

## ВЫБОР МИНИМАЛЬНОЙ СОВОКУПНОСТИ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОИСКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ НЕКОТОРЫХ УСТРОЙСТВ ЦИКЛОТРОНА

Н. И. САБЛИН

(Представлена научным семинаром сектора автоматики и вычислительной техники  
НИИ ЯФЭА)

Задача анализа систем для целей рационального построения систем автоматического контроля работоспособности и поиска неисправностей (или методик того же назначения) распадается на 3 этапа:

1. Определение минимального объема информации, достаточной для заключения о работоспособности систем (контроль работоспособности систем).

2. Определение минимального объема информации, достаточной для выявления мест и причин неисправностей в системе (поиск неисправностей).

3. Оптимизация программ проверок, исходя из информации, полученной на первых двух этапах.

В работах [1, 2] был проведен анализ оборудования циклотрона с целью синтеза прибора автоматического контроля работоспособности и поиска неисправностей. В настоящей работе решается второй этап вышеуказанной задачи для некоторых устройств циклотрона. С этой целью для формализации процесса рассматриваемых устройств были построены по методике В. В. Карибского [3] на основе функциональных схем и понятия функциональной зависимости логические модели, позволяющие математически описать интересующие нас свойства анализируемых устройств. Далее на основе логических моделей были определены соответствующие минимальные совокупности контролируемых параметров.

### Высокочастотный генератор

Функциональная схема высокочастотного генератора представлена на рис. 1. Логическая модель генератора, построенная на основе функциональной схемы и понятия функциональной зависимости, представлена на рис. 2.

В логической модели приняты следующие обозначения блоков:

$Q_1 \div Q_5$  — соответственно 1, 2, 3, 4 и 5 каскады усиления высокой частоты;

$Q_6$  — второй каскад усилителя возбудителя;

$Q_7$  — первый каскад усилителя возбудителя;

$Q_8 \div Q_{10}$  — выпрямитель 2,5/1,25 кВ;

$Q_{11}$  — первый каскад задающего генератора;

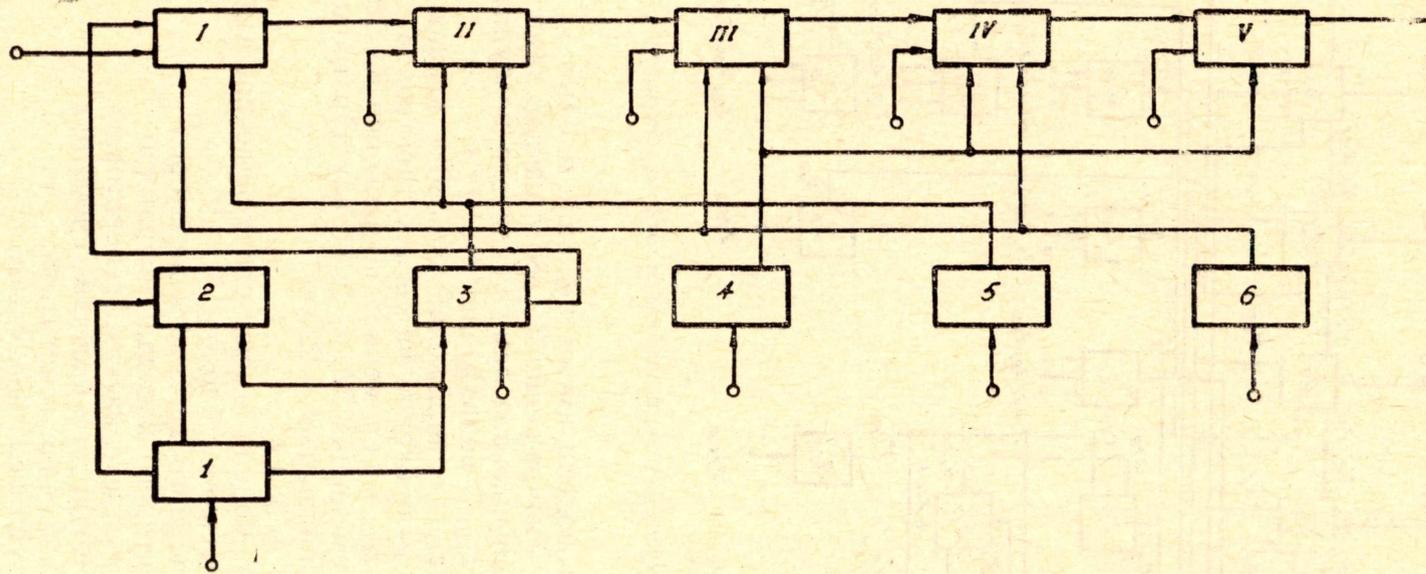


Рис. 1. Функциональная схема высокочастотного генератора. I, II, III, IV, V — мощные каскады высокочастотного генератора; 1 — выпрямитель задающего генератора и усилителя; 2 — усилитель; 3 — мощный выпрямитель 10/5 кВ; 4 — выпрямитель 2,5/1,25 кВ; 5 — выпрямитель на 400 В

- $Q_{12}$  — второй каскад задающего генератора;  
 $Q_{13} \div Q_{15}$  — выпрямитель возбудителя;  
 $Q_{16}$  — селеновый выпрямитель — 400 в;  
 $Q_{17}, Q_{18}$  — мощный выпрямитель 10/5 кВ.

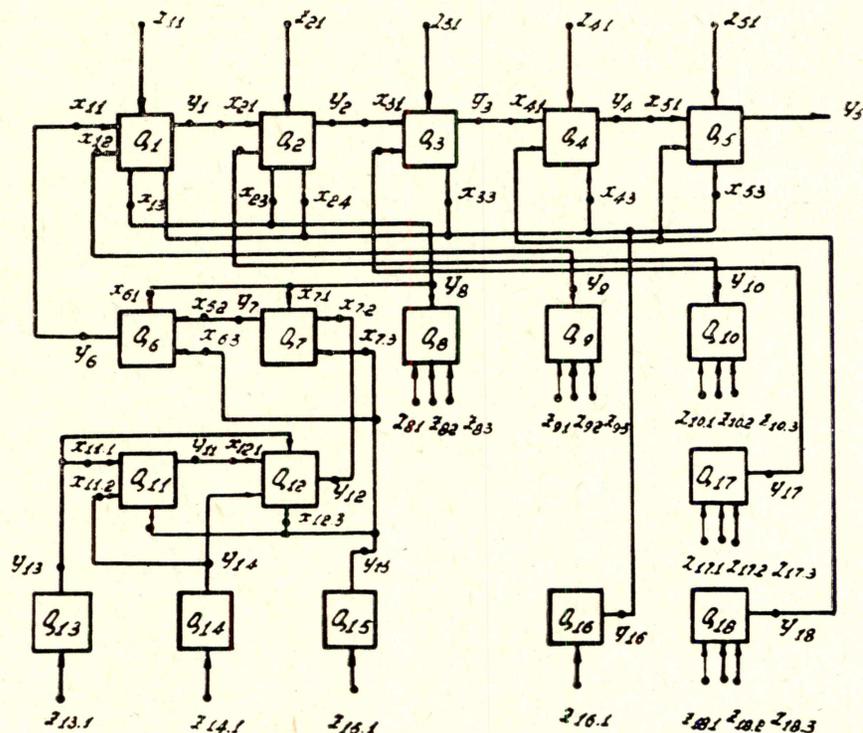


Рис. 2. Логическая модель высокочастотного генератора

Блоки логической модели имеют внешние входы  
 $z_{11}, z_{21}, z_3, z_{41}, z_{51}$  — напряжение  $3 \times 380$  в накала ламп генератора;  
 $z_{61}, z_{71}$  — напряжение накала ламп усилителя возбудителя;  
 $z_{81}, z_{91}, z_{10.1}, z_{17.1}, z_{18.1}$  — напряжение  $3 \times 10$  кВ;  
 $z_{82}, z_{92}, z_{10.2}, z_{17.2}, z_{18.2}$  — напряжение  $3 \times 380$  в накала тиратронов  
 и получения пикового напряжения на сетках тиратронов  $\sim 350$  в;  
 $z_{83}, z_{93}, z_{10.3}, z_{17.3}, z_{18.3}$  — переменное напряжение  $3 \times 220$  в для по-  
 лучения постоянного смещения 220 в на сетках тиратронов;  
 $z_{13.1}, z_{14.1}, z_{15.1}$  — напряжение  $\sim 220$  в;  
 $z_{16.1}$  — напряжение  $\sim 380$  в.

Блоки логической модели имеют следующие внешние и связан-  
 ные с ними внутренние входы блоков:

- $u_1 = x_{21}$  — выход первого каскада генератора;  
 $u_2 = x_{31}$  — выход второго каскада генератора;  
 $u_3 = x_{41}$  — выход третьего каскада генератора;  
 $u_4 = x_{51}$  — выход четвертого каскада генератора;  
 $u_5$  — выход пятого каскада генератора;  
 $u_6 = x_{11}$  — выход усилителя-возбудителя;  
 $u_7 = x_{62}$  — выход первого каскада усилителя-возбудителя;  
 $u_8 = x_{13} = x_{23} = x_{61} = x_{71}$  — постоянное напряжение 600 в для пи-  
 тания экранных сеток ламп генератора и анодов ламп усилителя;  
 $u_9 = x_{12}$  — анодное напряжение 1,25 кВ первого каскада гене-  
 ратора;  
 $u_{10} = x_{22}$  — анодное напряжение 2,5 кВ второго каскада генератора;

$U_{11} = x_{12.1}$  — выход первого каскада задающего генератора;  
 $U_{12} = x_{72}$  — выход второго каскада задающего генератора;  
 $U_{13} = x_{11.1} = x_{12.4}$  — стабилизированное напряжение 250 в для питания анодов ламп задающего генератора;  
 $U_{14} = x_{11.2} = x_{12.2}$  — напряжение 12,6 в канала ламп;  
 $U_{15} = x_{11.3} = x_{12.3} = x_{63} = x_{73}$  — постоянное напряжение 250 в для питания экранных сеток усилителя и генератора;  
 $U_{16} = x_{14} = x_{24} = x_{33} = x_{43}$  — постоянное напряжение смещения — 400 в управляющих сеток генератора;  
 $U_{17} = x_{32}$  — анодное напряжение 5 кв третьего каскада генератора;  
 $U_{18} = x_{52} = x_{42}$  — напряжение 10 кв. Условимся недопустимые значения входных и выходных сигналов обозначать нулем, а допустимые — единицей.

Для определения минимальной совокупности контролируемых параметров генератора, необходимой для поиска единичной неисправности, выделим совокупность обязательных контролируемых параметров и построим таблицу неисправностей. Таблица неисправностей (табл. 1) была построена исходя из следующих условий работоспособности блоков логической модели:

$$\begin{array}{ll}
 y_1 = Q_1 z_{11} y_6 y_8 y_9 y_{16}, & y_{10} = Q_{10} z_{10.1} z_{10.2} z_{10.3}, \\
 y_2 = Q_2 z_{21} y_1 y_8 y_{10} y_{16}, & y_{11} = Q_{11} y_{13} y_{14} y_{15}, \\
 y_3 = Q_3 z_{31} y_2 y_{16} y_{17}, & y_{12} = Q_{12} y_{11} y_{13} y_{14} y_{15}, \\
 y_4 = Q_4 z_{41} y_3 y_6 y_{18}, & y_{13} = Q_{13} z_{13.1}, \\
 y_5 = Q_5 z_{51} y_4 y_{16} y_{18}, & y_{14} = Q_{14} z_{14.1}, \\
 y_6 = Q_6 z_{61} y_7 y_8 y_{15}, & y_{15} = Q_{15} z_{15.1}, \\
 y_7 = Q_7 z_{71} y_8 y_{12} y_{15}, & y_{16} = Q_{16} z_{16.1}, \\
 y_8 = Q_8 z_{81} z_{82} z_{83}, & y_{17} = Q_{17} z_{17.1} z_{17.2} z_{17.3}, \\
 y_9 = Q_9 z_{91} z_{92} z_{93}, & y_{18} = Q_{18} z_{18.1} z_{18.2} z_{18.3}.
 \end{array}$$

Анализ логической модели генератора позволил выделить совокупность

$$\{y_1; y_2; y_3; y_4; y_5; y_6; y_7; y_9; y_{10}; y_{11}; y_{12}; y_{17}\} \quad (1)$$

обязательных контролируемых параметров (выходов), так как неисправности соответствующих им блоков отличимы только на указанных выходах. Для определения других контролируемых параметров выделим в табл. 1 столбцы, соответствующие обязательным выходам. Сравнивая строки (просматривая только выделенные столбцы), выпишем все пары символов (номеров) блоков, неисправности которых неотличимы одна от другой на обязательных выходах, и запишем для каждой такой пары логические суммы символов выходов, на которых они отличимы:

$$\begin{array}{l}
 Q_1 \text{ от } Q_{16} y_{16}, \\
 Q_4 \text{ от } Q_{18} y_{18}, \\
 Q_7 \text{ от } Q_8 y_8, \\
 Q_{11} \text{ от } Q_{13} y_{13}, \\
 Q_{13} \text{ от } Q_{14} y_{13} U y_{14}, \\
 Q_{14} \text{ от } Q_5 y_{14} U y_{15}.
 \end{array}$$

Составив логическое произведение, в которое войдут совокупности обязательных контролируемых параметров и параметров системы (1), ис-



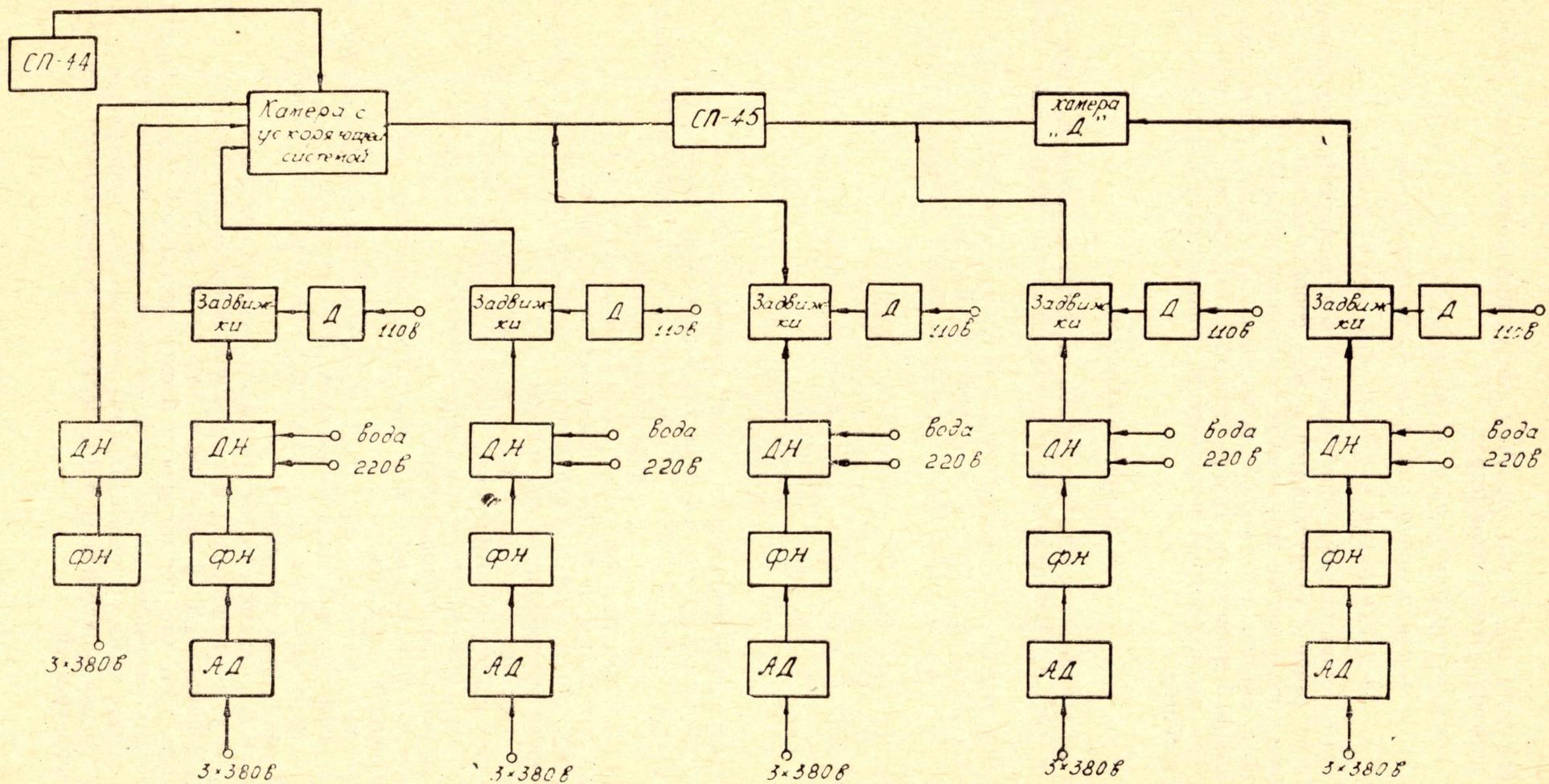


Рис. 3. Функциональная схема вакуумной системы циклотрона. ФН — форвакуумные насосы, ДН — диффузионные насосы, АД — асинхронные двигатели, Д — двигатели постоянного тока

ключив сумму ( $y_{13} U y_{14}$ ), получим следующие минимальные совокупности контролируемых параметров.

$$\begin{aligned} & y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_7 y_9 y_{10} y_{11} y_{12} y_{17} y_{16} y_{18} y_8 y_{13} (y_{14} U y_{15}) = \\ & = y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_7 y_8 y_9 y_{10} y_{11} y_{12} y_{13} y_{14} y_{16} y_{17} y_{18} U \\ & y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_7 y_8 y_9 y_{10} y_{11} y_{12} y_{13} y_{15} y_{16} y_{17} y_{18}. \end{aligned}$$

Из двух минимальных совокупностей контролируемых параметров, равных по длине и отличающихся между собой параметрами  $y_{14}$  и  $y_{15}$ , выбираем совокупность, техническая реализация которой проще. Более простой в смысле технической реализации оказалась совокупность, содержащая параметр  $y_{15}$  (напряжение 250 в), так как при контроле параметра  $y_{14}$  необходимо использовать дополнительное выпрямительное устройство.

### Вакуумная система

Функциональная схема вакуумной системы циклотрона представлена на рис. 3. Логическая модель вакуумной системы представлена на рис. 4.

В логической модели приняты следующие обозначения блоков:  
 $Q_1; Q_6; Q_{11}; Q_{16}; Q_{21}; Q_{26}$  — форвакуумные насосы;  
 $Q_2; Q_7; Q_{12}; Q_{17}; Q_{22}; Q_{27}$  — электродвигатели форвакуумных насосов;

$Q_3; Q_8; Q_{13}; Q_{18}; Q_{23}$  — вакуумные задвижки;  
 $Q_4; Q_9; Q_{14}; Q_{19}; Q_{24}$  — привод задвижек;  
 $Q_5; Q_{10}; Q_{15}; Q_{20}; Q_{25}$  — диффузионные насосы;  
 $Q_{28}$  — камера;  
 $Q_{29}$  — ионопровод;  
 $Q_{30}$  — камера „Д“.

Блоки логической модели имеют внешние выходы:

$z_{51}; z_{10.1}; z_{15.1}; z_{20.1}; z_{25.1}$  — вода для охлаждения задвижек;

$z_{52}; z_{10.2}; z_{15.2}; z_{20.2}; z_{25.2}$  — напряжение для питания нагревателей диффузионных насосов;

$z_{41}; z_{91}; z_{14.1}; z_{19.2}; z_{24.1}$  — постоянное напряжение 110 в;

$z_{21}; z_{71}; z_{12.1}; z_{17.1}; z_{22.1} z_{27.1}$  — напряжение  $3 \times 380$  в.

Блоки логической модели имеют следующие внешние и связанные с ними внутренние входы блоков:

$y_1 = x_{28.2}; y_6 = x_{51}; y_{11} = x_{10.1}; y_{16} = x_{15.1}; y_{21} = x_{20.1}; y_{26} = x_{25.1}$  — исправная работа форвакуумных насосов (вакуум  $10^{-3}$  мм рт. ст.);

$y_2 = x_{11}; y_7 = x_{61}; y_{12} = x_{11.1}; y_{17} = x_{16.1}; y_{22} = x_{21.1}; y_{27} = x_{26.1}$  — исправная работа приводов насосов;

$y_4 = x_{31}; y_9 = x_{81}; y_{14} = x_{13.1}; y_{19} = x_{18.1}; y_{24} = x_{23.1}$  — исправная работа приводов задвижек;

$y_5 = x_{32}; y_{10} = x_{82}; y_{15} = x_{13.2}; y_{20} = x_{18.2}; y_{25} = x_{23.2}$  — исправная работа диффузионных насосов (вакуум  $10^{-5}$  мм рт. ст.)

$y_3 = x_{28.1}; y_8 = x_{28.3}; y_{13} = x_{29.2}; y_{18} = x_{29.1}; y_{23} = x_{30.1}$  — исправная работа вакуумных задвижек;

$y_{28} = x_{29.1}$  — камера в вакуумном отношении исправна;

$y_{29} = x_{30.1}$  — ионопровод в вакуумном отношении исправен;

$y_{30}$  — камера „Д“ в вакуумном отношении исправна.

Ввиду того, что неисправности блоков логической модели вакуумной системы отличимы только на их выходах (так как выход каждого блока связан только с одним блоком), все выходы (параметры) логической модели вакуумной системы являются обязательными для поиска неисправностей.

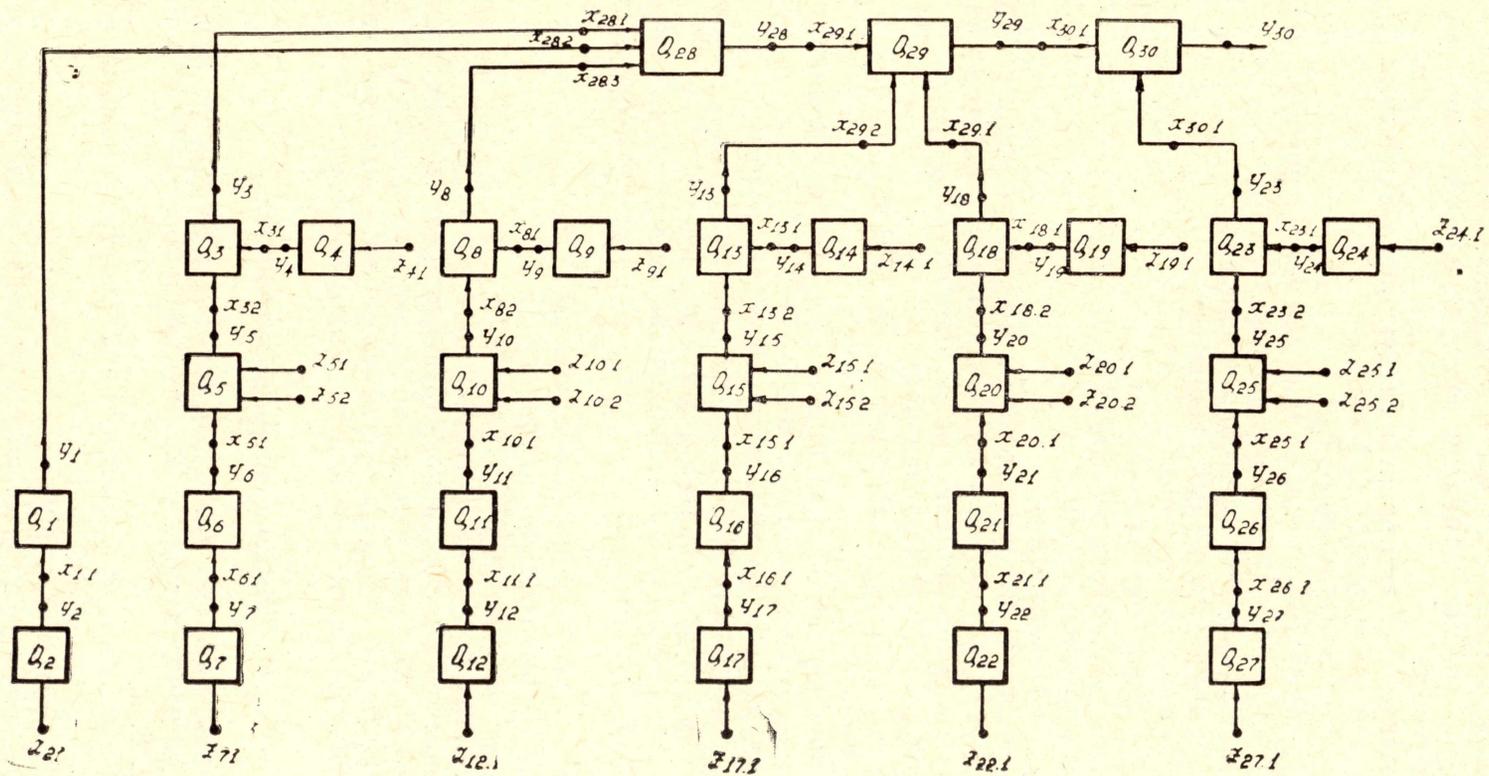


Рис. 4. Логическая модель вакуумной системы циклотрона

## Система охлаждения

Упрощенная функциональная схема системы охлаждения представлена на рис. 5.

Логическая модель системы охлаждения, построенная на основе функциональной схемы и понятия функциональной зависимости, представлена на рис. 6.

В логической модели приняты следующие обозначения блоков:

$Q_1$  — электромагнит СП-44;

$Q_2$  — охладитель воздуха;

$Q_3$  — вентилятор охлаждения электромагнита СП-44;

$Q_4, Q_{11}$  — центробежные насосы;

$Q_5$  — камера с ускорительной системой;

$Q_6$  — высокочастотный генератор;

$Q_7$  — поворотные линзы;

$Q_8$  — диффузионные насосы;

$Q_9$  — водоводяной охладитель;

$Q_{10}$  — сливные баки;

$Q_{12}$  — дистилляторы;

$Q_{13}$  — анодные сопротивления высокочастотного генератора;

$Q_{14}$  — вентилятор охлаждения анодных сопротивлений.

Блоки логической модели имеют внешние входы:

$z_{21}; z_{12.1}$  — водопроводная вода;

$z_{32}; z_{41}; z_{12.2}; z_{14.2}$  — напряжение  $3 \times 380$  в;

$z_{31}; z_{14.1}$  — воздух.

Блоки логической модели имеют следующие внешние и связанные с ними внутренние входы блоков:

$y_1$  — температура электромагнита СП-44 в норме;

$y_2 = x_{11}$  — исправная работа охладителя (воздух охлаждения);

$y_3 = x_{21}; y_{14} = x_{13.1}$  — вентиляторы исправны;

$y_4 = x_{51} = x_{61} = x_{71} = x_{81}$  — центробежные насосы исправны;

$y_5 = x_{91}; y_6 = x_{92}; y_7 = x_{93}; y_8 = x_{94}$  — соответствующие блоки охлаждены;

$y_9 = x_{10.1}$  — водоводяной охладитель исправен;

$y_{10} = x_{41}$  — сливные баки исправны;

$y_{12} = x_{11.1}$  — дистилляторы исправны;

$y_{13}$  — температура анодных сопротивлений в норме.

Из логической модели видно, что неисправности всех блоков логической модели отличимы только на их выходах, следовательно, все выходы (параметры) блоков логической модели системы охлаждения являются обязательными для поиска неисправностей.

## Компенсационные устройства

Функциональная схема компенсационных устройств представлена на рис. 7. Логическая модель компенсационных устройств представлена на рис. 8.

В логической модели введены имеющиеся обозначения блоков

$Q_1$  — модулятор;

$Q_2$  — усилитель переменного тока;

$Q_3$  — фазочувствительный усилитель (демодулятор);

$Q_4$  — генератор синусоидальных колебаний;

$Q_5 \div Q_7$  — блоки питания;

$Q_8 \div Q_{10}$  — тиратронный выпрямитель.

Блоки логической модели имеют внешние входы:

$z_{11}$  — напряжение рассогласования;

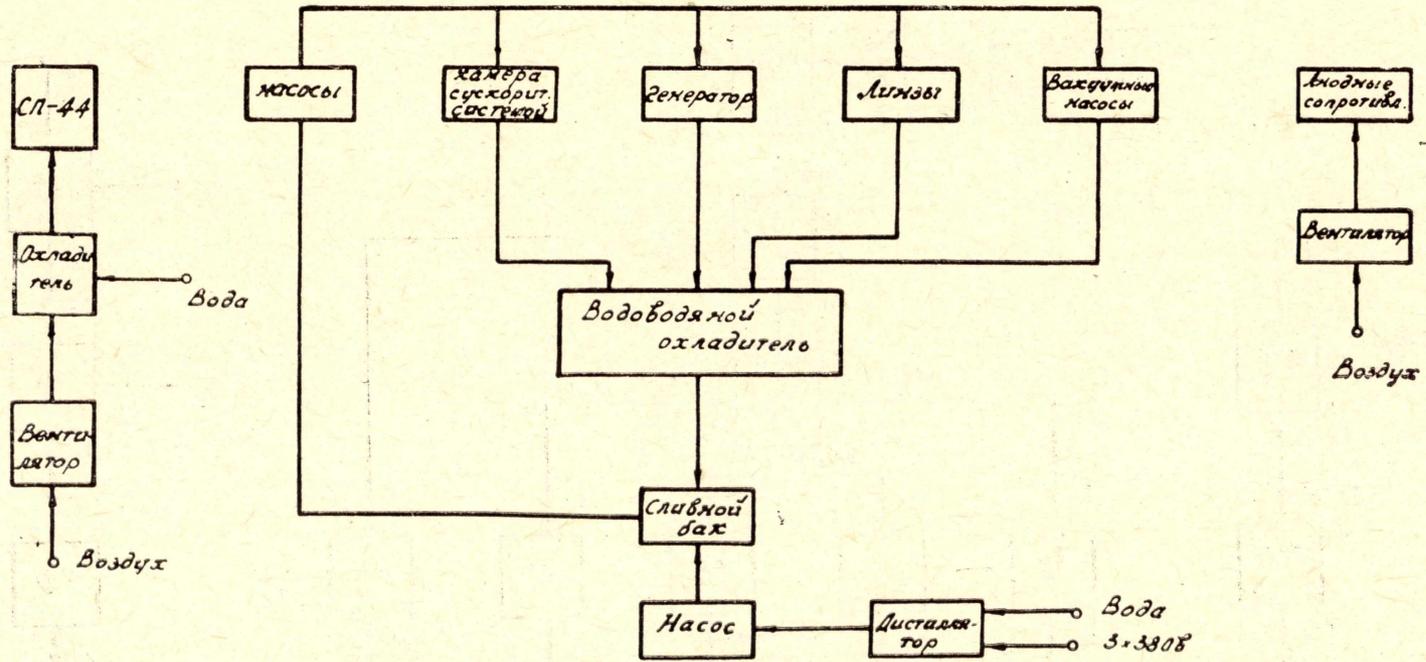


Рис 5. Упрощенная функциональная схема системы охлаждения циклотрона

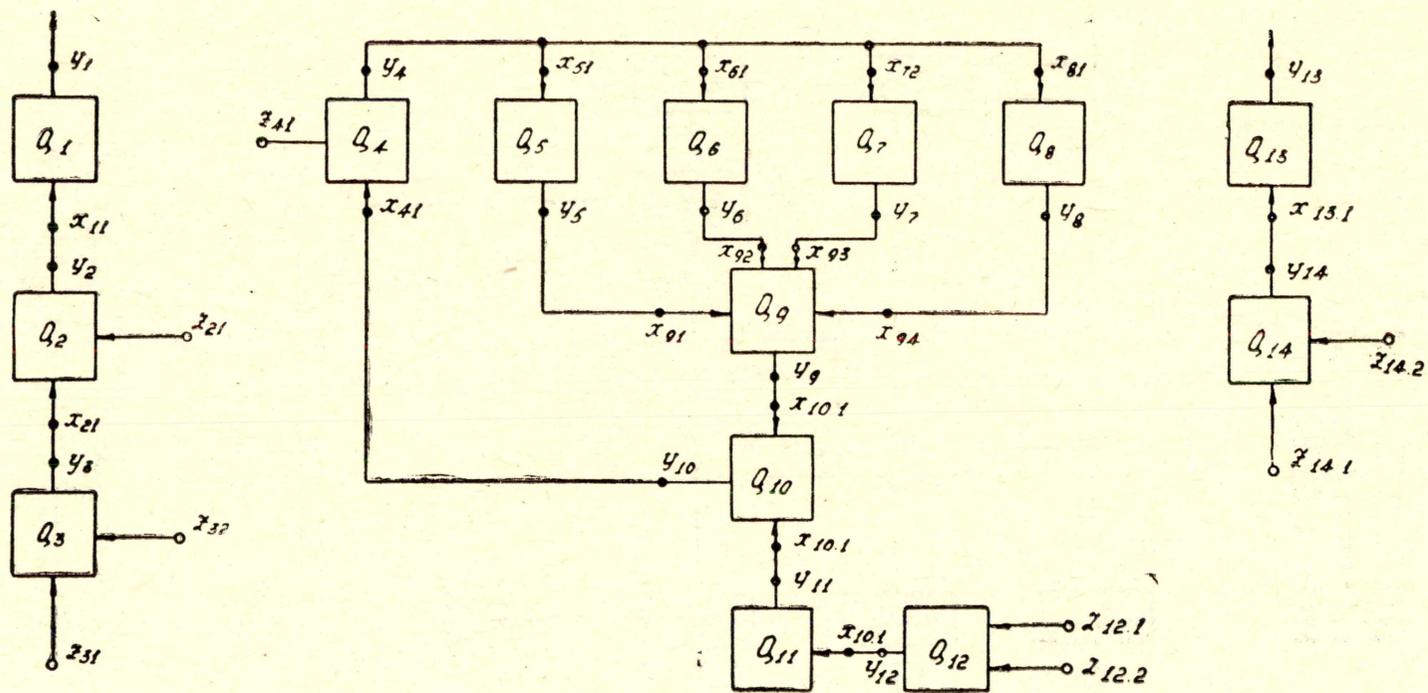


Рис. 6. Логическая модель системы охлаждения циклотрона

$z_{51}; z_{61}; z_{71}$  — напряжение 220 в;  
 $z_{81}; z_{91}; z_{10.1}$  — напряжение накала тиратронов;  
 $z_{82}; z_{92}; z_{10.2}$  — переменное напряжение 1000 в.

Блоки логической модели имеют следующие выходы и связанные с ними внутренние входы:

$y_1 = x_{21}$  — преобразованное напряжение;  
 $y_2 = x_{31}$  — напряжение с выхода усилителя переменного тока;

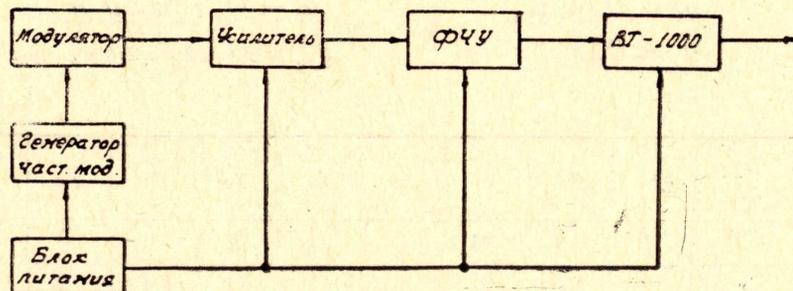


Рис. 7. Функциональная схема компенсационного устройства циклотрона. ФЧУ — фазочувствительный детектор, ВТ-1000 — тиратронный выпрямитель на 1000 в

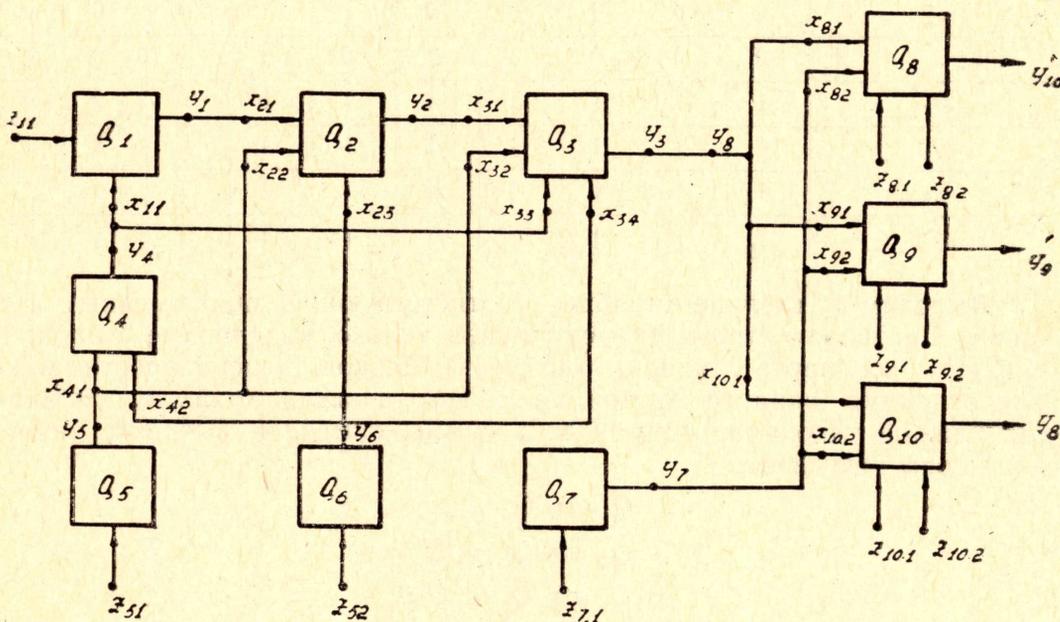


Рис. 8. Логическая модель компенсационного устройства

$y_3 = x_{81} = x_{91} = x_{10.1}$  — напряжение с выхода фазочувствительного усилителя;

$y_4 = x_{11} = x_{33}$  — синусоидальное напряжение генератора;

$y_5 = x_{41} = x_{22} = x_{32}$  — напряжение накала ламп = 6,3 в;

$y_6 = x_{42} = x_{23} = x_{34}$  — напряжение анодного питания 300 в;

$y_7 = x_{82} = x_{92} = x_{10.2}$  — напряжение смещения тиратронов;

$y_8, y_9, y_{10}$  — выходное напряжение тиратронного выпрямителя.

Из логической модели компенсационного устройства выделим совокупность обязательных контролируемых параметров. Такими параметрами являются следующие выходы логических блоков:

$\{y_1; y_2; y_8; y_9; y_{10}\}$ .

Остальные выходы минимальной совокупности контролируемых параметров определим из таблицы неисправностей (табл. 2) компенсационного устройства. Таблица неисправностей была построена, исходя из следующих уравнений работоспособности блоков:

$$\begin{aligned} y_1 &= Q_1 z_{11} y_4, & y_6 &= Q_6 z_{61}, \\ y_2 &= Q_2 y_1 y_5 y_6, & y_7 &= Q_7 z_{71}, \\ y_3 &= Q_3 y_2 y_4 y_5 y_6, & y_8 &= Q_8 z_{81} z_{82} y_3 y_7, \\ y_4 &= Q_4 y_5 y_6, & y_9 &= Q_9 z_{91} z_{92} y_3 y_7, \\ y_5 &= Q_5 z_{51}, & y_{10} &= Q_{10} z_{10,1} z_{10,2} y_3 y_7. \end{aligned}$$

Таблица 2

$Q_i \backslash y_j$	$y_1$	$y_2$	$y_3$	$y_4$	$y_5$	$y_6$	$y_7$	$y_8$	$y_9$	$y_{10}$
$Q_1$	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0
$Q_2$	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0
$Q_3$	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0
$Q_4$	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
$Q_5$	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0
$Q_6$	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
$Q_7$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
$Q_8$	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
$Q_9$	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
$Q_{10}$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Выделим в таблице столбцы, соответствующие обязательным выходам. Сравнивая строки (просматривая только выделенные столбцы), выпишем все пары символов (номеров) блоков, неисправности которых отличимы одна от другой на обязательных выходах, и запишем для каждой такой пары логические суммы символов выходов, на которых они отличимы:

$$\begin{aligned} Q_1 &\text{ от } Q_4 \ y_4, \\ Q_1 &\text{ от } Q_5 \ y_4 \cup y_5, \\ Q_1 &\text{ от } Q_6 \ y_4 \cup y_6, \\ Q_3 &\text{ от } Q_7 \ y_3 \cup y_7, \\ Q_4 &\text{ от } Q_5 \ y_5, \\ Q_5 &\text{ от } Q_6 \ y_5 \cup y_6. \end{aligned}$$

Из записанных сумм видно, что выходы четвертого, пятого и шестого блоков обязательны. Поэтому вторую  $y_4 \cup y_5$  и третью  $y_4 \cup y_6$  суммы из дальнейшего рассмотрения можно исключить.

Тогда все неисправности будут отличаться друг от друга на следующих наборах выходов:

$$\begin{aligned} & y_1 y_2 y_8 y_9 y_{10} y_4 y_5 y_6 (y_3 \cup y_7) = \\ & = y_1 y_2 y_3 y_4 y_5 y_6 y_8 y_9 y_{10} \cup y_1 y_2 y_4 y_5 y_6 y_7 y_8 y_9 y_{10}. \end{aligned}$$

Обе совокупности параметров одинаковы по длине, однако более удобен для контроля параметр  $y_7$  (напряжение смещения тиратро-

нов). Поэтому необходимо остановиться на следующей минимальной совокупности:

$Y_1; Y_2; Y_4; Y_5; Y_6; Y_7; Y_8; Y_9; Y_{10}$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. И. Саблин. Логическая модель циклотрона для анализа оборудования ускорителя для целей автоматического контроля работоспособности и поиска неисправностей. Изв. ТПИ, т. 193, изд-во ТГУ, 1972.

2. Н. И. Саблин. Синтез прибора автоматического контроля работоспособности и автоматического поиска неисправностей для циклотрона НИИ ЯФЭА при ТПИ. Изв. ТПИ, т. 193, изд-во ТГУ, 1972.

3. В. В. Карбский. Анализ систем для контроля работоспособности и диагностики неисправностей. Автоматика и телемеханика. XXVI, 2, 1965.