

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ДЕГРАДАЦИИ МАТЕРИАЛА**

В статье проведено исследование причин деградации микросхем, изготовленных из полупроводников для обеспечения надежности дискретных устройств компьютерных систем и описан алгоритм прогнозирования надежности дискретных устройств со структурой интеллектуальной подсистемы прогнозирования надежности дискретных устройств.

**Ключевые слова:** надежность, деградация, дискретное устройство, композитный материал, алгоритм, прогнозирование.

*Кравченко Ольга Віталіївна, старший викладач, кафедра інформаційних технологій проектування, Черкаський державний технологічний університет, Україна, e-mail: kravchenko\_ov@ukr.net.*

*Кравченко Ольга Витальевна, старший преподаватель, кафедра информационных технологий проектирования, Черкасский государственный технологический университет, Украина.*

*Kravchenko Olga, Cherkasy State Technological University, Ukraine, e-mail: kravchenko\_ov@ukr.net*

УДК 621.396.6

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37703

Гнатовская А. А.

**ПОВЫШЕНИЕ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ МАТРИЧНЫХ ПРИЕМНИКОВ**

*Проанализирован подход повышения жизнеспособности матричного теплонагруженного приемника излучения, основанный на зависимости откликов элементов матрицы и его окружения, что позволяет обеспечить корректную реакцию системы управления при выходе из строя части элементов восприятия входной информации. Разработаны модельные средства, обеспечивающие визуальное представление результатов.*

**Ключевые слова:** работоспособность, надежность, теплонагруженные элементы, сигнал, интерполяция.

**1. Введение**

При передаче интенсивного лазерного излучения на расстояние по атмосферному каналу пространственное распределение пучка подвергается изменениям. Волновой фронт излучаемой волны обычно представляется сферической поверхностью, направление распространения которой совпадает с осью  $z$ . Распространение излучения низкой интенсивности в вакууме описывается следующим образом [1]:

$$A'(x', y', z' = 0) = A_0' \exp \left[ -\frac{x'^2 + y'^2}{2a_0'^2} \left( 1 - i \frac{ka_0'^2}{R} \right) \right], \quad (1)$$

где  $A_0'$  — максимальная амплитуда волны,  $a_i$  — полуширина пучка,  $k = 2\pi/\lambda$  — волновое число,  $\lambda$  — длина волны,  $R$  — радиус кривизны волнового фронта.

При рассмотрении монохроматических волн в турбулентной среде с мгновенным значением напряженности электрического поля  $E(\rho, t) \exp(i\omega t)$ , где  $\rho = \{r, z\} = \{x, y, z\}$ , полагают, что длина волны  $\lambda$  существенно меньше характерного пространственного масштаба турбулентности, а временные изменения флуктуаций диэлектрической проницаемости среды  $\epsilon(\rho, t)$  достаточно медленные, для оптически однородной среды, учитывающей турбулентное возмущение, выражение (1) принимает вид [2]:

$$A(r, z) = \frac{ik}{2\pi z} \int_{-\infty}^{\infty} A_0(r_0) \exp \left[ \frac{ik}{2z} |r - r_0|^2 + \mu(r, r_0, z) \right] d^2r_0, \quad (2)$$

где  $\mu(r, r_0, z)$  — набег фазы.

Из приведенных выражений следует, что качество восприятия изображения объекта как при отсутствии канала передачи, а тем более при его наличии, существенно зависят от расстояния для объекта и свойств канала. Действительно, при гауссовом излучателе и достаточно удаленном объекте при отсутствии искажений в канале на объект падает плоская волна с равномерной амплитудой по всей поверхности объекта. В случае фазовых искажений волнового фронта распределение интенсивности на объекте неоднородно, что приводит к искаженному восприятию изображения объекта.

Промышленное применение лазеров требует различных плотностей мощностей лазерного излучения и его пространственного распределения (резка материала, закаливание металла, шлифовка и т. п.) [3], поэтому управление лазерным пучком является необходимой функцией [4], а создание надежных средств управления является актуальной задачей [5], способствующей расширению функциональных возможностей и качества лазерной обработки.

**2. Анализ литературных данных и постановка проблемы**

Создание систем управления интенсивным лазерным излучением связано с анализом пространственного распределения интенсивности пучка. Для контроля состояния фокусировки или расфокусировки пучка [6] используют матричные приемники излучения, построенные на терморпарах, металлических терморезисторах или пироэлектрических приемниках излучения [7, 8]. Поскольку целевым назначением технологических лазерных систем является резка материалов, в том числе

и металлов, то измеряемая датчиками плотность мощности излучения оказывается сопоставимой мощностью плавления металла. Данная проблема рассматривалась [9], был предложен ряд преобразователей, обеспечивающих работоспособность при взаимодействии с интенсивными потоками [10, 11].

Пироэлектрические приемники работают по дифференциальному принципу и не нуждаются в системе поддержания опорной температуры, однако достаточно дороги, что сдерживает их широкое распространение. Боллометрические и термоэлектрические матричные приемники интенсивного лазерного излучения более инерционны и обладают меньшей временной стабильностью, нуждаются в системе обеспечения теплового режима, однако имеют существенно меньшую стоимость.

Наиболее перспективными системами отвода тепла являются термоэлектрические охлаждающие устройства, основанные на эффекте Пельтье, обладающие малыми габаритами и высокой надежностью [12, 13]. Исследованию фундаментальных принципов создания термоэлектрических материалов [14, 15], их термоэлектрической эффективности [16], методам и средствам исследования [17] в настоящее время уделяется значительное внимание, как, впрочем, и обеспечению надежности термоэлектрических преобразователей [18].

Параметрические методы повышения показателей надежности термоэлектрических охладителей позволили перевести их в разряд наиболее надежных систем обеспечения тепловых режимов теплонагруженных радиоэлектронных изделий. Вместе с тем, надежность термоэлектрических охладителей в существенной мере зависит от нагрузки, и при значительной нагрузке интенсивность отказов может снижаться на порядки по отношению к номинальной [19]. В этой ситуации паспортные показатели надежности могут служить лишь отправной точкой при проектировании приемной части системы управления интенсивным пучком.

Возникает насущная потребность в определении показателей надежности в процессе эксплуатации изделия и прогнозирования времени выхода его из строя для своевременного реагирования на это событие. Эти задачи в определенной степени были решены для термоэлектрического охлаждающего устройства путем подачи тестового теплового импульса с последующей обработкой реакции на это возмущение [20], что позволило оперативно реагировать на событие отказа или формировать прогноз времени выхода из строя по временной деградации эффективности термоэлектрического материала.

Проблема состоит в том, что при преобразовании энергии излучения, сопоставимого с энергией разрушения материала, параметрические методы повышения показателей надежности становятся малоэффективными, а средства сброса излишнего теплового потока обладают инерционностью и не в состоянии реагировать на кратковременные тепловые нагрузки.

### 3. Объект, цель и задачи исследования

*Объект исследования* — связность откликов соседних элементов матричного приемника.

*Целью* дальнейшего повышения работоспособности теплонагруженной подсистемы является поиск путей сохранения ее жизнеспособности при выходе из строя

одного из теплонагруженных элементов матрицы системы управления пространственным распределением плотности излучения.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

- 1) построить алгоритм модельного эксперимента;
- 2) создать действующую модель эксперимента;
- 3) определить погрешности и ограничения подхода.

### 4. Результаты исследования матрицы теплонагруженных элементов

Гипотеза состояла в том, что при выходе из строя одного из элементов матрицы теплонагруженных элементов и идентификации дефектного элемента необходимо заменить его отклик на усредненное значение, полученное от окружающих элементов посредством интерполяции. Поскольку пространственное распределение плотности мощности излучения близко к гауссовому (формулы 1 и 2), то для фокусаторов логично использовать гауссову модель распределения.

Для проверки адекватности предложенного информационного подхода проведены модульные эксперименты в среде LabVIEW. Предполагался выход из строя одного из центральных элементов матрицы, расположенного на различном расстоянии от центра воздействия. Входной сигнал моделировался двумерным гауссовым распределением с привязкой к центру матрицы с вариацией среднеквадратичного отклонения в диапазоне  $\sigma = 0,25; 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0$ , определяющего степень связи окружения дефектного элемента. Число элементов матрицы  $19 \times 19$ , в качестве фильтра использовалось скользящее окно.

Поскольку гауссово распределение является симметричным, то оказалось возможным ограничиться одномерной моделью, которая является более наглядной. Методика модельного эксперимента включала в себя следующие шаги:

1. Построение кривой гауссова распределения с нормализацией по амплитуде и вариацией по  $\sigma$  — рис. 1, 2, которое моделирует входной сигнал на матрице с разной степенью связи между соседними точками.

2. Построение низкочастотного фильтра — интерполяционного окна по соседним точкам (рис. 3).

3. Для среднеквадратичного отклонения  $\sigma = 0,25$ , считая вышедшим из строя нулевой элемент, определение его значения по соседним элементам с номерами  $-1$  и  $+1$  с последующим вычислением относительной погрешности от такой замены по сравнению с эталонным сигналом.

Сдвиг точки интереса на шаг вправо, т. е. имитация выхода из строя точки, сдвинутой от центра выборки на один элемент, интерполяция значения этой точки, и определение относительной погрешности замены этой точки. И так далее до предпоследней точки.

4. Повторение п. 3 для других значений  $\sigma$  — рис. 4.

5. Определение относительных погрешностей при различных значениях среднеквадратичного отклонения, построение графиков и таблиц — рис. 5, 6.

6. Анализ табличных (табл. 1) и графических данных.

7. Принятие решений относительно возможности и целесообразности использования информационных подходов по повышению надежности проектируемой информационной системы.

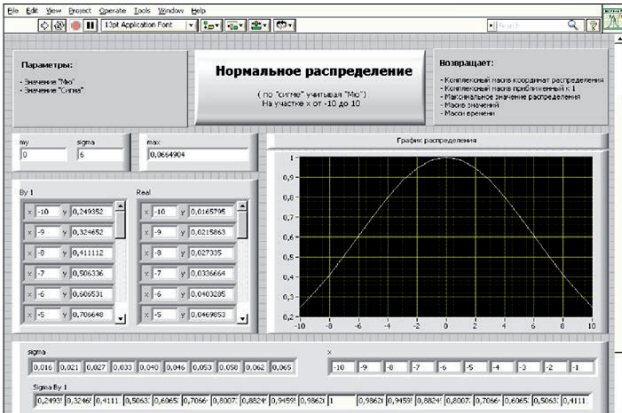


Рис. 1. Интерфейс пользователя

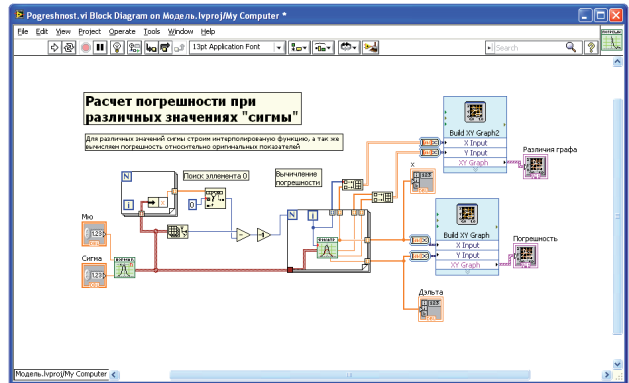


Рис. 5. Расчет погрешностей замены дефектных элементов матрицы

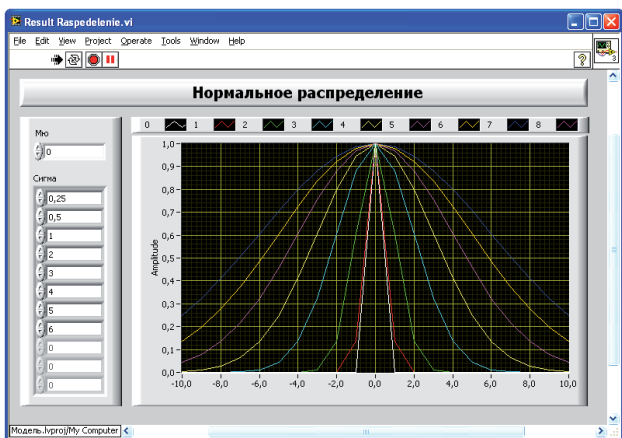


Рис. 2. Нормальное распределение, нормированное по амплитуде

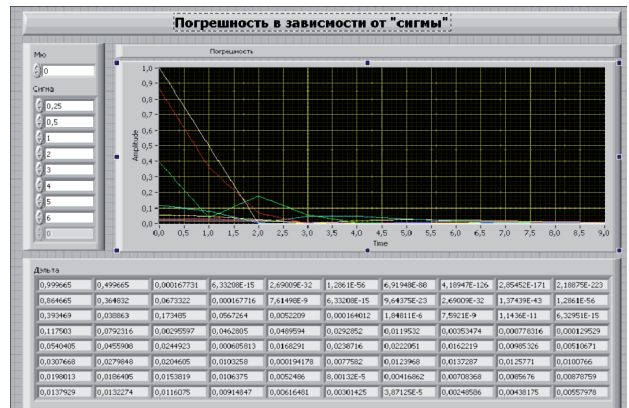


Рис. 6. Интерфейс программы расчета погрешностей (% , × 10) замены откликов дефектных элементов для различных значений  $\sigma$

Таблица 1

Относительные погрешности замены дефектных элементов, %, × 10

$\sigma = 3$	$\sigma = 4$	$\sigma = 5$	$\sigma = 6$
0,0540405	0,0307668	0,0198013	0,0137929
0,0455908	0,0279848	0,0186405	0,0132274
0,0244923	0,0204605	0,0153819	0,0116075
0,000605813	0,0103258	0,0106375	0,00914847
0,0168291	0,000194178	0,0052486	0,00616481
0,0238716	0,0077582	8,00132E-5	0,00301425
0,0222051	0,0123968	0,00416862	3,87125E-5
0,0162219	0,0137287	0,00708368	0,00248586
0,00985326	0,0125771	0,0085676	0,00438175
0,00510671	0,0100766	0,00878759	0,00557978
$\sigma = 0,25$	$\sigma = 0,5$	$\sigma = 1$	$\sigma = 2$
0,999665	0,864665	0,393469	0,117503
0,499665	0,364832	0,038863	0,0792316
0,000167731	0,0673322	0,173485	0,00295597
6,33208E-15	0,000167716	0,0567264	0,0462805
2,69009E-32	7,61498E-9	0,0052209	0,0489594
1,2861E-56	6,33208E-15	0,000164012	0,0292852
6,91948E-88	9,64375E-23	1,84811E-6	0,0119532
4,18947E-126	2,69009E-32	7,5921E-9	0,00353474
2,85452E-171	1,37439E-43	1,1436E-11	0,000778316
2,18875E-223	1,2861E-56	6,32951E-15	0,000129529

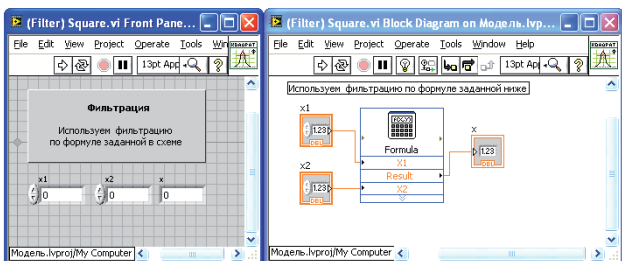


Рис. 3. Прямоугольный симметричный фильтр

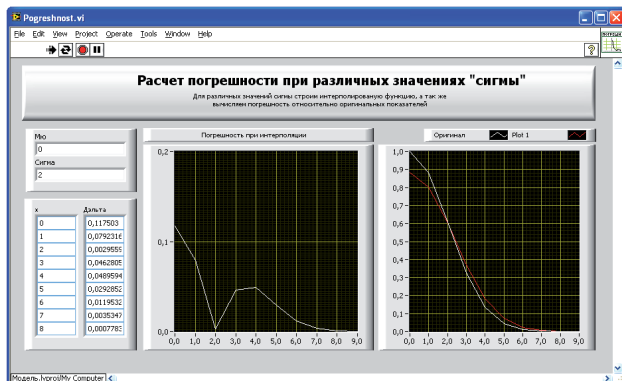


Рис. 4. Погрешности интерполяции по окружению

## 5. Обсуждение результатов исследования повышения жизнеспособности матричного теплонагруженного приемника

Из полученных данных становится очевидным, что даже при  $\sigma = 0,25$ , т. е. наихудшей связи между откликами соседних элементов (фокусировке пучка), погрешность составляет около 10 %. При больших значениях размытия пучка однозначно видна эффективность предложенного метода программной замены аппаратных средств.

Подход основан на корреляционной связи сигнала между выборками соседних элементов, поэтому ограничение метода определено теоремой Котельникова, т. е. пространственной частотой сечения распределения плотности мощности лазерного пучка. При сфокусированном пучке — погрешность максимальная, при расфокусировке — погрешность приемлемая для реальных систем управления лазерным пучком.

Результаты эксперимента показывают, что в условиях, когда плотность воспринимаемой энергии излучения находится на уровне предельной возможности тепловой нагрузки матричных приемников излучения с термоэлектрическими охладителями, реальным способом сохранения жизнеспособности системы может быть информативный подход.

## 6. Выводы

1. Результаты модельного эксперимента подтвердили корректность гипотезы о возможности информационного восстановления зависимостей отклика матрицы при исключении одного из его элементов (аппаратном выходе из строя теплонагруженного чувствительного приемника) за счет учета связей в окрестности дефектного элемента.

2. Определены погрешности восстановления отклика дефектного элемента при различных значениях среднеквадратичного отклонения входного воздействия, определяющие диапазон применимости предложенного принципа повышения надежности и направления дальнейшей работы, связанные с учетом краевых эффектов, влиянием шума, возможности восстановления при нескольких дефектных элементах.

## Литература

1. Воронцов, М. А. Принципы адаптивной оптики [Текст] / М. А. Воронцов, В. И. Шмальгаузен. — М.: Наука, 1985. — 336 с.
2. Гудмен, Дж. Введение в Фурье-оптику [Текст] / Дж. Гудмен. — М.: Мир, 1970. — 364 с.
3. Реди, Дж. Промышленное применение лазеров [Текст] / Дж. Реди. — М.: Мир, 1981. — 640 с.
4. Казанский, Н. Л. Формирование лазерного излучения для создания наноразмерных пористых структур материалов [Текст] / Н. Л. Казанский, С. П. Мурзин, А. В. Меженин, Е. А. Осетров // Компьютерная оптика. — 2008. — Т. 32, № 3. — С. 246–248.
5. Воскобоев, В. Ф. Надежность технических систем и техногенный риск. Часть 1. Надежность технических систем [Текст] / В. Ф. Воскобоев. — М.: ИД «Альянс», «Путь», 2008. — 200 с.
6. Мурзин, С. П. Лазерное нано структурирование металлических материалов с применением подвижных фокусаторов излучения [Текст] / С. П. Мурзин, В. И. Трегуб, А. В. Меженин, Е. Л. Осетров // Компьютерная оптика. — 2008. — Т. 32, № 4. — С. 353–356.
7. Мещеряков, В. И. Многоэлементный пироэлектрический приемник ИК-излучения [Текст] / В. И. Мещеряков // Холодильная техника и технология. — 2003. — № 4(84). — С. 77–80.
8. Кокодий, Н. Г. Алгоритмы обработки сигнала с решетчатого приемника для измерения характеристик лазерного излучения [Текст] / Н. Г. Кокодий, А. О. Пак // Вісник

Харківського національного університету. *Радіофізика та електроніка*. — 2009. — № 853. — С. 37–44.

9. Мещеряков, В. И. Взаимодействие интенсивного импульсного излучения с пироэлектрическими приемниками [Текст] / В. И. Мещеряков, Н. П. Худенко // Вісник Одеського державного університету. — 2003. — Т. 8, № 2. — С. 248–255.
10. Мещеряков, В. И. Пироэлектрический широкодиапазонный преобразователь мощности ИК-излучения [Текст] / В. И. Мещеряков, А. С. Новиченко // Оптические датчики физических величин. — Кишинев, 1990. — С. 19–20.
11. Мещеряков, В. И. Повышение надежности пироэлектрических приемников интенсивного лазерного излучения [Текст] / В. И. Мещеряков, А. Сбахи // Електромашинобудування та електрообладнання. — 2009. — Вип. 72. — С. 116–119.
12. DiSalvo, F. J. Thermoelectric Cooling and Power Generation [Text] / F. J. DiSalvo // Science. — 1999. — Vol. 285, № 5428. — P. 703–706. doi:10.1126/science.285.5428.703
13. Bell, L. E. Cooling, Heating, Generating Power, and Recovering Waste Heat with Thermoelectric Systems [Text] / L. E. Bell // Science. — 2008. — Vol. 321, № 5895. — P. 1457–1461. doi:10.1126/science.1158899
14. Sootsman, J. R. New and Old Concepts in Thermoelectric Materials [Text] / J. R. Sootsman, D. Y. Chung, M. G. Kanatzidis // *Angewandte Chemie International Edition*. — 2009. — Vol. 48, № 46. — P. 8616–8639. doi:10.1002/anie.200900598
15. Zebajadi, M. Perspectives on thermoelectrics: from fundamentals to device applications [Text] / M. Zebajadi, K. Esfarjani, M. S. Dresselhaus, Z. F. Ren, G. Chen // *Energy & Environmental Science*. — 2012. — Vol. 5, № 1. — P. 5147–5162. doi:10.1039/c1ee02497c
16. Brown, S. R. Yb 14 MnSb 11 : New High Efficiency Thermoelectric Material for Power Generation [Text] / S. R. Brown, S. M. Kauzlarich, F. Gascoin, G. J. Snyder // *Chemistry of Materials*. — 2006. — Vol. 18, № 7. — P. 1873–1877. doi:10.1021/cm060261t
17. Jurgensmeyer, A. L. High Efficiency Thermoelectric Devices Fabricated Using Quantum Well Confinement Techniques [Text] / A. L. Jurgensmeyer. — Colorado State University, 2011. — 54 p.
18. Wereszczak, A. A. Thermoelectric Mechanical Reliability [Text] / A. A. Wereszczak, H. Wang // *Vehicle Technologies Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting*. — Arlington, 11 May 2011. — P. 18.
19. Зайков, В. П. Влияние тепловой нагрузки на показатели надежности двухкаскадных термоэлектрических охлаждающих устройств [Текст] / В. П. Зайков, В. И. Мещеряков, А. А. Гнатовская // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. — 2011. — № 4/9(52). — С. 34–38. — Режим доступа: <http://journals.urau.ua/ejet/article/view/1477>
20. Спосіб визначення показників надійності термоелектричного охолоджувача і пристрій для його реалізації [Електронний ресурс]: Патент на винахід № 98594 / винахідники і власники Мещеряков В. І., Зайков В. П., Гнатовська Г. А. — зареєстровано 25.05.2012; опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. — Режим доступу: <http://uapatents.com/10-98594-sposib-viznachennya-pokaznikiv-nadiijnosti-termoelektrichnogo-okholodzhuvacha-i-pristrrij-dlya-jjogo-realizaci.html>

## ПІДВИЩЕННЯ ЖИТТЄЗДАТНОСТІ ТЕПЛОАВАНТАЖЕНИХ МАТРИЧНИХ ПРИЙМАЧІВ

Проаналізовано підхід підвищення життєздатності матричного теплоавантаженого приймача випромінювання, заснований на залежності відгуків елементів матриці і його оточення, що дозволяє забезпечити коректну реакцію системи управління при виході з ладу частини елементів сприйняття вхідної інформації. Розроблено модельні засоби, що забезпечують візуальне представлення результатів.

**Ключові слова:** працездатність, надійність, теплоавантажені елементи, сигнал, інтерполяція.

*Гнатовська Анна Арнольдівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інформатики, Одеський державний екологічний університет, Україна, e-mail: aninfo@fromru.com.*

*Гнатовська Ганна Арнольдівна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра інформатики, Одеський державний екологічний університет, Україна.*

*Gnatovskaya Anna, Odessa state environmental university, Ukraine, e-mail: aninfo@fromru.com*