

УДК 621.396

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ДОННОЙ ЧАСТИ АППАРАТУРЫ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ*

Б.И. ФИЛИПPOB¹, Е.А. МАЛАХОВА²

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доцент, кандидат технических наук. E-mail: filiprovboris@rambler.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет. E-mail: kate.lion@mail.ru

В работе показан расчет надежности донной части аппаратуры гидроакустического канала связи. При расчете надежности учитывалось то обстоятельство, что донная часть аппаратуры эксплуатируется под водой и она недоступна для ремонта в случае отказа аппаратуры и, соответственно, невозможности ее всплытия. По характеру применения в соответствии с ГОСТ В.20.39.307-76 аппаратура относится к классу 2, вид 1 (донная часть – категория А), что и учитывалось в процессе расчетов при определении соответствующих элементов аппаратуры в зависимости от температуры окружающей среды. При расчетах учитывалось, что донная часть аппаратуры, находящаяся глубоко под водой, будет иметь температуру не более +25 °С. Эта температура и была учтена при расчете надежности. Непродолжительные испытания на суше или на судне при более высокой температуре не скажутся существенно на ее времени наработки на отказ. Надежность аппаратуры определяется надежностью микросхем, диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов, печатных плат, разъемов и вспомогательных элементов схем. При оценке надежности аппаратуры использовался экспоненциальный закон распределения вероятностей отказа ее элементов, так как только для этого закона имеются необходимые справочные данные об интенсивности отказов элементов электронных схем. Все расчеты интенсивности отказов различных элементов были сведены в таблицы. Расчеты показали, что наработка на отказ донной части аппаратуры гидроакустического канала связи и всплывающих модулей системы спутниковой связи (ВМССС) составляет 69 500 часов, что значительно больше заданного (5000 часов).

Ключевые слова: гидроакустический канал, донная станция, интенсивность отказов, среднее время наработки на отказ, температурный режим, структурная схема, экспоненциальный закон, типоминимал

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-79-97

* Статья получена 21 августа 2015 г.

ВВЕДЕНИЕ

Расчет надежности аппаратуры гидроакустического канала связи (ГАКС) в процессе ее разработки заключался в выборе вариантов построения аппаратуры, выборе элементной базы и типономиналов элементов. При этом ставилась задача добиться наиболее простыми способами наибольшей надежности, чтобы иметь достаточный запас прочности, так как все расчеты в теории надежности строятся на основании среднестатистических данных о надежности составных элементов, и реально полученная надежность может быть несколько ниже расчетной.

При расчете надежности будем учитывать то обстоятельство, что донная часть аппаратуры эксплуатируется под водой, и она недоступна для ремонта в случае отказа аппаратуры и, соответственно, невозможности ее всплытия. Поэтому необходимо отдельно определять надежность (время наработки на отказ) донной части и судовой части аппаратуры. В данной работе показан расчет надежности только для донной части аппаратуры ГАКС.

Особенности гидроакустического канала были рассмотрены в работе [1], а в [2] был обоснован выбор сигналов для передачи информации по таким каналам.

Описание и обоснование структурной схемы аппаратуры ГАКС, а также результаты испытаний рассмотрены в [3–8].

По характеру применения в соответствии с ГОСТ В.20.39.307-76 аппаратура относится к классу 2, вид 1 (донная часть – категория А, судовая часть – категория Б), что и учитывается в процессе расчетов при определении соответствующих элементов аппаратуры в зависимости от температуры окружающей среды. При расчетах будем учитывать, что донная часть аппаратуры, находящаяся глубоко под водой, будет иметь температуру не более +25 °С. Эту температуру и будем учитывать при расчете надежности. Непродолжительные испытания на суше или на судне при более высокой температуре не скажутся существенно на ее время наработки на отказ.

Нагрев донной части аппаратуры за счет источников питания учитывать не будем, так как значительную часть времени аппаратура работает в дежурном режиме и потребляет очень малую мощность (0,02 Вт). И только в рабочем режиме потребляемая мощность повышается до 30 Вт, причем в виде тепла выделяется только часть этой мощности (некоторая часть расходуется и излучается гидроакустической антенной).

Надежность аппаратуры определяется надежностью микросхем, диодов, транзисторов, резисторов, конденсаторов, печатных плат, разъемов и вспомогательных элементов схем.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ

На рисунке приведена структурная схема донной части аппаратуры ГАКС, учитывающая ее конструктивное деление на блоки.

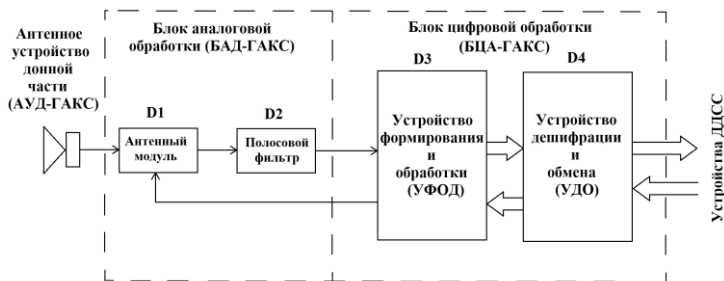
Донная часть аппаратуры делится на антенное устройство донной части (АУД–ГАКС); блок аналоговой обработки (БАД–ГАКС), состоящий из антенного модуля D1 и полосового фильтра D2; блок цифровой обработки (БЦА–ГАКС), состоящий из устройства формирования и обработки (УФОД) D3 и устройства дешифрации и обмена (УДО) D4.

АУД–ГАКС предназначено для преобразования акустических сигналов в электрическую форму при приеме сигналов команд и из электрической формы в акустическую при передаче сигналов из гидроакустических донных автономных станций (ГДАС).

В БАД–ГАКС в режиме приема осуществляется предварительная фильтрация, усиление принимаемых сигналов, их преобразование в цифровую форму; в режиме передачи в блоке аналоговой обработки осуществляется усиление передаваемых сигналов.

В устройстве формирования и обработки осуществляется цифровая фильтрация, демодуляция и декодирование принимаемых из канала сигналов команд управления; кодирование, формирование сигналов квитанций и цифровой информации, передаваемой в судовой приемно-обработывающий комплекс (СПОА) и всплывающие модули спутниковой системы связи (ВМССС). УДО выполняет функции дешифрации номеров принятых команд управления и формирования сигналов обмена информацией с устройствами ГДАС.

При оценке надежности аппаратуры будем исходить из экспоненциального закона распределения вероятностей отказа ее элементов, так как только для этого закона имеются необходимые справочные данные об интенсивности отказов элементов электронных схем.



Структурная схема донной части аппаратуры ГАКС.
Конструктивное разбиение на блоки

Все сведения о надежности различных элементов аппаратуры взяты из официального справочника, изданного Российским научно-исследовательским институтом «Росстандарт» [9]. Поэтому в тексте ссылки на источники, откуда заимствованы сведения о надежности элементов, различных поправочных коэффициентах и т. д. в дальнейшем не приводятся.

Следует иметь в виду, что реальная интенсивность отказов конкретного элемента аппаратуры определенного вида («эквивалентная интенсивность отказов» – $\lambda_{э}$) обычно отличается от базовой интенсивности, так как значение базовой интенсивности умножается на ряд коэффициентов, учитывающих сложность конкретного элемента аппаратуры, температуру и другие факторы.

2. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ МИКРОСХЕМ

Интенсивность отказов одного элемента аппаратуры определенного вида (в данном случае, например, микросхемы К140УД12) определяется формулой

$$\lambda_{эi} = \lambda_{бi} \cdot K_{стi} \cdot K_{эi} \cdot K_{vi} \cdot K_{корi} \cdot K_{при} \cdot K_{осi}, \quad (1)$$

где $\lambda_{эi}$ – эквивалентная интенсивность отказа элементов i -го типонаминала;

$\lambda_{бi}$ – базовая интенсивность отказов микросхем данного (i -го) вида;

i – количество типонаминалов элементов данного вида;

N_i – количество элементов определенного (i -го) типонаминала;

$K_{стi}$ – коэффициент, определяемый сложностью микросхемы и температурой окружающей среды;

$K_{эi}$ – коэффициент жесткости условий эксплуатации;

K_{vi} – коэффициент, определяемый степенью понижения напряжения питания микросхем по сравнению с максимально допустимым;

$K_{корi}$ – коэффициент, зависящий от типа корпуса микросхемы;

$K_{при}$ – коэффициент, определяемый типом приемки;

$K_{осi}$ – коэффициент, определяемый степенью освоенности технологии изготовления микросхемы данного типа.

Рассмотрим численные значения указанных коэффициентов (индексы i в обозначениях для упрощения опускаем).

1. λ – базовая интенсивность отказов.

Для аналоговых микросхем $\lambda = 0,023 \cdot 10^{-6}$.

Для цифровых микросхем $\lambda = 0,017 \cdot 10^{-6}$.

Для ОЗУ $\lambda = 0,038 \cdot 10^{-6}$.

Для ПЗУ $\lambda = 0,020 \cdot 10^{-6}$.

Для некоторых конкретных типов микросхем, имеющих пониженную надежность, величина λ указывается отдельно. В нашем случае это микросхемы К140УД12, К564ЛС2, КР590КН2.

2. Коэффициент $K_{ст}$ определяется сложностью (степенью интеграции) микросхемы и рабочей температурой. Так, для всех типов цифровых микросхем, кроме ОЗУ и ПЗУ, для температуры 25...30 °С значения $K_{ст}$ лежат в пределах 1...2,5.

Для ОЗУ и ПЗУ значения $K_{ст}$ определяются величиной памяти запоминающего устройства и температурой окружающей среды. Так, для температуры 25 °С для ОЗУ емкостью 2 Кбайт (микросхема типа ИМ1821РУ55) $K_{ст} = 1,4$, а для ПЗУ емкостью 16 Кбайт (микросхема типа К573РФ2) $K_{ст} = 2,5$.

3. Коэффициент жесткости эксплуатации K_3 определяется условиями эксплуатации микросхемы. Для морских условий эксплуатации (работа в закрытых помещениях) $K_3 = 2$.

4. Коэффициент $K_v = 1$ для всех микросхем, кроме микросхем КМОП. Для микросхем КМОП $K_v = 1$ при $U < 10$ В; $K_v = 3$ при $U = 12,6$ В; $K_v = 10$ при $U = 15$ В. В наших условиях $U < 10$ В, поэтому берем $K_v = 1$.

5. Для микросхем с герметичным корпусом $K_{кор} = 1$, для микросхем с пластмассовым корпусом $K_{кор} = 5$. В нашем случае принимаем $K_{кор} = 1$.

6. Для пятой приемки микросхем $K_{пр} = 1$.

7. Коэффициент $K_{ос} = 1$ для микросхем, технология которых освоена более двух лет.

С учетом приведенных здесь конкретных значений некоторых коэффициентов формула (1) приобретает вид

$$\lambda_{эi} = \lambda_{бi} \cdot K_{сти} \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 = 2\lambda_{бi} \cdot K_{сти}, \quad (2)$$

Если в схеме имеется N_i элементов i -го типа, то найденная величина должна быть умножена на N_i , откуда

$$\lambda_{эNi} = N_i \cdot 2\lambda_{эi} \cdot K_{сти} = 2\Pi_i, \quad (3)$$

где $\Pi_i = N_i \cdot \lambda_{эi} \cdot K_{сти}$.

Интенсивность отказов всех микросхем определенного (i -го) типа с учетом их количества в аппаратуре. В этой формуле уже учтены численные значения всех коэффициентов, влияющие на величину $\lambda_{эi}$, кроме коэффициента $K_{сти}$, который различен для разных микросхем и температурных условий их работы.

Для всего устройства интенсивность отказа микросхем будет определяться с учетом всех n типонаименований.

Вычисляя величины Π_i для всех n типов микросхем конкретного устройства и суммируя их для $i = 1, \dots, n$, окончательно получим

$$\lambda_{э \text{ микр}} = \sum \lambda_{э Ni} = 2 \sum_{i=1}^n \Pi_i. \quad (4)$$

Аналогичным образом рассчитывается интенсивность отказов других элементов аппаратуры.

Данные для расчета надежности микросхем для донной части аппаратуры приведены в табл. 1. Там же приведены значения количества выводов корпусов микросхем $N_{вi}$, необходимые для расчета числа отверстий в печатных платах под эти микросхемы (расчета надежности печатных плат).

Таблица 1

Данные расчета надежности микросхем донной части аппаратуры

Типы микросхем	Кол-во микросхем N_i	Степень интеграции	$K_{сгi}$ для $T = 25^\circ\text{C}$	$\lambda_{бi} \cdot 10^6$	$\Pi_i \cdot 10^6$	$N_{вi} \cdot N_i$
K140УД12	1	II	1	0,055	0,055	8
K544УД1А	1	II	1	0,023	0,023	8
K564ГГ1	1	III	1	0,017	0,017	16
K564ИЕ9	1	III	1	0,017	0,017	16
K 564ИЕ10	4	III	1	0,017	0,068	16·4
K564ИЕ15	1	IV	1,8	0,017	0,31	16
K564ИЕ16	2	III	1	0,017	0,034	16·2
K564КП1	1	III	1	0,017	0,017	14
K564ЛА7	2	II	0,8	0,017	0,027	14·2
K564ЛЕ5	2	II	0,8	0,017	0,027	14·2
K564ЛН1	2	II	0,8	0,017	0,027	16·2
K564ЛП2	2	II	0,8	0,017	0,014	14·2
K564ПУ4	4	II	1	0,023	0,092	14
K564ТМ2	8	III	1	0,17	0,136	16·8
K573РФ2	1	–	2,5	0,038	0,095	24
K588ВА1	2	IV	1,8	0,017	0,031	28·2
K588ВН1	1	III	1	0,017	0,017	28
K588ВТ1	1	IV	1,8	0,017	0,031	42
K588ИР1	6	IV	1,8	0,017	0,031	28·2
K588ИР14	1	III	1	0,017	0,102	16·6
K1564ЛИ2	2	II	0,8	0,017	0,014	16
KP1564ИД7В	1	III	1	0,017	0,034	16·2
ИМ1821ВМ85	1	V	2,5	0,017	0,034	40
ИМ1821РУ55	1	–	1,4	0,038	0,053	40
Сумма					1,868	882

Подставляя вычисленную сумму Π_i в формулу (4), получим для микросхем донной части аппаратуры

$$\lambda_3 = 2 \cdot 1,868 \cdot 10^{-6} = 3,72 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}.$$

3. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ РЕЗИСТОРОВ АППАРАТУРЫ ГАКС

Интенсивность отказов резисторов i -го типа определяется формулой

$$\lambda_{эi} = \lambda_{бi} \cdot K_{рTi} \cdot K_{эi} \cdot K_{Ti} \cdot K_{Mi} \cdot K_{стабi}, \quad (5)$$

где $\lambda_{бi}$ – базовая интенсивность отказов резисторов данного типа (для металло-диэлектрических и металло-оксидных резисторов $\lambda_{бi} = 0,002 \cdot 10^{-6}$);

$K_{рTi}$ – коэффициент, зависящий от отношения мощности P , выделяемой в резисторе, к номинальной мощности P_{max} и от температуры окружающей среды;

$K_{эi}$ – коэффициент жесткости эксплуатации, определяется условиями эксплуатации резистора. Для морских условий эксплуатации (работа в закрытых помещениях) резисторов $K_{э} = 6$;

K_{Ti} – коэффициент, зависящий от значения сопротивления резистора. Наиболее надежными резисторами являются резисторы с сопротивлением менее 10 МОм, в этом случае $K_r = 0,6$. При сопротивлении $R > 10$ МОм $K_r = 1,6$. В наших схемах $R < 10$ МОм, поэтому принимаем $K_r = 0,6$;

K_{Mi} – коэффициент, зависящий от номинальной мощности (габаритов) резистора. Для резисторов с максимальной мощностью в пределах 0,062...0,5 Вт $K_M = 0,7$;

$K_{стаб}$ – коэффициент, зависящий от допуска на величину сопротивления. При допуске 0,5 % $K_{стаб} = 2$; при допусках 1 %, 2 %, 5 %, 10 % $K_{стаб} = 1$. Принимаем $K_{стаб} = 1$.

Таким образом, с учетом $\lambda_{бi}$ и указанных здесь постоянных коэффициентов $K_{э}$ и K_M формула (5) преобразуется к виду

$$\lambda_{эi} = 0,002 K_{рTi} \cdot 6 \cdot 0,6 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 1,$$

или

$$\lambda_{эi} = 0,00503 K_{рTi} \cdot 10^{-6},$$

откуда

$$\lambda_{эNi} = 0,00503 N_i \cdot K_{рTi} \cdot 10^{-6}.$$

Окончательно $\lambda_{э}$ для всех резисторов схемы получим, просуммировав $\lambda_{эNi}$ по всем значениям i :

$$\lambda_{э} = \sum \lambda_{эNi}. \quad (6)$$

Таблица 2

Данные для расчета интенсивности отказов резисторов донной части аппаратуры

R_i	$P_i/P_{i\max}$	$K_{\text{пр}i}, T = 25^\circ\text{C}$	Количество N	$N \cdot K_{\text{пр}i}$
30...200 Ом	1	1,0	9	9,0
200...400 Ом	0,5	0,57	4	2,28
400...1000 Ом	0,2	0,40	6	2,4
Более 2 кОм	0,1	0,35	69	23,7
Сумма				37,38

В соответствии с формулой (6) интенсивность отказов резисторов в схеме донной части аппаратуры получается равной

$$\lambda_3 = 0,00503 \cdot 37,38 \cdot 10^{-6} = 0,191 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$$

4. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ КОНДЕНСАТОРОВ

Эквивалентная интенсивность отказов конденсаторов $\lambda_{эi}$ i -го типа определяется формулой

$$\lambda_{эi} = \lambda_{бi} \cdot K_{\text{пр}i} \cdot K_3 \cdot K_{сi} \cdot K_{\text{пс}i} \cdot K_{\text{пр}i}, \quad (7)$$

где $\lambda_{бi}$ – базовая интенсивность отказов конденсаторов данного типа ($\lambda_{бi} = 0,008 \cdot 10^{-6}$ для керамических конденсаторов, $\lambda_{бi} = 0,003 \cdot 10^{-6}$ для пленочных конденсаторов, $\lambda_{бi} = 0,14 \cdot 10^{-6}$ для оксидно-электролитических конденсаторов, $\lambda_{бi} = 0,1 \cdot 10^{-6}$ для оксидно-полупроводниковых конденсаторов);

$K_{\text{пр}i}$ – коэффициент, определяемый нагрузкой конденсатора (отношением напряжения на конденсаторе к номинальному напряжению) с учетом температуры окружающей среды;

$K_{эi}$ – коэффициент жесткости эксплуатации (для морских условий эксплуатации для конденсаторов $K_3 = 6$);

$K_{сi}$ – коэффициент, зависящий от величины номинальной емкости конденсатора;

$K_{\text{пс}}$ – коэффициент, зависящий от величины последовательно соединенного сопротивления (применяется в случае оксидно-полупроводниковых конденсаторов, однако при $T < 50^\circ\text{C}$ величина постоянна);

$K_{\text{пр}i} = 1$ при любом последовательно включенном сопротивлении или без него;

$K_{\text{пр}}$ – коэффициент, определяемый видом приемки конденсаторов ($K_{\text{пр}} = 1$ в случае пятой приемки).

Таким образом, в нашем случае $K_3 = 6$, $K_{пс} = 1$ и $K_{пр} = 1$, поэтому формула (7) примет вид

$$\lambda_{эi} = \lambda_{\delta i} \cdot K_{рти} \cdot 6 K_{ci} \cdot 1 \cdot 1 = 6\lambda_{\delta i} \cdot K_{рти} \cdot K_{ci},$$

или окончательно для N_i конденсаторов i -го типа

$$\lambda_{эN_i} = 6N_i \cdot \lambda_{\delta i} \cdot K_{рти} \cdot K_{ci}. \quad (8)$$

Суммируя значения $\lambda_{эN_i}$ по всем значениям i , по формуле (6) определим окончательно интенсивность отказа конденсаторов.

Рассмотрим значения остальных коэффициентов, входящих в формулу (8).

1. При определении величины $K_{рп}$ будем исходить из того, что керамические конденсаторы работают при напряжении $U = 0,1U_n$, а оксидные конденсаторы – при $U = U_n$ (в действительности $U < U_n$, однако оксидных конденсаторов в схемах донной части аппаратуры значительно меньше, чем керамических конденсаторов. Поэтому, ориентируясь на худший вариант ($U = U_n$), мы незначительно завышаем расчетное значение интенсивности отказов конденсаторов, что практически не сказывается на конечном результате.

2. Коэффициент K_c для оксидно-полупроводниковых конденсаторов любой емкости равен единице. Для керамических и оксидно-электролитических конденсаторов величина K_c меняется от 1,2 до 3 и зависит от величины емкости.

Данные расчета интенсивности отказов конденсаторов приведены в табл. 3.

Таблица 3

Данные расчета интенсивности отказов конденсаторов донной части аппаратуры

C , пФ	Количество N_i	$U_i/U_{ин}$	$K_{рти}$	K_{c1}	$K_{ci}\lambda_{\delta i}10^6$	$N_i \cdot K_{рти} \cdot K_{ci} \cdot \lambda_{\delta i} \cdot 10^6$
Керамические конденсаторы						
$10 \dots 10^4$	26	0,1	0,03	1,2	8	7,48
$10^4 \dots 10^5$	4	0,1	0,03	1,6	8	1,53
$10^5 \dots 10^6$	9	0,1	0,03	2,1	8	4,53
$10^6 \dots 10^7$	13	0,1	0,03	2,65	8	8,27
$10^7 \dots 10^8$	5	0,1	0,03	3,0	8	3,6
Оксидно-электролитические конденсаторы						
до 10^9	3	1	2,0	1	140	248
Оксидно-полупроводниковые конденсаторы						
до 10^7	12	1	0,61	1	100	732
Сумма						905

По формулам (8) и (6) для конденсаторов донной части аппаратуры

$$\lambda_3 = 6 \cdot 905 \cdot 10^{-6} = 5,43 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч}.$$

5. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

Эквивалентная интенсивность отказов полупроводникового прибора определяется формулой

$$\lambda_{эi} = \lambda_{бi} \cdot K_{дтi} \cdot K_{фi} \cdot K_{нi} \cdot K_{прi} \cdot K_{эi}, \quad (9)$$

где $\lambda_{бi}$ – базовая интенсивность отказов прибора данного (i -го) типа;

$K_{дтi}$ – коэффициент, учитывающий допустимую нагрузку (максимально допустимый ток);

$K_{фi}$ – коэффициент, определяемый функциональным назначением прибора (аналоговые или переключательные схемы);

$K_{нi}$ – коэффициент, зависящий от отношения рабочего напряжения к максимально допустимому;

$K_{эi}$ – коэффициент жесткости эксплуатации;

$K_{прi}$ – коэффициент, определяемый видом приемки прибора ($K_{прi} = 1$ для пятой приемки).

1. Базовая интенсивность отказов $\lambda_{бi}$ принимается равной $0,040 \cdot 10^{-6}$ для диодов; $0,003 \cdot 10^{-6}$ для стабилитронов; $0,048 \cdot 10^{-6}$ для биполярных транзисторов и $0,0096 \cdot 10^{-6}$ для полевых транзисторов.

2. Коэффициент $K_{дт}$ зависит от максимально допустимого тока. Для диодов при $I_{доп} < 1$ А $K_{дт} = 0,6$; при $I_{доп} = 1 \dots 3$ А $K_{дт} = 0,8$; при $I_{доп} = 3 \dots 10$ А $K_{дт} = 1,0$. Для транзисторов при $I_{доп} < 1$ А $K_{дт} = 0,5$; при $I_{доп} < 5$ А $K_{дт} = 0,8$. В аппаратуре для примененных в схемах диодов $I_{доп} < 1$ А, в результате чего для диодов $K_{дт} = 0,6$. Для большинства транзисторов $I_{доп} < 1$ А, поэтому $K_{дт} = 0,05$, однако для более мощных транзисторов КТ829 $I_{доп} = 8$ А, поэтому для этих транзисторов $K_{дт} = 0,8$.

3. Коэффициент $K_{ф}$ определяется следующим образом: диоды аналоговых сигналов $K_{ф} = 1,0$; диоды импульсных сигналов $K_{ф} = 0,6$; транзисторы аналоговых сигналов $K_{ф} = 1,5$; транзисторы, переключающие схемы, $K_{ф} = 0,7$. В дальнейшем принимаем для диодов $K_{ф} = 1,0$ и для транзисторов $K_{ф} = 1,7$.

4. Коэффициент $K_{н}$ зависит от отношения рабочего напряжения к максимально допустимому.

В рассмотренных схемах напряжение на диодах и транзисторах не превышает 50 % от допустимого значения, поэтому принимаем для любых полупроводниковых диодов $K_{н} = 0,7$, а для транзисторов $K_{н} = 0,5$. Стабилитроны работают всегда при номинальном напряжении, поэтому для них $K_{н} = 1$.

5. При эксплуатации аппаратуры в морских условиях коэффициент $K_3 = 9$ для диодов, стабилитронов и биполярных транзисторов и $K_3 = 5$ – для полевых транзисторов.

Результаты расчетов интенсивности отказов полупроводниковых приборов приведены в табл. 7.

Эквивалентная интенсивность отказов любого полупроводникового прибора $\lambda_{эi}$ определяется по формуле (9), а результирующая интенсивность отказов полупроводниковых приборов с учетом количества различных типов приборов в схеме определена по формуле (1).

Таблица 4

Данные для расчета интенсивности отказов полупроводниковых приборов донной части аппаратуры

Тип	Количество N_i	$\lambda_{6i} \cdot 10^6$	$K_{дтi}$	$K_{фi}$	$K_{нi}$	$K_{эi}$
КТ3102	7	0,048	0,5	1,7	0,5	9,0
КТ907	1	0,048	0,5	1,7	0,5	9,0
КТ315	1	0,048	0,5	1,7	0,5	9,0
КТ829	2	0,048	1,0	1,7	0,5	9,0
КТ3107	1	0,048	0,5	1,7	0,5	5,0
КП302	4	0,0096	0,5	1,0	0,5	5,0
КД521	1	0,04	0,6	1,0	0,7	9,0
Д9	2	0,04	0,6	1,0	0,7	9,0
КД522	9	0,04	0,6	1,0	0,7	9,0
КС162	1	0,003	0,6	1,0	0,7	9,0
КС170	1	0,003	0,6	1,0	0,7	9,0

Применяя формулы (9) и (6), получаем для полупроводниковых приборов донной части аппаратуры

$$\lambda_3 = 4,05 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$$

6. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Интенсивность отказов печатной платы определяется формулой

$$\lambda_6 = \lambda_6 \cdot K_3 [N_1(K_c + K_S) + N_2(K_c + 13)], \quad (10)$$

где λ_6 – базовая интенсивность отказов одного отверстия печатной платы. Для печатного монтажа $\lambda_6 = 0,00004 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$

K_3 – коэффициент жесткости эксплуатации (для морских условий эксплуатации в закрытых помещениях $K_3 = 4$);

N_1 и N_2 – количество отверстий соответственно с использованием пайки волной или вручную;

K_c – коэффициент, определяется числом слоев (сложностью) печатной платы. Для двухслойного монтажа $K_c = 1$;

K_S – коэффициент, зависящий от качества пайки волной. Если после пайки волной требуется перепайка вручную не более 6 % отверстий, то в этом случае $K_S = 0$.

Таким образом, при пайке волной $\lambda_6 = 0,00004 \cdot 10^{-6}$, $K_3 = 4$, $K_c = 1$ и $K_S = 0$ формула (10) примет вид

$$\lambda_3 = 0,00004 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot N_1 = 0,00016 \cdot 10^{-6} \cdot N_1, \text{ 1/ч.} \quad (11)$$

Таблица 5

Данные для расчета интенсивности отказов печатных плат донной части аппаратуры

Наименование деталей	Донная часть	
	Количество деталей	Количество отверстий
Микросхемы	49	882
Перемычки	20	40
Резисторы	88	176
Конденсаторы	72	144
Диоды	14	28
Транзисторы	15	45
Трансформаторы	1	4
Дроссели	4	8
Кварцевая пластина	1	2
Установочные изделия	2	4
Лепестки	10	20
Разъемы	12	299
Сумма	$N_1 = 288$	$N_1 = 1652$

Интенсивность отказов печатных плат донной части аппаратуры

$$\lambda_3 = 0,00016 \cdot 10^{-6} \cdot 1650 = 0,21 \cdot 10^{-6}, \text{ 1/ч.}$$

7. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ РАЗЪЕМОВ

Интенсивность отказов разъемов определяется формулой

$$\lambda_{\varepsilon i} = \lambda_{\varepsilon i} \cdot K_{pi} \cdot K_{kki} \cdot K_{kci} \cdot K_{\varepsilon i} \cdot K_{пр i} \quad (12)$$

где $\lambda_{\varepsilon i}$ – базовая интенсивность отказов разъемов. Для прямоугольных разъемов печатного монтажа $\lambda_{\varepsilon i} = 0,001223 \cdot 10^{-6}$, 1/ч;

K_{pi} – учитывает токовую нагрузку контактов и рабочую температуру.

В нашей аппаратуре токовая нагрузка контактов очень мала, так как большинство контактов используется для передачи ничтожно слабых логических сигналов. При $I/I_{\max} = 0,1$ и $T = 25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $K_p = 0,67$.
Здесь $I_{\max} = 0,1$;

K_{kk} – коэффициент, зависящий от числа задействованных контактов отдельно в каждом разьеме.

При расчете надежности примем $K_{kc} = 0,42$;

K_{ε} – коэффициент жесткости условий эксплуатации. Для морских условий эксплуатации разъемов $K_{\varepsilon} = 4$;

$K_{пр}$ – коэффициент, равный 1,0 для пятой приемки разъемов.

Умножая $\lambda_{\varepsilon i}$ на число разъемов i -го типа, получим интенсивность отказов разъемов i -го типа $\lambda_{\varepsilon Ni}$.

С учетом численных значений коэффициентов получаем для донной части аппаратуры

$$\lambda_{\varepsilon Ni} = 0,00122 \cdot 10^{-6} \cdot 0,67 \cdot 0,42 \cdot 4 \cdot 1 \cdot N_i \cdot K_{kki} = 0,00137 \cdot 10^{-6} N_i \cdot K_{kki}.$$

Суммируя значения $\lambda_{\varepsilon Ni}$ по всем типам разъемов, получаем интенсивность отказов разъемов всего устройства

$$\lambda_{\varepsilon} = \sum \lambda_{\varepsilon Ni}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 6.

Таблица 6

Значения $N_i \cdot K_{kki}$ для разъемов донной части аппаратуры

Число задействованных контактов в каждом разьеме	Количество разъемов N_i	K_{kki}	$K_{kki} \cdot N_i$
4...10	7	2,58	18,2
16...28	3	5,6	11,2
60...62	2	11,89	23,8
Сумма			53,2

Интенсивность отказов разъемов донной части аппаратуры

$$\lambda_3 = 0,00137 \cdot 53,2 \cdot 10^{-6} = 0,073 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$$

8. ИНТЕНСИВНОСТЬ ОТКАЗОВ КВАРЦЕВОГО РЕЗОНАТОРА

Интенсивность отказов кварцевого резонатора определяется формулой

$$\lambda_3 = \lambda_6 \cdot K_3. \quad (13)$$

Для малогабаритных кварцевых резонаторов в плоском металлическом корпусе $\lambda_6 = 0,17 \cdot 10^{-6}$.

K_3 – коэффициент жесткости эксплуатации. Для морских условий эксплуатации кварцевых резонаторов $K_3 = 2$. В связи с этим интенсивность отказов кварцевого резонатора будет равна

$$\lambda_3 = 0,17 \cdot 10^{-6} \cdot 2 = 0,34 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$$

Расчет надежности блоков аппаратуры

Суммарная интенсивность отказов аппаратуры определена в табл. 7.

Таблица 7

Расчет суммарной интенсивности отказов аппаратуры

Элементы аппаратуры	Интенсивность отказов $\lambda_3 \cdot 10^6$
	Донная часть
Интегральные микросхемы	3,72
Резисторы	0,191
Конденсаторы	5,43
Полупроводниковые приборы	4,05
Печатные платы	0,21
Разъемы	0,073
Кварцевые резонаторы	0,34
Разъемы	0,073
ИТОГО	14,3

Таким образом, рассчитанные интенсивности отказов для донной части аппаратуры ГАКС составляют $\lambda_d = 14,3 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$

Для модуля ВМССС $\lambda_m = 14,3 \cdot 10^{-6}, 1/\text{ч.}$

Определим среднее время наработки на отказ и вероятность отказа донной части аппаратуры.

Среднее время наработки на отказ определяется формулой

$$t = \lambda^{-1} \text{ ч.} \quad (14)$$

При этом вероятность $P(t)$ безотказной работы аппаратуры в течение времени наработки на отказ t будет равна

$$P(t) = e^{-1} = 0,37. \quad (15)$$

Вероятность безотказной работы аппаратуры за время t (часов) определяется формулой

$$P(t) = e^{-\lambda t}. \quad (16)$$

Результаты расчетов среднего времени наработки на отказ отдельных блоков, всего комплекта аппаратуры в целом и вероятность безотказной работы аппаратуры за время 5000 часов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Среднее время наработки на отказ и вероятность безотказной работы за 5000 часов

Части аппаратуры ГАКС	$\lambda \cdot 10^6$	t , ч	t , лет	$P(t)$ (за 5000 ч)
Донная часть	14,3	69 500	8,0	0,93
Часть ГАКС – ВМССС	14,3	69 500	8,0	0,93

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Если принять, что время наработки на отказ должно быть 5000 часов, что требуется по техническому заданию [10], то полученные расчетные результаты (69 500 часов) значительно превосходят это значение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А. Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. – 2015. – № 3. – С. 78–84.

2. *Филиппов Б.И., Чернецкий Г.А.* Выбор ансамбля сигналов для передачи команд управления в гидроакустических каналах связи // Известия ВолгГТУ. Серия: Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. – 2015. – Т. 11, № 3 (161). – С. 69–72.

3. *Криволапов Г.И., Потеряева Л.А., Чернецкий Г.А.* Результаты испытания аппаратуры двусторонней гидроакустической связи для автономных донных станций // Методика и техника сейсмоакустических и вибротсейсмических исследований на акваториях: сборник научных трудов / под ред. В.И. Добринского. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988. – С. 10–16.

4. Некоторые результаты испытаний АГАС для управления и диагностики ДСС / Г.И. Криволапов, А.А. Макаров, Н.И. Постников, Г.А. Чернецкий // Методика и техника сейсмоакустических и вибротсейсмических исследований на акваториях: сборник научных трудов / под ред. В.И. Добринского. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988. – С. 17–25.

5. Разработка принципов и устройств передачи геофизической информации по гидроакустическому каналу связи: отчет / НЭИС им. Н.Д. Псурцева; науч. рук.: А.А. Макаров, Л.А. Чиненков. – Новосибирск, 1983. – 55 с. – № ГР 81019632. – Инв. № 02830079562.

6. Аппаратура управления автономными донными сейсмическими станциями: отчет / НЭИС им. Н.Д. Псурцева; науч. рук.: А.А. Макаров, Г.А. Чернецкий. – Новосибирск, 1987. – 75 с. – № ГР 01840005880. – Инв. № 020880016084.

7. *Криволапов Г.И., Макаров А.А., Чернецкий Г.А.* Комплекс устройств для передачи данных по гидроакустическому каналу связи // Тезисы докладов Четвертой Дальневосточной акустической конференции «Акустические методы и средства исследования океана». – Владивосток, 1986. – С. 107–108.

8. Анализатор характеристик гидроакустических каналов связи: отчет / НЭИС им. Н.Д. Псурцева; науч. рук.: А.А. Макаров, Г.А. Чернецкий. – Новосибирск, 1985. – 77 с. – № ГР 0184000588. – Инв. № 02860021414.

9. Электротехнический справочник: в 4 т. / под общ. ред. И.Н. Орлова. – 9-е изд., стер. – М.: Изд-во МЭИ, 2003.

10. Разработка принципов и устройств передачи геофизической информации по гидроакустическому каналу связи: отчет / НЭИС им. Н.Д. Псурцева; науч. рук.: А.А. Макаров, Л.А. Чиненков. – Новосибирск, 1982. – 76 с. – № ГР 81019632. – Инв. № 02830014986.

Филиппов Борис Иванович, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – радиотехника и связь. Имеет 27 статей, 2 учебных пособия и одну монографию. E-mail: filippov-boris@rambler.ru

Малахова Екатерина Андреевна, студент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. E-mail: kate.lion@mail.ru

Calculation of reliability of ground part of the equipment hydroacoustic communication channel*

В.И. Filippov¹, Е.А. Malahova²

¹ 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk state technical university, associate professor, candidate of technical science of. E-mail: filippov-boris@rambler.ru

² 630073, Russian Federation, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20, Novosibirsk state technical university. E-mail: kate.lion@mail.ru

In work calculation of reliability of ground part of the equipment of a hydroacoustic communication channel is shown. At calculation of reliability that circumstance was considered that the ground part of the equipment is operated under water and it is inaccessible to repair in case of refusal of the equipment and, respectively, impossibility of its emersion. On nature of application the equipment, according to GOST V.20.39.307-76, belongs to the class 2, a look 1 (ground part – category A), as was considered in the course of calculations when determining the corresponding elements of the equipment depending on ambient temperature. At calculations it was considered that the ground part of the equipment which is deeply under water will have temperature no more than + 250 C. This temperature it was also considered at reliability calculation. Short tests or on the vessel at more high temperature won't affect the land significantly for its time of an operating time to the full. Reliability of the equipment is defined by reliability of chips, diodes, transistors, resistors, condensers, printed-circuit boards, sockets and auxiliary elements of schemes. At an assessment of reliability of the equipment it was used exponential the law of distribution of probabilities of refusal of its elements as only for this law there are necessary help data on failure rate of elements of electronic schemes. All calculations of failure rate of various elements were tabulated. Calculations showed, a time between failures of ground part of the equipment of a hydroacoustic communication channel and the emerging modules of satellite communication system (BMCCC) makes 69500 hours that much more set (5000 hours).

Keywords: hydroacoustic channel, ground station, failure rate, average time of a time between failures, temperature condition, block diagram, exponential law, standard rating

DOI: 10.17212/2307-6879-2015-3-79-97

* Received 21 August 2015.

REFERENCES

1. Filippov B.I., Chernetskii G.A. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [The analysis of statistical characteristics of signals and hindrances in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika – Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Management, Computer Science and Informatics*, 2015, no. 3, pp. 78–84.

2. Filippov B.I., Chernetskii G.A. Vychor ansamblya signalov dlya peredachi komand upravleniya v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Choice of ensemble of signals for transfer of teams of management in hydroacoustic communication channels]. *Izvestiya VolgGTU. Seriya: Elektronika, izmeritel'naya tekhnika, radiotekhnika i svyaz' – News of Volgograd state technical University. Series: electronics and instrumentation engineering, radio engineering and communication*, 2015, vol. 11, no. 3 (161), pp. 69–72.

3. Krivolapov G.I., Poteryaeva L.A., Chernetskii G.A. [Results of test of the equipment of two-way hydroacoustic communication for autonomous ground stations]. *Metodika i tekhnika seismoakusticheskikh i vibroseismicheskikh issledovaniy na akvatoriyakh. Sbornik nauchnykh trudov [A technique and technology of seismoacoustic and vibrothese-smichesky researches on akvatoriyakh. Collection of science works]*. Ed. by V.I. Dobrinsky. Novosibirsk, 1988, pp. 10–16.

4. Krivolapov G. I., Makarov A.A., Postnikov N.I., Chernetskii G.A. [Some results of tests of AGAS for management and diagnostics of DSS]. *Metodika i tekhnika seismoakusticheskikh i vibroseismicheskikh issledovaniy na akvatoriyakh. Sbornik nauchnykh trudov [A technique and technology of seismoacoustic and vibrothese-smichesky researches on akvatoriyakh. Collection of science works]*. Ed. by V.I. Dobrinsky. Novosibirsk, 1988, pp. 17–25.

5. Makarov A.A., Chinenkov L.A., res. supervisors. [Development of the principles and devices of transfer of geophysical information on a hydroacoustic communication channel]. Report no. GR 81019632. Novosibirsk, 1983. 55 p. (In Russian, unpublished)

6. Makarov A.A., Chernetskii G.A., res. supervisors. [Equipment of management of autonomous ground seismic stations]. Report no. GR 01840005880, Novosibirsk, 1987. 75 p. (In Russian, unpublished)

7. Krivolapov G.I., Makarov A.A., Chernetskii G.A. [Kompleks of devices for data transmission on a hydroacoustic communication channel]. *Tezisy dokladov Chetvertoi Dal'nevostochnoi akusticheskoi konferentsii “Akusticheskie metody i sredstva issledovaniya okeana”* [The fourth Far East acoustic conference “Acoustic

methods and means of research of the Ocean”. Theses of reports]. Vladivostok, 1986, pp. 107–108.

8. Makarov A.A., Chernetskii G.A., res. supervisors. [Analyzer of characteristics of hydroacoustic communication channels]. Report no. GR 0184000588, Novosibirsk, 1985. 77 p. (In Russian, unpublished)

9. Orlov I.N., ed. *Elektrotekhnicheskii spravochnik*: v 4 t. [The electrotechnical reference book: in 4 vol.]. 9th ed., ster. Moscow, MEI Publ., 2003.

10. Makarov A.A., Chinenkov L.A., res. supervisors. [Development of the principles and devices of transfer of geophysical information on a hydroacoustic communication channel]. Report no. GR 81019632, Novosibirsk, 1982. 76 p. (In Russian, unpublished)