

базового елемента налаштовуваної сортувальної мережі.  
 Визначені розрядності складових та отримані вирази для оцінки апаратної та часової складності налаштовуваних сортувальних мереж, а також їх ефективності.

Література

1. Мельник А.О. Архітектура комп'ютера / А.О. Мельник. – Луцьк: Волинська обл. друк, 2008. – 470 с.
2. Кун С. Матричные процессоры на СБИС: Пер. с англ. / С. Кун. - М.: Мир, 1991. - 672с.
3. Мельник А.О. Принципи побудови буферної сортувальної пам'яті / А.О. Мельник // Вісник Державного університету "Львівська Політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". - 1996. - N307.-с.65-71.

4. Мельник А.О. Спеціалізовані комп'ютерні системи реального часу / А.О. Мельник. – Львів: НУ „Львівська політехніка”, 1996. – 60 с.
5. Мельник Анатолій. Структурна організація пам'яті з впорядкованим доступом на основі сортувальних мереж/ Анатолій Мельник, Д.Х. Аль Равашдех // Науково-технічний журнал Національного аерокосмічного університету ім М.Є. Жуковського «ХАІ» «Радіоелектронні і комп'ютерні системи» .-2010.-№6 (47).- с. 15-19.
6. Мельник А.А. Элемент сортировочной сети / А.А. Мельник, В.С. Ильков. АС №1603367, БИ № 40, 1990.
7. Майоров С.А. Принципы организации цифровых машин/ Майоров С.А., Новиков Г.И. Л. «Машиностроение», Ленинградское отд-ние, 1974, 431 с.

*Отримано співвідношення для оцінки впливу теплової навантаження на показники надійності двокаскадних ТЕУ різних конструкцій при заданому перепаді температури. Наведено порівняльний аналіз показників надійності та основних значущих параметрів двокаскадних ТЕУ.*

*Ключові слова: надійність, двокаскадні термоелектричні охолоджувальні пристрої.*

*Получены соотношения для оценки влияния тепловой нагрузки на показатели надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций при заданном перепаде температуры. Приведен сравнительный анализ показателей надежности и основных значимых параметров двухкаскадных ТЭУ.*

*Ключевые слова: надежность, термоэлектрические охлаждающие устройства.*

*Relations are obtained to assess the effect of heat load on the two-stage reliability thermoelectric cooling device of various designs for a given temperature drop. An analysis of reliability and two-stage main relevant parameters thermoelectric cooling device.*

*Key words: reliability, two-cascade thermoelectric cooling device.*

УДК 621.362–192

# ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ПОКАЗАТЕЛИ НАДЕЖНОСТИ ДВУХКАСКАДНЫХ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ОХЛАЖДАЮЩИХ УСТРОЙСТВ

**В. П. Зайков**

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник сектора  
 Государственное предприятие «Научно-исследовательский институт «Шторм»  
 ул. Терешковой, 27, г. Одесса, Украина, 65078  
**Контактный тел.:** (044) 45–49–17  
**E-mail:** aninfo@fromru.com

**В. И. Мещеряков**

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой\*  
**Контактный тел.:** 050-336-32-78  
**E-mail:** gradan@ua.fm

**А. А. Гнатовская**

Старший преподаватель\*  
**Контактный тел.:** (044) 44-88-53 , 067-769-00-87  
**E-mail:** aninfo@fromru.com

\*Кафедра информатики  
 Одесский государственный экологический университет  
 ул. Львовская, 15, г. Одесса, Украина, 65101

**1. Введение**

В последнее время в термоэлектрическом приборостроении все более широкое применение нашли унифицированные ряды модулей и собранные на их основе

каскадные термоэлектрические охлаждающие устройства (ТЭУ) различных конструкций.

Применение каскадных ТЭУ обусловлено не только достижением максимально возможного уровня охлаждения, но и повышением экономичности охлаждения при

заданном перепаде температуры.

В ряде случаев при проектировании в распоряжении разработчика имеется ряд конструкций каскадных ТЭУ либо ряд унифицированных (стандартных) модулей, отличающихся друг от друга количеством термоэлементов заданной геометрии. Объект охлаждения (элемент электроники либо составная часть РЭА) характеризуется мощностью собственных тепловыделений, габаритами, массой, рабочей температурой, которые и определяют суммарную тепловую нагрузку.

## 2. Основная часть

При компоновке каскадного ТЭУ необходимо оценить влияние тепловой нагрузки на основные параметры и показатели надежности при заданном перепаде температур. Для этой цели необходимо при заданном перепаде температур  $\Delta T$  и выбранной конструкции ТЭУ (количеством термоэлементов в первом  $n_1$  и втором  $n_2$  каскадах) определить основные значимые параметры, а именно, относительные рабочие токи  $B_1$  и  $B_2$  и относительные перепады температур  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  в каскадах в зависимости от величины тепловой нагрузки и затем оценить показатели надежности ТЭУ, чему и посвящена настоящая работа.

В настоящей работе рассмотрены двухкаскадные ТЭУ с последовательным электрическим соединением каскадов, которые, как правило, собираются на базе унифицированных и одинаковых ветвей термоэлементов или стандартных модулей с такими ветвями. При определении показателей надежности каскадного ТЭУ, а именно интенсивности отказов  $\lambda$  либо вероятности безотказной работы  $P$  полагаем, что все ветви термоэлементов ТЭУ, в том числе и каскады, соединены электрически последовательно. При этом выход из строя любого термоэлемента (ветви) приводит к выходу из строя модуля, каскада и устройства в целом.

События, заключающиеся в выходе термоэлементов из строя, принимаются независимыми [1]. Кроме того, каждый каскад работает в различных температурных условиях, при различных тепловых нагрузках, что приводит к изменению основных значимых параметров ТЭУ [2, 3] и это необходимо учитывать при оценке показателей надежности каскадного ТЭУ заданной конструкции. Для решения поставленной задачи воспользуемся следующими соотношениями:

Холодопроизводительность  $Q_0$  двухкаскадного ТЭУ можно записать в виде:

$$Q_0 = n_1 I_{\max 1}^2 R_1 (2B_1 - B_1^2 - \Theta_1) \quad (1)$$

где  $I_{\max 1} = \frac{e_1 T_0}{R_1}$  – максимальный рабочий ток первого каскада, А;

$T_0$  – температура теплопоглощающего спая первого каскада, К;

$e_1$  – коэффициент термоэдс ветви термоэлемента первого каскада, В/К;

$R_1$  – электрическое сопротивление ветви термоэлемента первого каскада, Ом;

$B_1 = \frac{I}{I_{\max 1}}$  – относительный рабочий ток первого

каскада, *отн. ед.*;

$\Theta_1 = \frac{T_1 - T_0}{\Delta T_{\max 1}}$  – относительный перепад температур

первого каскада, *отн. ед.*;

$T_1$  – промежуточная температура, К;

$\Delta T_{\max 1}$  – максимальный перепад температур в первом каскаде, К;

$n_1$  – количество термоэлементов в первом каскаде, шт.

Последовательное электрическое соединение каскадов определяет равенство рабочих токов в каскадах, которое можно записать в виде:

$$I_{\max 1} B_1 = I_{\max 2} B_2 \quad (2)$$

где  $B_2 = \frac{I}{I_{\max 2}}$  – относительный рабочий ток второго

каскада, *отн. ед.*;

$I_{\max 2} = \frac{e_2 T_1}{R_2}$  – максимальный рабочий ток второго

каскада, А;

$e_2$  – коэффициент термоэдс ветви термоэлемента второго каскада, В/К;

$R_2$  – электрическое сопротивление ветви термоэлемента второго каскада, Ом.

Общий перепад температур на двухкаскадном ТЭУ можно записать в виде:

$$\Delta T^{N=2} = \Delta T_1 + \Delta T_2 = \Delta T_{\max 1} \Theta_1 + \Delta T_{\max 2} \Theta_2 \quad (3)$$

где  $\Delta T_1 = T_1 - T_0$  – перепад температур в первом каскаде, К;

$\Delta T_2 = T - T_1$  – перепад температур во втором каскаде, К;

$T$  – температура тепловыделяющего спая второго каскада, К;

$\Theta_2 = \frac{T - T_1}{\Delta T_{\max 2}}$  – относительный перепад температур

во втором каскаде, *отн. ед.*;

$\Delta T_{\max 2}$  – максимальный перепад температур во втором каскаде, К;

Условие теплового сопряжения каскадов можно записать в виде:

$$Q_{02} = W_1 + Q_0 \quad (4)$$

где  $Q_{02} = n_2 I_{\max 2}^2 R_2 (2B_2 - B_2^2 - \Theta_2)$

$$W_1 = 2n_1 I_{\max 1}^2 R_1 B_1 \left( B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \theta_1 \right).$$

Подставив выражения (2...4) в (1) получим:

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1} = \frac{2B_1 b - B_1^2 c + 2B_1^3 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}}}{d - 2B_1 a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0}}, \quad (5)$$

где:  $a = \frac{n_1 I_{\max 1}^2 R_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2}$ ;  $d = \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + a$ ;  $b = \frac{I_{\max 1}}{I_{\max 2}} + \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}}$ ;

$$c = \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} + 4a \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} + \frac{I_{\max 1}^2}{I_{\max 2}^2} + 2a;$$

Обозначим:

$$C_1 = \frac{Q_0}{n_1 I_{\max 1}^2 R_1} - \text{относительная тепловая нагрузка}$$

первого каскада, *отн. ед.*

Из выражения (5) получим соотношение для определения относительного рабочего тока  $B_1$  для заданных перепада температур и тепловой нагрузки.

$$2B_1^3 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} - B_1^2 c + 2B_1 \left( b + aC_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) - \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} - C_1 d = 0 \quad (6)$$

Для упрощения расчетов с погрешностью 1...5% уравнение (6) можно записать в виде квадратного уравнения

$$B_1^2 c + 2B_1 \left( b + aC_1 \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \right) + \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} + C_1 d = 0 \quad (7)$$

Используя метод последовательных приближений, определяем основные значимые параметры  $B_1, B_2, \Theta_1, \Theta_2$  с учетом температурной зависимости параметров. Достаточно двух-трех приближений. При этом  $\Theta_1$  и  $\Theta_2$  вычисляем по формулам:

$$\Theta_1 = 2B_1 - B_1^2 - C_1; \quad (8)$$

$$\Theta_2 = \frac{\Delta T}{\Delta T_{\max 2}} - \frac{\Delta T_{\max 1}}{\Delta T_{\max 2}} (2B_1 - B_1^2 - C_1). \quad (9)$$

Для двухкаскадного ТЭУ относительную величину интенсивности отказов можно записать в виде:

$$\frac{\lambda_2}{\lambda_0} = \frac{n_1 B_1^2 (\Theta_1 + C_1) \left( B_1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2 K_{T1} + n_2 B_2^2 (\Theta_2 + C_2) \left( B_2 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2 K_{T2}}{\left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 1}}{T_0} \Theta_1 \right)^2 \left( 1 + \frac{\Delta T_{\max 2}}{T_1} \Theta_2 \right)^2}, \quad (10)$$

где:  $\lambda_0$  – номинальная интенсивность отказов, 1/ч;

$$C_2 = \frac{Q_0 + W_1}{n_2 I_{\max 2}^2 R_2} - \text{относительная тепловая нагрузка}$$

второго каскада, *отн. ед.*;

$K_{T1}, K_{T2}$  – коэффициенты значимости с учетом влияния пониженных температур [5].

Данные расчетов показателей надежности и основных значимых параметров сведены в таблицу 1 для  $l/s = 10, T = 300 K, \Delta T = 60 K, 70 K, 80 K$  при вариации отношения количества термоэлементов в смежных каскадах

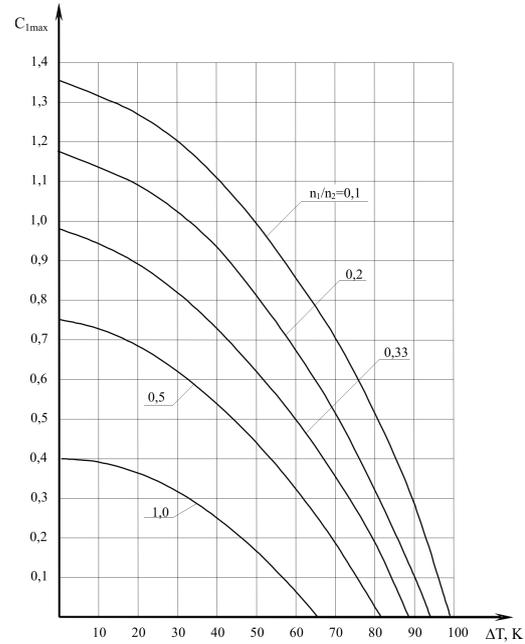
$\frac{n_1}{n_2} = 0,5; 0,33; 0,2; 0,1$  ( $n_1 = 9$ ) и усредненном значении

эффективности термоэлектрического модуля  $Z_n = 2,5 \cdot 10^{-3} 1/K$ . В дальнейшем для сокращения объема

рукописи приведены данные для  $\frac{n_1}{n_2} = 0,33$ .

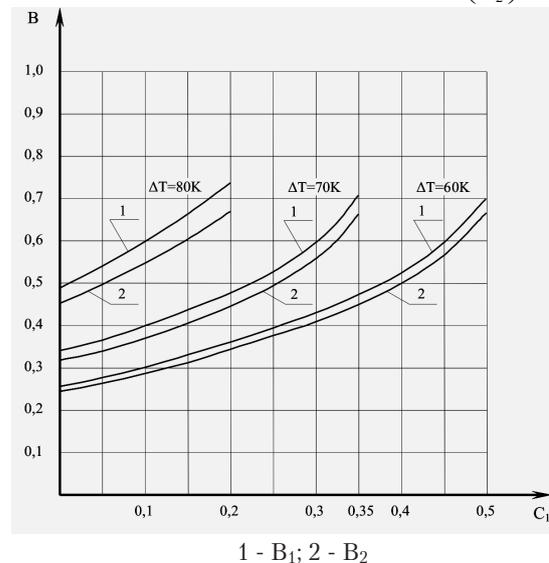
Представленная на рисунке 1 функциональная зависимость (5) позволяет оценить величину максимальной тепловой нагрузки  $C_{1\max}$  в зависимости от перепада температур

$\Delta T$  при вариации отношения  $\frac{n_1}{n_2}$  [4].



**Рис. 1.** Зависимость максимальной величины относительной тепловой нагрузки  $C_{1\max}$  от перепада температур  $\Delta T$  2-х каскадного ТЭУ для различных значений  $\frac{n_1}{n_2} = 1,0; 0,5; 0,33; 0,2; 0,1$  при  $T = 300K$ .

С уменьшением отношения  $\frac{n_1}{n_2}$  величина  $C_{1\max}$  увеличивается при заданном перепада температур. С ростом перепада температур величина  $C_{1\max}$  уменьшается для заданной конструкции двухкаскадного ТЭУ  $\left( \frac{n_1}{n_2} \right)$ .



**Рис. 2.** Зависимость относительного рабочего тока  $B_1, B_2$  в каскадах 2-х каскадного ТЭУ от относительной тепловой нагрузки  $C_1$  при  $\Delta T = 60K; 70K; 80K, T = 300K, n_1 = 9, \frac{n_1}{n_2} = 0,33$

На рисунке 2 представлены зависимости относительного рабочего тока  $B_1$  и  $B_2$  в каскадах двухкаскадного

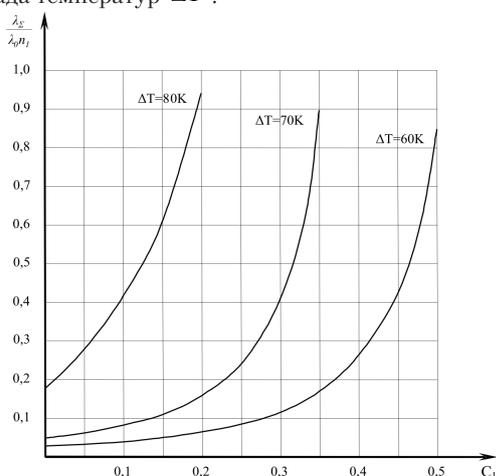
ТЭУ от относительной тепловой нагрузки  $C_1$  при  $T = 300 K, \Delta T = 60 K, 70 K, 80 K, n_1 = 9, \frac{n_1}{n_2} = 0,33,$

что позволяет легко определить относительный рабочий ток при заданной величине  $C_1$  и  $\Delta T$ .

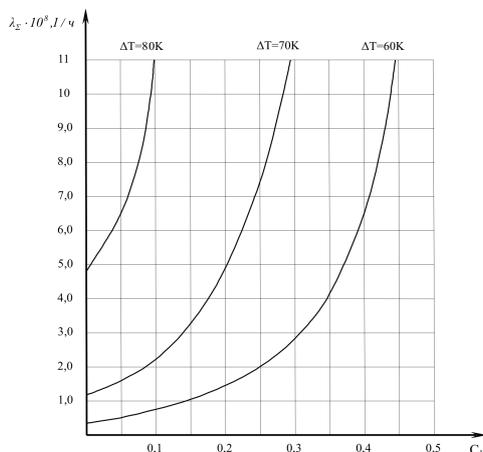
С ростом тепловой нагрузки величина относительно рабочего тока в каскадах  $B_1$  и  $B_2$  увеличивается при заданном перепаде температур  $\Delta T$ .

С ростом перепада температур  $\Delta T$  величина относительного рабочего тока  $B_1$  и  $B_2$  увеличивается при заданной тепловой нагрузке  $C_1$ .

С ростом тепловой нагрузки  $C_1$  величина относительной интенсивности отказов  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0}$  увеличивается (рис. 3) при различных значениях отношения  $\frac{n_1}{n_2} = 0,33$  и перепада температур  $\Delta T$ .



**Рис. 3.** Зависимость относительной величины интенсивности отказов  $\frac{\lambda_{\Sigma}}{\lambda_0 n_1}$  2-х каскадного ТЭУ от относительной тепловой нагрузки  $C_1$  при  $\Delta T = 60K; 70K; 80K, T = 300K, \frac{n_1}{n_2} = 0,33$

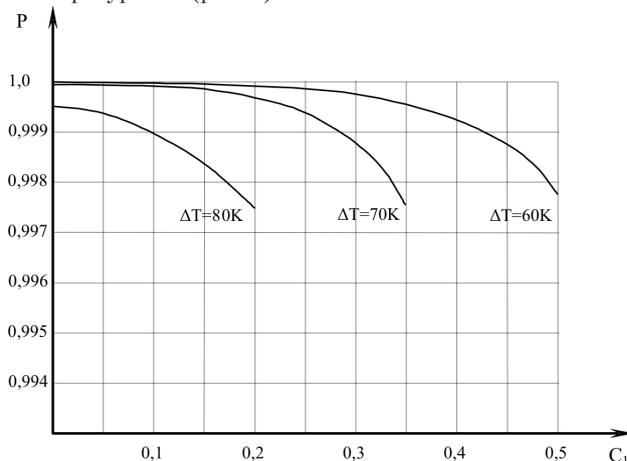


**Рис. 4.** Зависимость интенсивности отказов  $\lambda_{\Sigma}$  2-х каскадного ТЭУ от относительной тепловой нагрузки  $C_1$  при  $\Delta T = 60K; 70K; 80K, T = 300K, n_1 = 9, \frac{n_1}{n_2} = 0,33$

С ростом перепада температур  $\Delta T$  величина интенсивности отказов также увеличивается при заданной тепловой нагрузке  $C_1$ .

Характер зависимости  $\lambda_{\Sigma} = f(C_1)$  (рис. 4) идентичен рисунку 3.

С ростом тепловой нагрузки  $C_1$  вероятность безотказной работы  $P$  уменьшается при заданном перепаде температур  $\Delta T$  (рис. 5).



**Рис.5.** Зависимость вероятности безотказной работы  $P$  2-х каскадного ТЭУ от относительной тепловой нагрузки  $C_1, \Delta T = 60K; 70K; 80K, T = 300K, n_1 = 9, \frac{n_1}{n_2} = 0,33$

С ростом перепада температур  $\Delta T$  вероятность безотказной работы  $P$  также уменьшается при заданной тепловой нагрузке  $C_1$ .

**Таблица 1**

$$\frac{n_1}{n_2} = 0,33$$

$\Delta T = 60 K$											
1	0,00	0,25	0,24	1,15	0,44	0,37	268,0	0,0	0,011	0,29	0,99997
2	0,18	0,30	0,29	1,40	0,41	0,40	266,0	0,1	0,024	0,64	0,99994
3	0,36	0,36	0,35	1,67	0,39	0,43	264,7	0,2	0,053	1,43	0,99986
4	0,54	0,43	0,41	1,98	0,37	0,445	263,4	0,3	0,106	2,87	0,99971
5	0,72	0,52	0,50	2,40	0,37	0,45	263,5	0,4	0,246	6,64	0,99934
6	0,90	0,70	0,68	3,25	0,40	0,40	266,0	0,5	0,850	23,00	0,99770
$\Delta T = 70 K$											
1	0,00	0,34	0,32	1,55	0,56	0,46	262,3	0,0	0,040	1,08	0,99989
2	0,17	0,40	0,38	1,82	0,54	0,48	261,1	0,1	0,081	2,18	0,99978
3	0,33	0,48	0,46	2,20	0,53	0,495	260,7	0,2	0,178	4,80	0,99952
4	0,50	0,59	0,56	2,70	0,54	0,49	261,0	0,3	0,410	11,10	0,99890
5	0,58 max	0,71	0,68	3,20	0,57	0,46	263,0	0,35 max	0,890	24,05	0,99760
$\Delta T = 80 K$											
1	0,00	0,49	0,45	2,10	0,74	0,54	258,0	0,0	0,178	4,82	0,99952
2	0,15	0,60	0,55	2,60	0,74	0,54	258,0	0,1	0,420	11,30	0,99887
3	0,29 max	0,74	0,67	3,20	0,73	0,53	258,0	0,20 max	0,940	25,45	0,99746

### 3. Выводы

Таким образом, предложена и рассмотрена модель взаимосвязи показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций с величиной тепловой на-

грузки при последовательном электрическом соединении каскадов.

Полученные соотношения позволяют оценить влияние тепловой нагрузки на показатели надежности, а именно, интенсивности отказов и вероятности безотказной работы двухкаскадных ТЭУ различных конструкций

при  $\frac{n_1}{n_2} = 0,5; 0,33; 0,2; 0,1$  и перепадах температуры

$$\Delta T = 60 K, 70 K, 80 K, T = 300 K.$$

Анализ расчетных данных показывает, что с ростом тепловой нагрузки при заданном перепаде температур интенсивность отказов двухкаскадных ТЭУ различных конструкций увеличивается, а, следовательно, уменьшается вероятность их безотказной работы. С ростом перепада температур  $\Delta T$  интенсивность отказов увеличивается

при заданных значениях  $\frac{n_1}{n_2}$ , и  $Q_0$ .

С уменьшением отношения  $\frac{n_1}{n_2}$  интенсивность отказов увеличивается при заданных значениях  $\Delta T, Q_0, n_1$ .

Приведенные данные указывают на возможность прогнозирования показателей надежности двухкаскадных ТЭУ различных конструкций в зависимости от величины

тепловой нагрузки и условий функционирования.

### Литература

1. Леонтьев, Л. П. Введение в теорию надежности радиоэлектронной аппаратуры [Текст] / Л. П. Леонтьев. – Рига : Изд-во АН ЛССР, 1963 – 373 с.
2. Моисеев, В. Ф. Влияние режима работы охлаждающего термоэлемента на показатели надежности термоэлектрического устройства [Текст] / В.Ф. Моисеев, В.П. Зайков / Журнал ТКЭА. – 2001. – № 4–5, С. 30–32.
3. Зайков, В. П. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности термоэлектрического устройства [Текст] / В.П. Зайков, Л.А. Киншова, В.И. Марченко / Научно-технический сборник ТРиО. – 2003. – Вып.№1. – С. 56– 62.
4. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности двухкаскадных ТЭУ в режиме  $Q_{0max}$  [Текст] / В. П. Зайков, Л. А. Киншова, Л. Д. Казанжи, Л.Ф. Храмова / Журнал ТКЭА. – 2009. – № 5, С. 34–37.
5. Зайков, В. П. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст] Книга 1. Однокаскадные устройства / В.П. Зайков, Л.А.

УДК 321.396.49

# РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ КРОСС-ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ И ЗАТУХАНИЯ ВСЛЕДСТВИЕ ДОЖДЯ

**С. В. Ельченко**

Инженер средств радио и телевидения

ООО “ЭкостарУкраина”

ул. Новгородская 11а, г. Харьков, Украина, 61145

**Контактный тел.:** 050-212-09-85

**E-mail:** elchenko@ukr.net

*У статті розглядаються результати тестування моделей, які описують кореляційний зв'язок між кросс-поляризаційною вибірністю та затуханням внаслідок впливу гідрометеорів у вигляді дощу.*  
**Ключові слова:** XPD, кросс-поляризація, кореляція.

*В статті розглядаються результати тестування моделей, описують кореляційну зв'язок між кросс-поляризаційною вибірністю та затуханням внаслідок впливу гідрометеорів в вигляді дощу.*  
**Ключевые слова:** XPD, кросс-поляризація, кореляція.

*The present article considers the results of testing of models describing the correlation between cross-polarization discrimination and co-polar attenuation due to rain.*  
**Key words:** XPD, cross-polarization, correlation.

## 1. Введение

Опытным путем, в процессе анализа результатов измерений, обнаружена корреляционная связь между деполяризацией и затуханием вследствие воздействия на канал связи гидрометров в виде дождя, в следствие чего выведены несколько математических выражений, связывающих XPD и CPA («Cross-Polarization Discrimination» и «Co-Polar Attenuation»). Выражения XPD и CPA корреляции выведены при использовании теории рассеивания в дождевой капле и различных моделей

распределения размеров и формы дождевой капли. Эти выражения обычно включают в себя следующие переменные: частоту, угол наклона поляризации относительно горизонта, угол подъема канала, распределение угла наклона дождевой капли.

## 2. Моделирование XPD и CPA корреляции

На сегодняшний день существует несколько моделей, которые получили широкое применение, описывающих