

УДК 621.382.233+621.316.543

НАДЕЖНОСТЬ ГЕРКОТРОНОВ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ НА ИХ ОСНОВЕ

В. И. ГУРЕВИЧ, П. И. САВЧЕНКО

В СССР разработаны новые электрические аппараты — геркотроны [1, 2], предназначенные для дискретного управления с потенциала земли мощными коммутирующими и регулирующими устройствами в зоне высокого потенциала, в том числе для управления высоковольтными тиристорными РПН [3], применение которых считается целесообразным в первую очередь в сельских электрических сетях [4, 5]. В соответствии с рекомендациями [6] решено развернуть прикладные исследования по созданию и совершенствованию параметров высоковольтных герконовых реле (геркотронов) и систем управления (СУ) на их основе. По сравнению со световыми и оптоэлектронными СУ, последние отличаются простотой, низкой стоимостью, высокой надежностью. В настоящей ста-

тве приведен расчет параметров надежности геркотронов и СУ на их основе (рис. 1).

Расчет производится по известной методике [7, 8, 9] при следующих допущениях:

а) отказы элементов являются событиями случайными и независимыми;

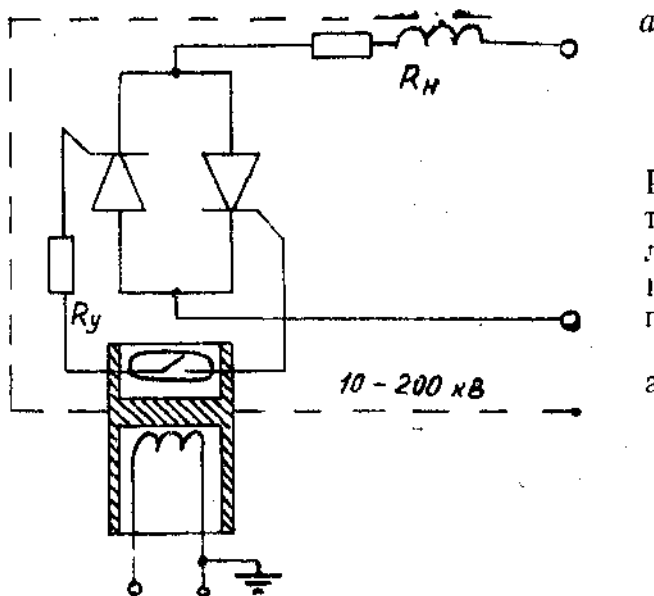
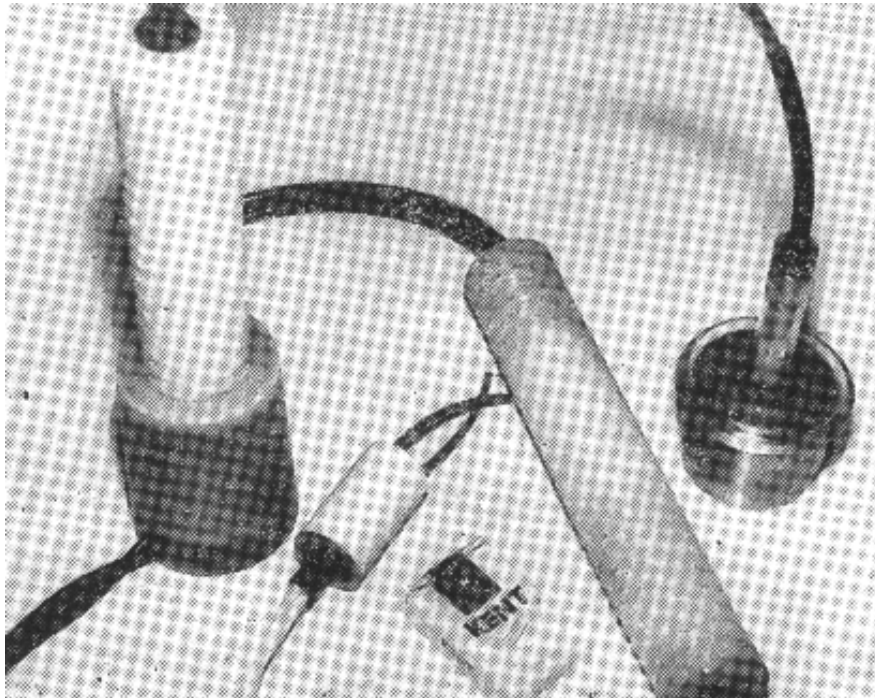


Рис. 1. Квзистатическое коммутирующее устройство для управления мощными нагрузками в зоне высокого потенциала на базе геркотрона и тиристорного ключа с самоуправлением (ТКСУ): а — внешний вид опытных образцов геркотронов, б — схема.

б) учитываются только элементы, входящие в основную функциональную схему работы изделия;

в) учет влияния условий работы производится приближенно;

г) распределение вероятностей нахождения интенсивности отказов элементов между верхним и нижним пределом неравномерно и смещено в сторону верхнего предела, поэтому расчет ведется для зоны: «верхний предел — среднее значение». Вероятность безотказной работы системы, как известно определяется выражением:

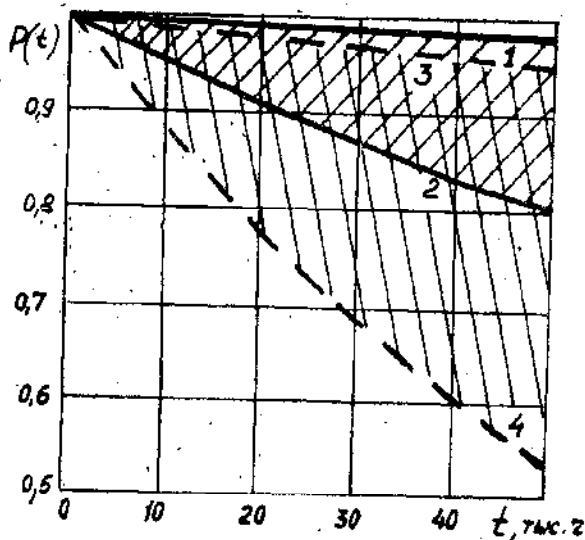


Рис. 2. Зоны ($P_{ср.} - P_{мин.}$) изменения вероятности безотказной работы во времени: 1, 2 — геркотрона, 3, 4 — всей системы.

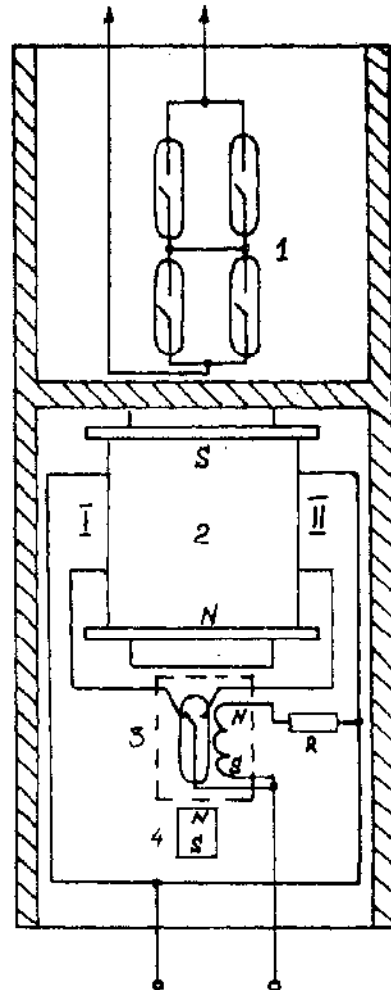


Рис. 3. Геркотрон с резервированием элементов.

$$P(t) = \prod_{i=1}^N P_i(t) = \prod_{i=1}^N \exp(-\lambda_i t), \quad (1)$$

где

$$\lambda_i = \lambda_{oi} K_{oi} K_{ni}$$

λ_{oi} — нормируемое значение интенсивности отказа i -го элемента; K_{oi} — коэффициент, учитывающий воздействие окру-

жающей среды (для закрытых помещений $K_c=1$); $K_{нi}$ — коэффициент нагрузки. Для электрических элементов $K_{нi}$ — отношение рассеиваемой мощности (напряжения) к номинальному значению; t — время работы элементов.

Исходные данные и результаты расчета λ_i приведены в табл. 1, на основании которой может быть найдена вероятность безотказной работы геркотрона:

$$P(t)_{сp,г} = \exp\left(-\sum_1^7 \lambda_{i,сp}\right) = e^{-0,117 \cdot 10^{-6} t}; \quad (2)$$

$$P(t)_{min,г} = \exp\left(-\sum_1^7 \lambda_{i,max}\right) = e^{-4,41 \cdot 10^{-6} t}.$$

Графические зависимости $P_{г}=f(t)$ представлены на рис. 2 (1 и 2)

Аналогичным образом могут быть рассчитаны параметры надежности СУ на базе геркотрона и ТКСУ (табл. 2):

$$P(t)_{сp,су} = \exp\left(-\sum_1^{16} \lambda_{i,сp}\right) = e^{-0,969 \cdot 10^{-6} t}; \quad (3)$$

$$P(t)_{min,су} = \exp\left(-\sum_1^{16} \lambda_{i,max}\right) = e^{-12,34 \cdot 10^{-6} t}.$$

Графические зависимости $P_{су}=f(t)$ представлены на рис. 2 (3 и 4). Минимальная наработка на отказ геркотрона:

$$T_{min,г} = \frac{1}{\lambda_{i,max,г}} = 227 \cdot 10^3 \approx 26 \text{ лет.} \quad (4)$$

СУ на базе геркона и ТКСУ:

$$T_{min,су} = \frac{1}{\lambda_{i,max,су}} = 81 \cdot 10^3 \approx 9,3 \text{ года.}$$

Параметры надежности отдельного ТКСУ:

$$\lambda_{max,TKCY} = \lambda_{max,су} - \lambda_{max,г} = 7,93 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч};$$

$$\lambda_{сp,TKCY} = \lambda_{сp,су} - \lambda_{сp,г} = 0,851 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч},$$

$$P_{min,TKCY} = e^{-\lambda_{max,TKCY} t} = 0,923763, \quad (5)$$

$$P_{сp,TKCY} = e^{-\lambda_{сp,TKCY} t} = 0,991526,$$

Таблица 1

Исходные данные и результаты расчета параметров надежности геркотрона без резервирования

Наименование элементов	$\lambda_{0i} \times 10^{-6}$ 1/ч	$\lambda_{0i} \times 10^{-6}$ 1/ч	Источники информации	$K_{пi}$	N	$\lambda_{ср} \times 10^{-6}$ 1/ч	$\lambda_{ср} \times 10^{-6}$ 1/ч	Вероятность безотказной работы через 10^4 час.	
								P_{min}	$P_{ср}$
1 Геркон	0,03	0,001	[10, 11]	1	1	0,03	0,001	0,99970	Близко к 1,0
2 Обмотка возб.	0,20	0,10	[7]	0,5	1	0,1	0,05	0,99900	0,99950
3 Изоляция	0,08	0,05	[7]	1	1	0,08	0,05	0,99920	0,99950
4 Соединения паяные	1,05	0,004	[7]	1	4	4,20	0,016	0,95887	0,099984
Σ	—	—	—	—	7	4,41	0,117	0,956858	0,998831

Таблица 2

Исходные данные и результаты расчета параметров надежности СУ на базе геркотрона с ТКСУ

Наименование элементов	$\lambda_{\text{нп}} \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	$\lambda_{\text{тср}} \times 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$	Источник информации	$K_{\text{нп}}$	N	$10^{-6} \times \lambda_{\text{нп}} \text{ ч}^{-1}$	$10^{-6} \times \lambda_{\text{тср}} \text{ ч}^{-1}$	Вероятность безотказной работы через 10^4 час	
								P_{min}	$P_{\text{ср}}$
1 Геркон	0,03	0,001	[10, 11]	1	1	0,03	0,001	0,99970	близко к 1
2 Обмотка возб.	0,20	0,10	[7]	0,5	1	0,1	0,05	0,99900	0,99950
3 Изоляция	0,08	0,05	[7]	1	1	0,08	0,05	0,99920	0,99950
4 Тиристор	8,0	4,12	[12]	0,1	2	1,6	0,824	0,984127	0,991794
5 Резистор	0,30	0,03	[7]	0,1	1	0,03	0,003	0,99970	близко к 1
6 Соединения паяные	1,05	0,004	[7]	1	10	10,5	0,04	0,900325	0,99960
Σ — сумма	—	—	—	—	16	12,34	0,968	0,88391	0,990367

Для повышения надежности систем уменьшают коэффициент нагрузки элементов и применяют резервирование. В рассматриваемой СУ элементы выбраны с достаточно низкими коэффициентами нагрузки (см. табл. 1 и табл. 2).

Рассмотрим возможность дальнейшего повышения надежности СУ за счет резервирования.

Надежность геркотрона может быть повышена за счет резервирования геркона и обмотки возбуждения, рис. 3. В этом варианте геркотрона дополнительное герконовое реле переключает входной сигнал с вышедшей из строя обмотки на резервную обмотку II. Переключение происходит в том случае, если на вход геркотрона подается сигнал, а обмотка I не создает требуемого значения магнитного потока (обрыв или замыкание). Резервирование геркона осуществляется последовательно-параллельным присоединением дополнительных герконов (нагруженный резерв).

Обозначив через λ_L интенсивность отказов основной (I) и резервной (II) обмоток, а через λ_n интенсивность отказов переключающего устройства получим вероятность безотказной работы геркотрона:

$$P(t)_r = 1 - (1 - e^{-\lambda_L t}) [1 - e^{-(\lambda_L + \lambda_n)t}] = e^{-\lambda_L t} + e^{-(\lambda_L + \lambda_n)t} - e^{-(2\lambda_L + \lambda_n)t}. \quad (6)$$

Считаем, что интенсивность отказов элемента № 2 (обмотка возбуждения в табл. 1, 2) изменилась со значения λ_L на значение λ'_L в результате резервирования. При этом новое значение λ'_L получаем из выражения:

$$\lambda'_L = \frac{\lambda_L}{\left[1 + \frac{1}{(1 + \lambda_n/\lambda_L)(2 + \lambda_n/\lambda_L)} \right]}. \quad (7)$$

Интенсивность отказов переключающего устройства равна:

$$\lambda_n = \sum_{i=1}^n \lambda_{i_n} = \lambda_{ог} \cdot n K_c K_n + \lambda_{о.обм.} \cdot n K_c K_n, \quad (8)$$

где $\lambda_{ог}$ — интенсивность отказов геркона; $\lambda_{о.обм.}$ — интенсивность отказов обмотки.

Вычисления по (8) дают следующие значения:

$$\lambda_{n\max} = 0,13 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}, \quad \lambda_{n\text{ср}} = 0,051 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

Тогда, вычисляя по (7) получаем:

$$\lambda'_{L_{\max}} = 0,088; \lambda'_{L_{\text{ср}}} = 0,043 (\times 10^{-6} 1/\text{ч}).$$

То есть, надежность элемента № 2 возросла в среднем на 13%. Однако интенсивность отказов всего геркотрона при этом уменьшается лишь на 0,27% для λ_{\max} и на 5,9% для $\lambda_{\text{ср}}$, а интенсивность отказов всей СУ уменьшилась соответственно на 0,097% и на 0,72%. Это изменение столь незначительно, что применение данного резервирования можно считать неоправданным.

Резервирование геркона также не дает сколько-нибудь существенного выигрыша в надежности, так как доля интенсивности отказов геркона составляет всего лишь 0,85% интенсивности отказов всего геркотрона. Увеличение надежности геркона даже в 2—3 раза не приведет к желаемому результату, но усложняет конструкцию и увеличит стоимость геркотрона.

При резервировании СУ путем параллельного включения геркотрона вероятность безотказной работы системы может быть значительно увеличена и определяется в общем виде по формуле:

$$P'_m(t) = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - e^{-\lambda_i t}), \quad (9)$$

где m — число параллельно включенных геркотронов. Для реальных условий дублирования ($m=2$) и идентичных геркотронов ($\lambda_{r_1} = \lambda_{r_2} = \lambda_r$):

$$P'_r(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_r t})^2 = 2e^{-\lambda_r t} - e^{-2\lambda_r t}. \quad (10)$$

На основании расчетов по (10) получаем

$$P'_{r_{\min}} = 0,998138, \quad P'_{r_{\text{ср}}} = 0,999999.$$

Как видно из (10) вероятность безотказной работы в этом случае не подчиняется экспоненциальному закону и интенсивность отказов не может быть рассчитана по известному соотношению $\lambda = -\ln P/t$.

Среднее время безотказной работы системы m — параллельно соединенных элементов в соответствии с [8] находится по формуле:

$$T_m = \int_0^{\infty} \left[1 - \prod_{i=1}^m (1 - e^{-\lambda_i t}) \right] dt = \sum_{j=1}^m (-1)^{j-1} \sum_{i_1=1}^{m-j+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{m-1} \dots \sum_{i_j=i_{j-1}+1}^m (\lambda_{i_1} + \lambda_{i_2} + \dots + \lambda_{i_j})^{-1}, \quad i_0 = 0. \quad (11)$$

Для однотипных элементов при $\lambda_i = \lambda$ из (II) следует, что

$$T_m = T_{\text{ср}} \sum_{K=1}^m \frac{1}{K}, \quad (12)$$

где $\sum_{k=1}^m \frac{1}{K} = z_m$ — сумма первых m — обратных чисел натурального ряда. Асимптотическая формула для оценки z_m (при $m \gg 1$) имеет вид:

$$z_m = C + \ln m + \frac{1}{2m}, \quad (13)$$

где $C = 0,577$ — постоянная Эйлера.

При $m = 2$, $z_m \approx 1,52$, тогда $T'_r = T_r z_m \approx 39,5$ лет.

Учитывая пропорциональную связь между интенсивностью отказов и средним временем безотказной работы: $T = 1/\lambda$, можем записать, что $1/\lambda'_r = z/\lambda_r$, откуда:

$$\lambda'_r = \lambda_r / z_m. \quad (14)$$

На основании (14) находим:

$$\lambda'_{r\text{ср}} = 0,077 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч,}$$

$$\lambda'_{r\text{max}} = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Дальнейшего повышения надежности СУ можно достичь резервированием ТКСУ.

Тиристоры резервируются последовательным включением дополнительных тиристоров, так как подавляющее большин-

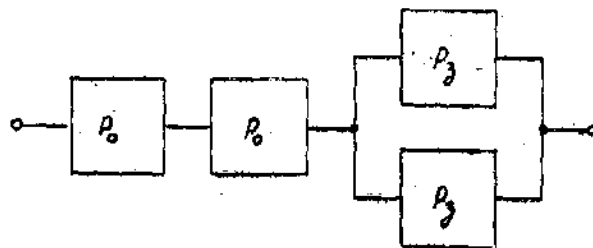


Рис. 4. Схема замещения для расчета надежности тиристоров.

ство отказов тиристоров происходит при закорачивании их анода и катода (пробой) и чрезвычайно редки случаи обрыва.

При последовательном соединении тиристорov уменьшается интенсивность коротких замыканий (пробоя), однако возрастает интенсивность отказов вследствие обрыва, поэтому для расчета надежности принимается схема замещения, приведенная на рис. 4. Для такой схемы вероятность безотказной работы рассчитывается по формуле (на примере средних значений интенсивностей отказов ТКСУ):

$$P'_{\text{срТКСУ}} = P_{0\text{ср}}^2 [1 - (1 - P_3)^2] = 2P_{0\text{ср}}^2 P_{3\text{ср}} - P_{0\text{ср}}^2 P_{3\text{ср}}^2 = 0,9982414, \quad (15)$$

где $P_{3\text{срТКСУ}} = e^{-\lambda_{3\text{ср}} t} = 0,99237$ — вероятность отсутствия замыканий (пробоя);

$P_{0\text{срТКСУ}} = e^{-\lambda_{0\text{ср}} t} = 0,999149$ — вероятность отсутствия обрывов; $\lambda_{3\text{ср}} = 0,9\lambda_{\text{срТКСУ}}$ — интенсивность замыканий; $\lambda_{0\text{ср}} = 0,1\lambda_{\text{срТКСУ}}$ — интенсивность обрывов; $\lambda_{\text{срТКСУ}} = 0,851 \cdot 10^{-6}$ 1/ч — среднее нормируемое значение интенсивности отказов ТКСУ, $t = 10^4$ час.

Аналогичным образом для максимальных значений интенсивностей отказов:

$$\begin{aligned} P'_{3\text{ min ТКСУ}} &= e^{-0,9\lambda_{\text{maxТКСУ}} t} = 0,931117; \\ P'_{0\text{ min ТКСУ}} &= e^{-0,1\lambda_{\text{maxТКСУ}} t} = 0,992101; \\ P'_{\text{minТКСУ}} &= 0,9795938. \end{aligned} \quad (16)$$

При групповом соединении элементов вероятность безотказной работы, как об этом уже упоминалось выше, не подчиняется экспоненциальному закону, поэтому интересующую нас интенсивность отказов задублированного блока тиристорov найдем, как и прежде через среднее время безотказной работы.

Как известно, среднее время безотказной работы может быть рассчитано по формуле:

$$T_{\text{ср}} = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (17)$$

или, интегрируя (15):

$$\begin{aligned} T &= \int_0^{\infty} 2P_0^2 P_3 dt - \int_0^{\infty} P_0^2 P_3^2 dt = 2 \int_0^{\infty} e^{-(2\lambda_0 + \lambda_3)t} dt - \int_0^{\infty} e^{-2(\lambda_0 + \lambda_3)t} dt = \\ &= \frac{2\lambda_0 + 3\lambda_3}{2(\lambda_0 + \lambda_3)(2\lambda_0 + \lambda_3)}, \end{aligned} \quad (18)$$

Учитывая принятые на основании [9] соотношения:

$$\lambda_3 = 0,9\lambda \text{ и } \lambda_0 = 0,1\lambda, \quad T'_{\text{ТКСУ}} = 1,32 T_{\text{ТКСУ}}.$$

Следовательно, $\lambda'_{\text{ТКСУ}} = \lambda_{\text{ТКСУ}}/1,32$ на основании чего

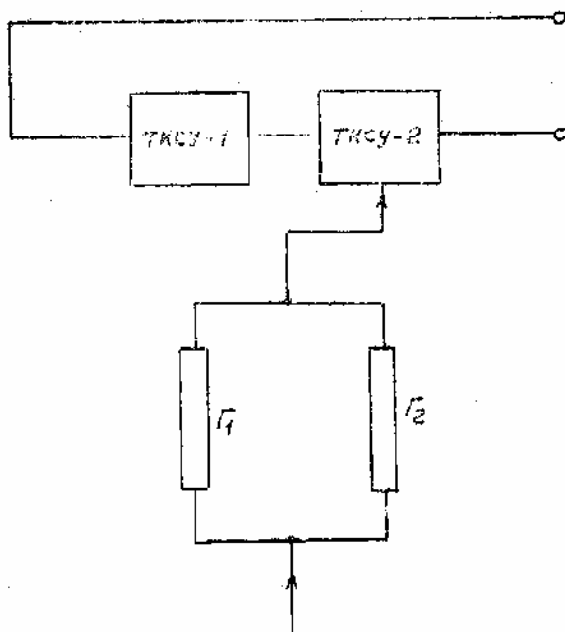
$$\lambda'_{\text{ср ТКСУ}} = 0,645 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}; \quad \lambda'_{\text{max ТКСУ}} = 6,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

Таблица 3

Параметры надежности СУ в различных комбинациях

№ п.п.	Структура СУ	$\lambda_{\text{max}} \times 10^{-6}$ 1/ч	$\lambda_{\text{ср}} 10^{-6}$ 1/ч	P_{min} (через 10^4 час)	$P_{\text{ср}}$ (через 10^4 час)	Минимальная нара- бая на богта на отказ (год)
1	Один геркотрон	4,41	0,117	0,9569	0,9988	26,0
2	Один ТКСУ	7,93	0,851	0,9238	0,9915	14,4
3	Геркотрон с ТКСУ	12,34	0,968	0,8840	0,9903	9,3
4	Геркотрон со сдвоенным ТКСУ	10,41	0,762	0,9373	0,9971	10,9
5	Сдвоенный геркотрон с ТКСУ	10,83	0,928	0,9220	0,9915	10,5
6	Сдвоенный геркотрон со сдвоенным ТКСУ	8,9	0,722	0,9778	0,9982	12,8

Считая, что рассматриваемая СУ состоит из блока ТКСУ и геркотронов, можно найти параметры надежности СУ в различных комбинациях.



Результаты расчета сведения в табл. 3.

Таким образом, на основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Резервирование отдельных элементов геркотрона (обмотки возбуждения или геркопа) является не эффективной мерой.

Рис. 5. Блок-схема зарезервированной системы управления мощными нагрузками в зоне высокого потенциала.

2. Самым ненадежным узлом СУ является ТКСУ, который и должен резервироваться в первую очередь.

3. Полностью зарезервированная СУ представляет собой два параллельно работающих геркотрона, управляющих двумя последовательно соединенными ТКСУ (рис. 5). При этом по сравнению с нерезервированной системой минимальная наработка на отказ увеличивается на 37, % и достигает 12,8 лет при средней вероятности безотказной работы 0,9982, что является достаточным для особо ответственных установок. Для большинства других электро- и радиоустановок достаточной будет надежность СУ и без резервирования.

4. Регламентируемый срок службы геркотрона и СУ не должен превышать расчетные данные минимальной наработки на отказ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуревич В. И. Высоковольтные слаботочные коммутирующие устройства на герконах. — Электротехн. пром-сть. Аппараты высокого напряжения, трансформаторы, силовые конденсаторы, 1981, № 3, с. 16—18.
2. Гуревич В. И., Савченко П. И. Аппаратура защиты и сетевой автоматики на базе высоковольтных герконовых реле. В кн.: Тез. докл. «Электробезопасность:...» Днепропетровск, 1982, с. 365—366.
3. Гуревич В. И., Савченко П. И., Балахонов А. М. Управление тиристорами переключателя ответвлений силового трансформатора. — Электротехника, 1980, № 7, с. 28—31.
4. Гуревич В. И. Перспективы применения тиристорных устройств РПН в сельских электрических сетях. — Электротехника, 1980, № 9, с. 51—54.
5. Гуревич В. И., Савченко П. И. Проблемы и перспективы применения устройств РПН в сельских электрических сетях. — Рук. деп. в Информэнерго 23.II.1981 г., № Д/1004, — 22 с.
6. Рекомендации Всесоюзной научно-технической конференции «Система управления и контроля высоковольтных электрических аппаратов» (Москва, 1981 г., апрель) — М.: Информэлектро, 1981.
7. Сотсков Б. С. Основы теории и расчета надежности элементов и устройств автоматики и вычислительной техники. — М.: Высшая школа, 1970, 270 с.
8. Левин Б. Р. Теория надежности радиотехнических систем. М.: Сов. радио, 1978, — 264 с.
9. Карпенко Л. Н. Световые системы управления высоковольтными аппаратами. — Л.: Энергия, 1977. — 167 с.
10. Рабкин Л. И., Евгеньева И. Н., Комиссарчук Н. В. Магнитоуправляемые контакты — герконы для квазиэлектронных АТС. — Приборы и системы управления, 1971, № 11, с. 20—22.
11. Rensch H. «Electrical Communication», 1965, vol. 40, N 3.
12. Григорьев А. М., Погасий Е. Ф. Оценка эксплуатационной надежности силовых полупроводниковых приборов. — Труды ВЭИ, 1980, № 90, с. 125—134.