

УДК 519.95

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КРИОТРОННОГО АВТОМАТА НА ЦВМ

С.М. Ачасова

В статье [1] показано, что о надежной работе асинхронных автоматов, реализованных в криотронной вычислительной среде, можно судить по так называемой динамической оценке надежности. За динамическую оценку надежности принимается область устойчивости стационарных состояний автомата. В данной работе отыскивается такая оценка для асинхронного автомата, граф состояний которого изображен на рис. 1.

Автомат реализован схемой с каскадной обратной связью (рис. 2) по методу, описанному в [2].
Динамические процессы, происходящие в автомате, изучались с помощью ЦВМ.

I. Дифференциальные уравнения для схемы на рис. 2 имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= \frac{R}{2L} \left[(1-x_1)(f_1+f_8) - x_1(f_5+f_6) \right], \\ \frac{dx_2}{dt} &= \frac{R}{2L} \left[(1-x_2)(f_{11}+f_{12}) - x_2(f_9+f_{10}) \right], \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{R}{8L} \left[(1-x_3-x_4-x_5)(f_4+f_a) - \right. \\ &\quad \left. - 3x_3(f_1+f_a) + x_4(f_2+f_{\bar{a}}) - x_5(f_{\bar{a}}) \right], \end{aligned} \right\} (I)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_4}{dt} &= \frac{R}{8L} \left[(1-x_3-x_4-x_5)(f_4+f_a) + \right. \\ &\quad \left. + x_3(f_1+f_a) - 3x_4(f_2+f_{\bar{a}}) + x_5(f_3+f_{\bar{a}}) \right], \\ \frac{dx_5}{dt} &= \frac{R}{8L} \left[(1-x_3-x_4-x_5)(f_4+f_a) + \right. \\ &\quad \left. + x_3(f_1+f_a) + x_4(f_2+f_{\bar{a}}) - 3x_5(f_3+f_{\bar{a}}) \right]. \end{aligned} \right\} (I)$$

Введены безразмерные величины:

$$x_j = \frac{i_j}{J_0} \quad (j = 1, \dots, 5);$$

$$f_i = f_i(x_c, x_g) = \frac{R_i(x_c, x_g)}{R} \quad (i = 1, \dots, 12);$$

$$f_a = \frac{R_a}{R}, \quad f_{\bar{a}} = \frac{R_{\bar{a}}}{R};$$

- J_0 - ток питания;
- i_j ($j = 1, \dots, 5$) - токи в схеме (рис. 2);
- R_i - сопротивление вентиля i -го криотрона;
- R - сопротивление вентиля криотрона в нормальном состоянии;
- x_c - сеточный ток криотрона;
- x_g - вентильный ток криотрона.

Система (I) интегрировалась на ЦВМ методом Рунге-Кутты.

II. Рассматриваются две модели автомата, которые различаются между собой представлениями функции $f = f(x_c, x_g)$ - сопротивления вентиля криотрона.

Для первой модели f имеет вид (рис. 3):

$$f = (\arctg(\gamma(X-\beta))) / \pi + 0,5, \quad (2)$$

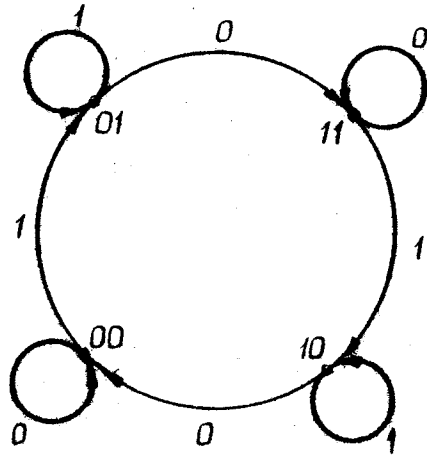


Рис. 1.

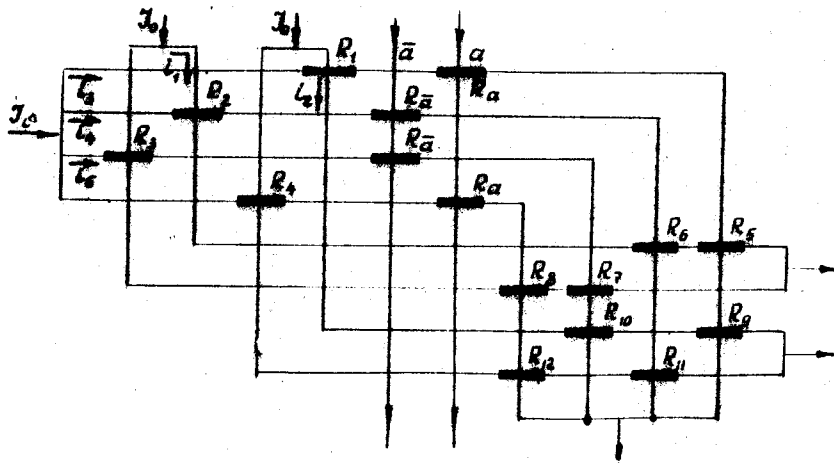


Рис. 2.

где

$$X = x_c + \alpha x_g,$$

$$\gamma = \frac{df}{dX} / X = \beta,$$

$\alpha = \frac{di_c}{di_g} / i_c = i_{cc}$ - величина, обратная дифференциальному коэффициенту усиления криотрона (i_{cc} - критический ток сетки криотрона).

$\beta = i_{cc} / J_0$ - величина, обратная эффективному коэффициенту усиления криотрона.

Во второй модели сопротивление вентиля представляется релейной функцией (рис. 4):

$$f = \begin{cases} 0, & \text{если } x_c + \alpha x_g < \beta; \\ 1, & \text{если } x_c + \alpha x_g \geq \beta; \end{cases} \quad (3)$$

В последнем случае пространство переменных $t, x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ линиями переключения $x_c + \alpha x_g = \beta$ разделяется на некоторое количество областей, в каждой из которых система (I) линейна. На каждом шаге интегрирования системы (I) проверялось, в какой именно из областей линейности находится в заданный момент времени точка с координатами, вычисленными на предыдущем шаге.

III. По результатам интегрирования для разных начальных значений токов x_1, \dots, x_5 построены проекции фазовых траекторий на плоскость переменных x_1, x_2 , по которым производится индикация состояний автомата. Несколько фазовых портретов для входного сигнала $a = 0, \bar{a} = 1$ приведено на рис. 5, 6, 7, 8. Рисунки 5, 7 относятся к первой модели, рисунки 6, 8 - ко второй. При входном воздействии $a = 0, \bar{a} = 1$ устойчивыми состояниями являются $(x_1 = 1, x_2 = 1)$ и $(x_1 = 0, x_2 = 0)$. При других входных сигналах $a = 1, \bar{a} = 0$ устойчивые состояния - $(x_1 = 1, x_2 = 0)$ и $(x_1 = 0, x_2 = 1)$. Все процессы при этом аналогичны приведенным на рис. 5-8. Анализ результатов интегрирования показал, что, кроме состояний, указанных на графе автомата, могут появиться нежелательные состояния. Так, при $\beta > 0,33$ возникает так называемые "мертвые зоны". Они видны на рис. 7, 8; переходный процесс заканчивается в точке, удаленной от заданных устойчивых состояний.

При $0,25 < \beta < 0,33$, кроме "мертвой зоны", может появиться устойчивое состояние $x_1 = x_2 = 0,5$. При $\beta < 0,25$ остается опас-

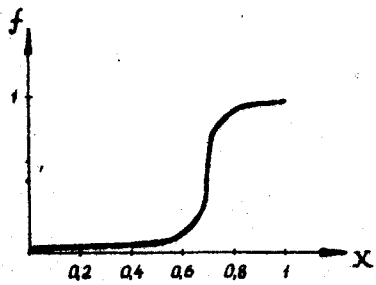


Рис. 3.

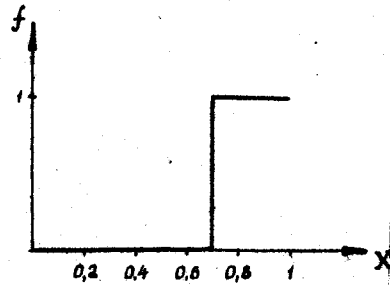


Рис. 4.

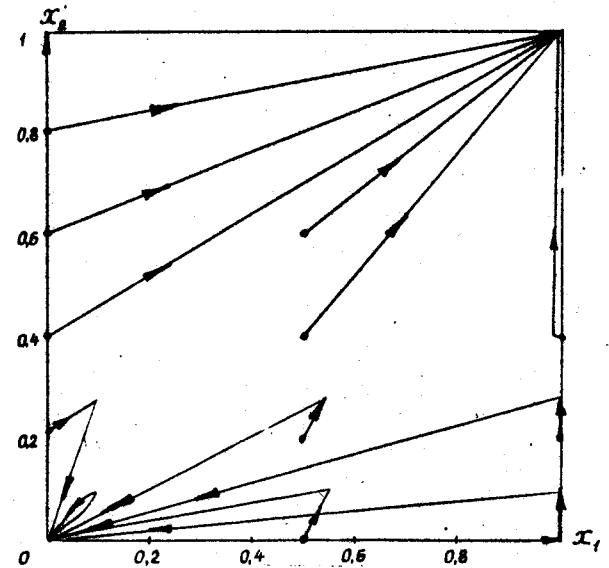


Рис. 6.

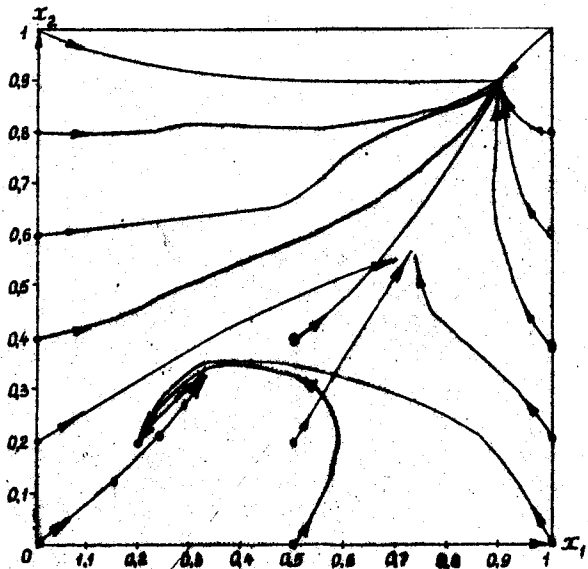


Рис. 5.

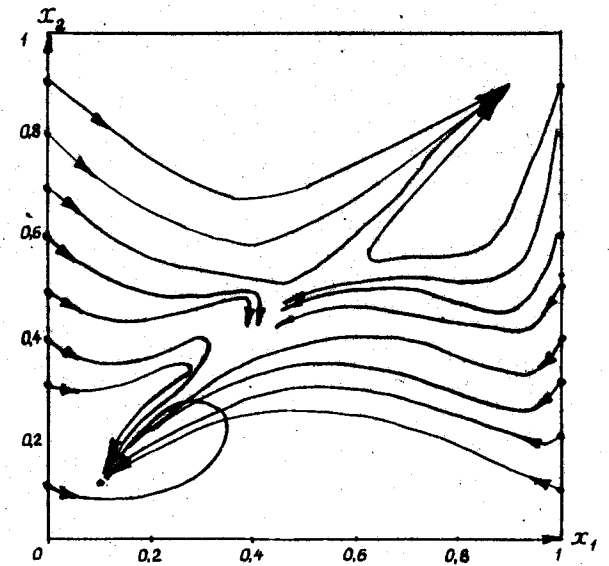


Рис. 7.

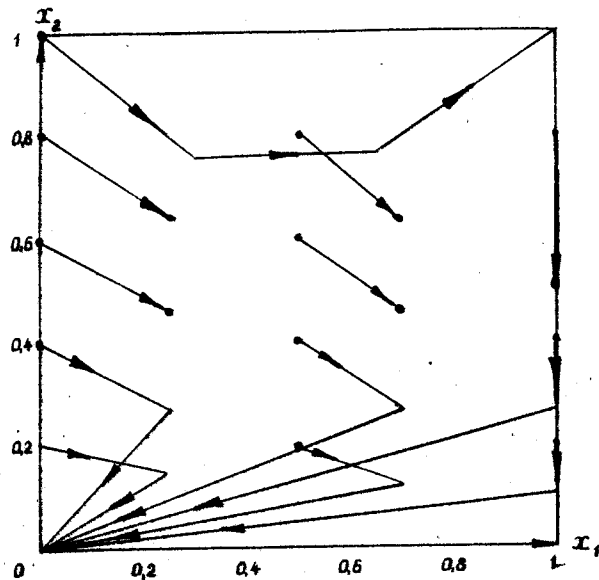


Рис. 8.

ность появления только одного нежелательного состояния $x_1 = x_2 = 0,5$.

Как и для автомата, описываемого системой второго порядка, анализ которого производился в [1], области устойчивости заданных состояний для нашего автомата при $\alpha = 0$ целиком определяются параметром β . При $\beta < \frac{1}{2}$ они составляют $\Delta x = \beta$, а при $\beta > \frac{1}{2}$ $\Delta x = 1 - \beta$. Как уже было сказано, величина области устойчивости стационарных состояний Δx принята за динамическую оценку надежности автомата. Приемлемой величиной считается $\Delta x = 0,3$ (см. [1]). При $\alpha > 0$ величина Δx изменяется по сравнению с $\Delta x = \beta$ или $\Delta x = 1 - \beta$ при $\alpha = 0$. При $\beta < \frac{1}{2}$ и $\alpha > 0$ $\Delta x < \beta$ при $\beta > \frac{1}{2}$ и $\alpha = 0$, начиная с некоторого значения α , Δx увеличивается. Эти результаты приведены на рис. 9. В плоскости параметров α, β изображены кривые, ограничивающие области параметров α, β , при которых Δx не меньше заданной величины.

IV. В результате вычислений построена кривая зависимости времени перехода автомата из одного состояния в другое от параметра β (рис. 10). Считалось [1], что переход закончен, если изображающая точка в фазовом пространстве достигла середины области устойчивости. Из рис. 10 видно, что минимальное время перехода при $\beta = 0,5$ в 8 раз больше, чем постоянная времени криотрона $\tau = \frac{L}{R}$.

У. Чтобы при интегрировании системы (1) не делать большого перебора начальных условий, удобно их задавать следующим образом.

Для определения области устойчивости стационарного состояния автомата достаточно задавать начальные значения координат в фазовом пространстве в окрестности этого состояния. Эта окрестность равна β при $\beta < \frac{1}{2}$ и $1 - \beta$ при $\beta > \frac{1}{2}$. Каждое состояние автомата можно задавать двоичным числом, для нашего автомата это число пятизначное. Например, состояние $x_1 = 0, x_2 = 1$ запишется так 01010, три последних цифры в двоичном числе относятся к переменным x_3, x_4, x_5 . Если $x_i (i = 1, \dots, 5) \geq \beta$, то в двоичном числе на i -м месте пишем 1, если $x_i < \beta$, то 0.

Чтобы не выходить за пределы окрестности определенного состояния, начальные значения токов $x_i (i = 1, \dots, 5)$ надо задавать так, чтобы двоичное число не изменялось.

VI. При анализе устойчивости автоматов, реализованных в криотронной среде, можно пользоваться представлениями (2) и (3) функции f . Результаты интегрирования близки. Времена интегрирования на ЦВМ системы (1) с разными правыми частями пример-

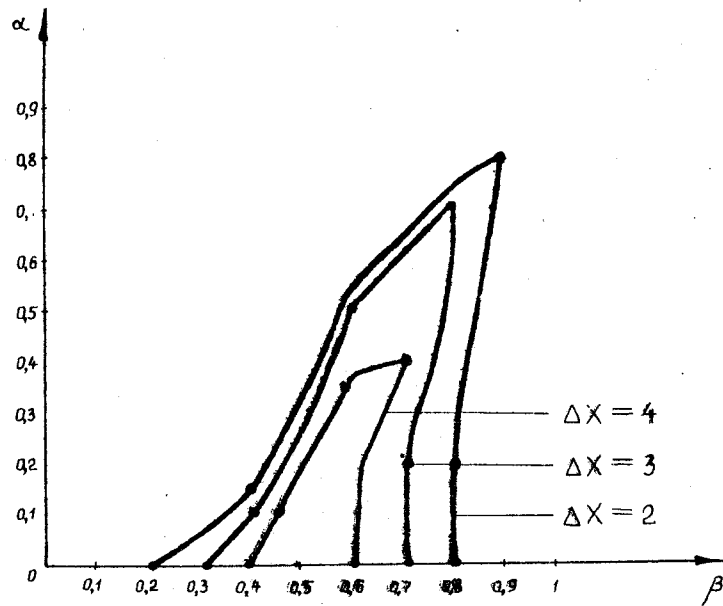


Рис. 9.

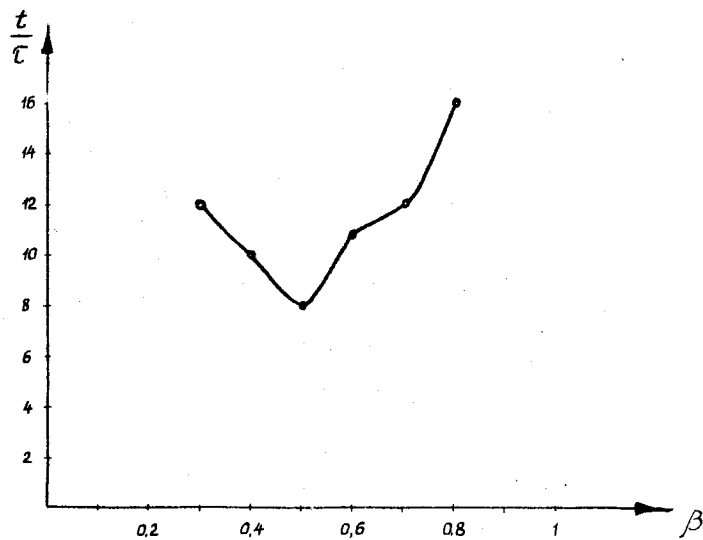


Рис. 10.

но одинаковые. При интегрировании методом Рунге-Кутты на БЭСМ-6 это время составляет 2 - 4 сек.

Заметим, что коэффициент γ в выражении (2) нужно выбирать так, чтобы выполнялось неравенство:

$$f(x_c + \alpha x_g = 0) \ll f(x_c + \alpha x_g = 1).$$

Это соответствует наличию двух состояний триотрона - сверхпроводящего и нормального.

Удовлетворительный результат получается, если взять такое соотношение:

$$a = \frac{f(x_c + \alpha x_g = 1)}{f(x_c + \alpha x_g = 0)} > 20. \quad (4)$$

При заданном a зависимость γ от параметра β имеет вид:

$$\gamma \approx \frac{i}{\pi} \left(\frac{a}{\beta} + \frac{1}{1-\beta} \right). \quad (5)$$

Модель, где функция f представлена в виде (2), имеет существенный недостаток. На фазовой плоскости для этой модели автомата нет отчетливо выраженной "мертвой зоны". О наличии ее приходится судить по длительности переходного процесса для данных начальных значений координат по сравнению со временем переходных процессов, начавшихся из соседних точек.

УП. В результате исследования динамических процессов, происходящих в автомате, собранном в триотронной вычислительной среде, выяснилось следующее.

1) Область параметров α, β , при которых динамическая оценка составляет $\Delta x = 0,3$, довольно велика. Задавая параметры в пределах $0 < \alpha < 0,5$ и $0,45 < \beta < 0,75$, можно построить автомат с хорошей динамической оценкой надежности.

2) При сравнении с другой реализацией того же самого автомата (схемой с непосредственной обратной связью [I]) обнаружилось, что области параметров α, β , соответствующие определенной динамической оценке, несколько отличаются друг от друга. Отличие состоит в том, что для схемы, рассмотренной нами, с возрастанием α при $\beta > \frac{1}{2}$ область устойчивости увеличивается, тогда как для схемы, анализируемой в [I], она остается постоянной. Обнаруженный эффект, казалось бы, расширяет область параметров, дающих хорошую динамическую оценку. Но, с другой стороны, с увеличением α при $\beta < \frac{1}{2}$ область устойчивости для нашей схемы уменьшается быстрее, чем для схемы из [I]. Отсюда следует, что с точки зрения устойчивости обе схемы равноценны.

3) Что касается методики анализа, то следует отметить, что лучше пользоваться второй моделью, так как функция (3) ближе к истинной характеристике сопротивления криотрона. В случае представления сопротивления криотрона непрерывной функцией (2) коэффициент γ следует выбирать в соответствии с выражениями (4), (5).

Л и т е р а т у р а

1. Б.М. ФОМЕЛЬ. Вопросы динамики асинхронных автоматов. - Данный сборник, стр. 57-73.
2. О.Л. БАНДМАН. Реализация автоматов в криотронной вычислительной среде по заданному графу состояний. - Данный сборник, стр. 44-56.

Поступила в редакцию
20.X.1968 г.