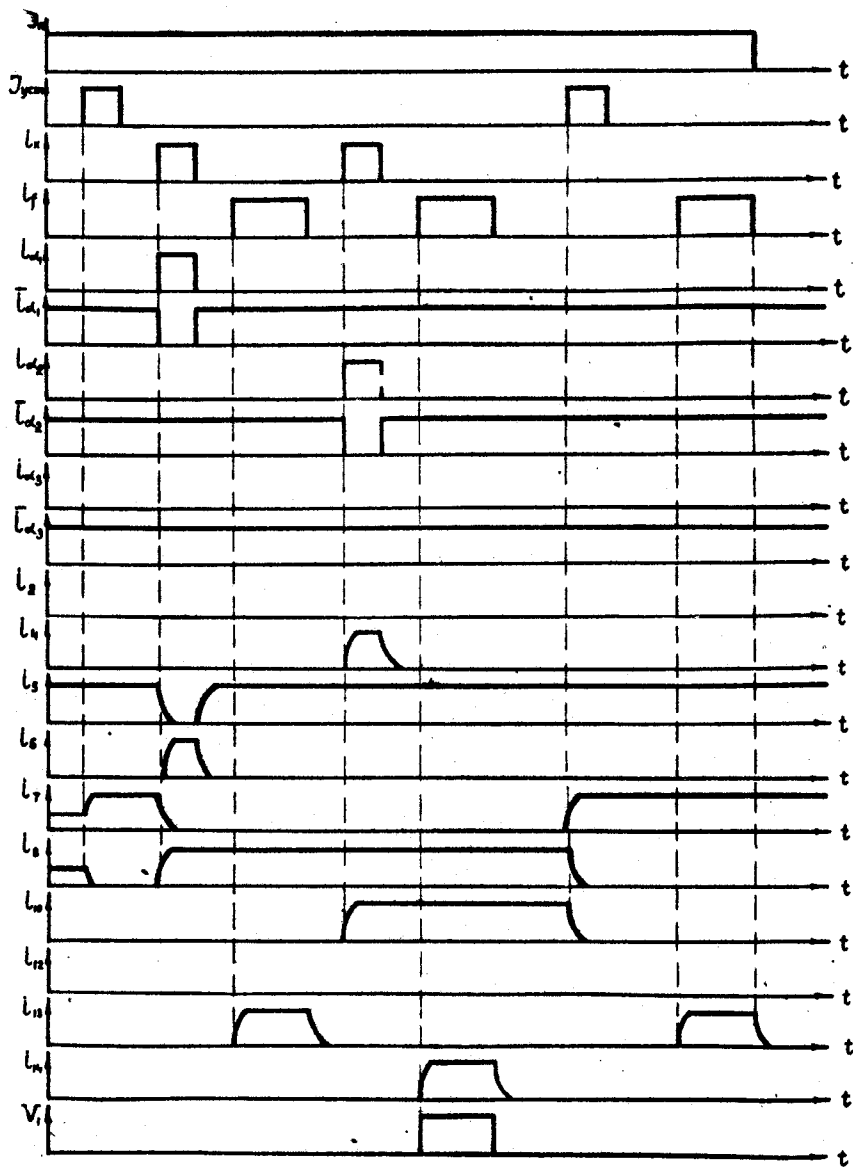
Работа УЭ происходит следующим образом: в исходном состоянии постоянный ток  $I_n$  протекает через параллельно соединенные сердечники криотронов схем  $I_1, I_2, I_3$  и через сердечники одиночных криотронов  $K_{15}, K_{19}, K_{22}$  контуров запоминания  $Z_1, Z_2, Z_3$ . При совпадении настроечных токов  $i_x$  и  $i_{\alpha_i}$  в данном контуре происходит срабатывание соответствующей схемы  $I_i$ , что приводит к выталкиванию тока  $I_n$  в соответствующую сверхпроводящую ветвь контура  $\alpha_i$ . Появление этого тока в одном из контуров  $\alpha_i$  (например, при срабатывании  $I_1$  в контуре  $\alpha_1$ ) вызывает разрушение сверхпроводимости сердечника криотрона  $K_{15}$ , что приводит к вытеснению тока в сверхпроводящую ветвь контура  $Z_1$  и к появлению сопротивления в сердечнике  $K_{16}$ . Это, в свою очередь, приводит к возникновению сопротивления между шинами  $\alpha-\alpha'$  и  $\delta-\delta'$  и, соответственно, к настройке элемента на реализацию соединительной функции типа "Д".

Снятие настроечных токов  $i_x, i_{\alpha_i}$  приводит к возврату в исходное состояние схемы  $I_i$ , но не изменяет состояния (протекания токов) в контуре  $Z_i$ .

Аналогичным образом можно настроить УЭ на выполнение требуемого соединения или логической функции. Для перестройки УЭ или возвращения его в исходное состояние в УЭ необходимо подать импульс установки  $I_{уст}$ . Поступление этого импульса приводит к срабатыванию схем  $I_i$  в контурах  $Z_1, Z_2, Z_3$  (в частности, схемы  $I_1$ , состоящей из криотронов  $K_{13}$  и  $K_{14}$  в контуре  $Z_1$ ), что заставляет  $I_n$  возвратиться в сердечник криотрона  $K_{15}$ . Временные диаграммы работы УЭ приведены на рис. 5.

Экспериментальное исследование УЭ, построенного из проводящих свинцово-оловянных криотронов, показало, что работоспособность его сохраняется в большом диапазоне изменения управляющих, питающих и настроечных токов. Так, например, правильная работа УЭ обеспечивается в следующем диапазоне токов:

1.  $i_x, i_{\alpha_i} = 250 \text{ ма} + 800 \text{ ма};$
2.  $I_n = 200 + 600 \text{ ма};$
3.  $i_f = 160 + 800 \text{ ма}.$



Повышенный диапазон изменения питающих и управляющих токов и тем самым большая надежность такого элемента объясняется тем, что, во-первых, весь  $\mathcal{I}_n$  вытесняется в одну единственную в данном контуре сверхпроводящую ветвь (это свойство также присуще и току в функциональном контуре, на который и накладываются наиболее жесткие допуски); во-вторых, работе УЭ такого типа не страшны наводки от токов в соседних элементах и от внешних помех, так как в контуре одна из ветвей имеет всегда конечное сопротивление, на котором затухает полностью наводка.

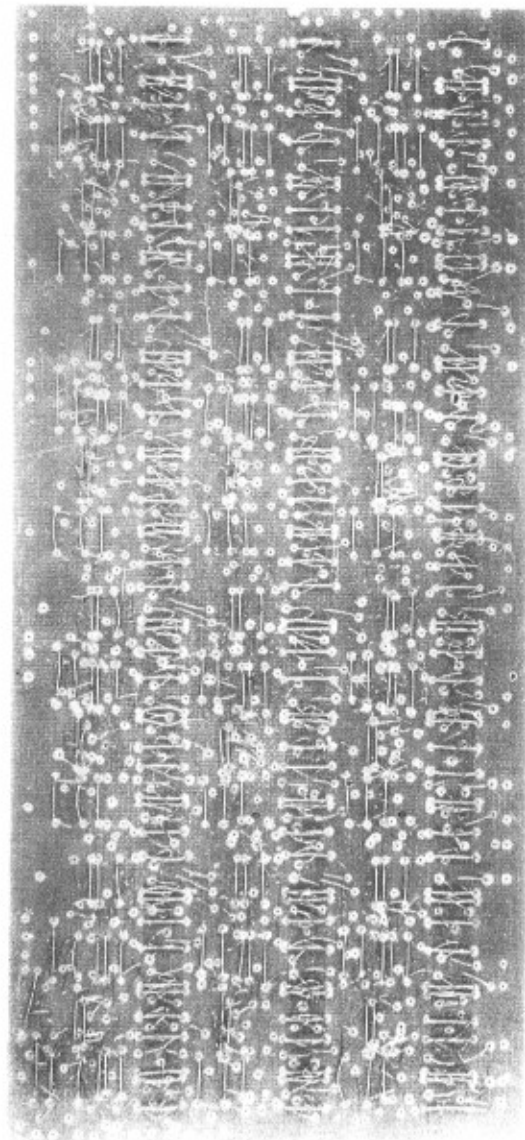
К числу недостатков УЭ такого типа относится сравнительно большое число криотронов (27 криотронов) и большее, примерно в 2 раза, число вводов.

Однако эти недостатки не уменьшают надежной работы УЭ и его достоинств. Кроме того, число кодовых шин, необходимых для настройки УЭ, можно уменьшить, вводя в криостат коды монарным образом и уже внутри криостата, пользуясь криотронными преобразователями, преобразовывать их в бинарный код, который можно использовать для настройки УЭ.

С целью экспериментальной проверки возможности построения ВС на УЭ такого типа были собраны платы ВС из 12 УЭ каждая. УЭ были собраны из проволочных свинцово-оловянных криотронов. Общий вид одной из таких плат показан на рис. 6. Во время экспериментальных исследований были проведены:

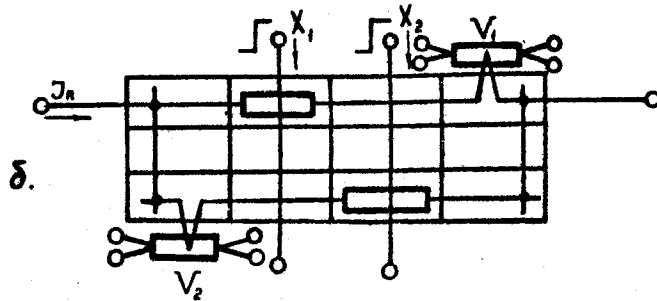
- а) настройка каждого из 12 элементов на реализацию трехуговой соединительной или логической функции;
- б) настройка всех 12 элементов платы ВС на реализацию функций простейших вычислительных устройств (триггера, схем "И", "ИЛИ" и т.д.);
- в) измерение диапазона изменения рабочих токов ВС, обеспечивающих правильную работу всех УЭ;
- г) снятие временных характеристик ВС.

На рис. 7 (а, б, в, г) показаны схемы настройки и соединения функциональных криотронов УЭ для случая реализации схемы триггера и схемы "И". Подача в схему  $\mathcal{I}_n$  настроечных кодов, а также входных логических переменных  $x_1$ ,  $x_2$  производится вручную посредством тумблеров из блока внешних коммутаторов. Входные сигналы поступают в криотронные части схемы в виде импульсов тока. Для индикации и контроля работы схемы включено 5 дополнительных криотронов, управляющие обмотки которых включены в I-й столбец и в каждую из 3 строк 12-элементарной матрицы, образованной УЭ. Считывание результата производится измерением напря-



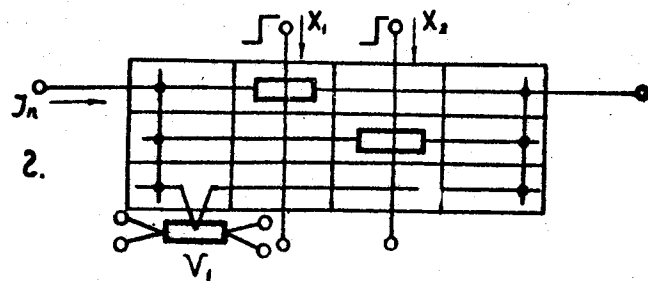
а.

P	f	D	P
D	D	D	D
P	D	f	P



в.

P	f	D	P
P	D	f	P
P	D	D	P



жения на индикаторных криотронах  $V_1$  и  $V_2$  (на рис.7 показано только два таких криотрона). Появление напряжения  $V_1$  или  $V_2$  читается как "единица" на соответствующем выходе схемы.

Экспериментальные результаты исследований показали правильную работу УЭ в ВС в довольно большом диапазоне изменения рабочих токов - от 250 ма до 600 ма.

В табл. 5 приведены экспериментальные данные зависимости времени переброса тока из одной ветви триггера (собранный на ВС из 12 УЭ (3x4) ) от величины тока функции  $i_f$  при  $i_f = I_n = I_{инд}$ .

Т а б л и ц а 5

$i_f$ (ма)	250	300	400	500	600
$t_{эксп}$ (мсек)	30	18	23	28	33
$T_{р.ф}$ (мсек)	20	14	16	22	31

Здесь  $t_{эксп}$  - экспериментально полученное значение времени переброса тока из одной ветви триггера в другую;  $T_{р.ф}$  - приближенное значение времени переброса тока из одной ветви триггера в другую, полученное операционным методом при расчете переходного процесса в ВС из 12 УЭ из соотношения:

$$T_{р.ф.} \approx 10 \tau_a \epsilon_n \frac{I_{инд.}}{i_{кр}}$$

где  $\tau_a$  - постоянная времени одиночного криотрона.

Из табл. 5 видно хорошее соответствие между экспериментальными и расчетными значениями времени переброса триггера. И если имеется небольшое расхождение между этими значениями, то его можно объяснить тем, что в расчетах не были учтены ни разброс параметров криотронов, ни индуктивность сердечников криотронов, ни линейность характеристик криотронов (так как считалось, что криотрон обладает строго релейной характеристикой) и т.д.

Проведенные исследования показали не только принципиальную, но и практическую пригодность криотронов для построения УЭ вычислительных сред. Они также подтвердили тот факт, что при построении схем на криотронах (первый вариант) нельзя решать эту задачу, исходя из простой аналогии криотрона с электромагнитным реле. Необходимо учитывать физические особенности, достоинства и недостатки криотронов и, умело используя первое, обходить второе, чтобы успешно использовать криотроны для построения элементов ВС.



Л и т е р а т у р а

1. Э.В.ЕВРЕЙНОВ. Теоретические основы построения вычислительных сред. - Вычислительные системы, вып. 16, 1965 г.
2. Д. БРЭМЕР. Сверхпроводящие устройства. Из-во "Мир", 1964 г.
3. H.L.Laquer. Cryogenics, 1963, vol.3, N 1, p.27
4. Я.С.КАН, И.Д.ВОЙТОВИЧ, В.А.РАХУБОВСКИЙ. Анализ криотронной запоминающей схемы со многими устойчивыми состояниями. - "Автоматика", № 6, 1966 г., стр. 65.

Поступила в редакцию  
I.XII-1968 г.