

УДК 519.816

МНОГОАГЕНТНЫЙ ПОДХОД ПРИ ПРОГНОЗИРОВАНИИ ПАРАМЕТРОВ
НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙИ.Б. Бондаренко^а, А.И. Иванов^а^а Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, igorlitmo@rambler.ru

Рассмотрены принципы построения многоагентной системы для прогнозирования и расчета параметров надежности разнородных, многономенклатурных электронных модулей. Так как однопараметрические модели распределения отказов менее точны и не учитывают специфику отказов, происходящих в элементной базе модулей, то целью работы является использование двухпараметрических моделей распределения интенсивности отказов во времени и определение параметров моделей на основе результатов испытаний аппаратуры на воздействующие факторы. Прогнозирование параметров надежности модулей осуществляется с помощью множества агентов, объединенных в систему. В нее входят разнородные агенты, осуществляющие информационный обмен с пользователем. Представлена разработанная структура системы, описана работа отдельных подсистем. Имеется возможность добавлять новые агенты-методы прогнозирования, которые образуют библиотеку. Результаты прогнозирования зависят от выбранной методики расчета показателей надежности на конкретном предприятии, поэтому в разработанной системе прогнозирования используются как стандартные распределения параметров надежности, так и полученные методом группового учета аргументов. Выбор моделей для прогнозирования осуществляется исходя из рассчитанных значений среднеквадратического отклонения. Вывод результатов работы осуществляется в графическом виде. Проведенное тестирование полученных данных при испытаниях электронного модуля позволяет подтвердить правильность и эффективность разработанного подхода. Разработанная система позволит сократить время испытаний и обработки результатов испытаний сложных электронных модулей, особенно изготавливаемых впервые, на предприятиях электронной промышленности.

Ключевые слова: многоагентная система, LN-, DM- и DN-распределения, надежность, электронные модули, групповой учет аргументов, испытания.

MULTI-AGENT APPROACH IN PREDICTION OF RELIABILITY PARAMETERS
FOR ELECTRONIC MODULESI.B. Bondarenko^a, A.I. Ivanov^a^aSaint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, igorlitmo@rambler.ru

The paper deals with design principles of the multi-agent system for prediction and calculation of reliability parameters of heterogeneous, diversified electronic modules. One-parameter models of failures distribution are less accurate and do not take into account the specifics of failures occurring in the base of modules. That's why the issue has for an object the possibility to use two-parametric models of the timing intensity distribution of failures and determination of parameters for models on the basis of equipment test results on actuating factors. Prediction of reliability parameters for modules is carried out by means of numerous agents, united in a system. It includes heterogeneous agents carrying out information exchange with the user. Developed system structure is presented and the work of separate subsystems is described. The facility to add new agents-prediction techniques is available and they form a library. Prediction results depend on the chosen calculation method of reliability parameters on a specific enterprise, therefore, the developed prediction system use both standard distribution of reliability parameters and received by the method of group assessment of arguments. Selection of models for prediction is done on the basis of the calculated values of standard deviation. The output of work results is performed in a graphical form. Testing carried out on the data received during the electronic module checkout makes it possible to confirm the correctness and effectiveness of the developed approach. The developed system will give the possibility to reduce time for checkout and processing of testing results for complex electronic modules, especially manufactured at the enterprises of electronic industry for the first time.

Keywords: multi-agent system, LN-, DM- and DN-distributions, reliability, electronic modules, group assessment of arguments, tests.

Введение

При проектировании многономенклатурных сложных систем используется разнообразная элементная база, порой различных производителей. Подготовка к производству электронных модулей (ЭМ) требует отладки технологических операций, учитывающих использование элементной базы, материалов, оборудования, что требует временных затрат. Современные интегральные схемы содержат тысячи разнородных элементов в пересчете на один вывод, причем это количество постоянно растет. Это требует проведения нескольких видов испытаний как для отбраковки, так и для определения показателей надежности испытуемых ЭМ. Период приработки ЭМ при нормальных условиях длится около 1000 часов.

Производство, испытания ЭМ и обработка результатов – длительные этапы в жизненном цикле электронной аппаратуры. Исходя из этого, при производстве быстросменных ЭМ на первый план выхо-

дит выпуск продукции с заданным уровнем надежности. Исследования в области повышения эффективности производства ЭМ проводятся в основном экспериментальным путем с использованием упрощенных моделей и большим числом допущений. Сложность многопараметрических моделей [1], а также неоднозначность подходов к оценке и к способам определения показателей надежности вносят неопределенность в необходимость применения тех или иных методик [2, 3]. Еще большую трудность вызывает выбор методов прогнозирования показателей надежности ЭМ по результатам их испытаний.

В настоящей работе предложен подход для прогнозирования показателей надежности ЭМ с использованием многоагентной системы (МАС) [4, 5], а также разработана ее структура. Многоагентный подход используется исследователями для таких задач, как моделирование коллективного принятия решений в группах [6, 7], разработка игровых стратегий [8, 9], исследование поведения агентов в распределенных сетях [8, 10]. МАС позволяют решать задачи, учитывая эволюционный характер процессов и изменения состояния объектов, и обладают способностью к самоуправлению и обучению [11, 12].

Разработанная система позволит повысить эффективность производства электронной аппаратуры, для которой важнейшим требованием является достижение заданного уровня надежности за счет сокращения временных затрат на выпуск продукции.

Постановка задачи

Выбор плана испытаний для определения параметров надежности невосстанавливаемых объектов [13] необходимо осуществлять из следующего набора: $[NUN]$, $[NRr]$, $[NUz]$, $[NUR]$ (известны значения наработки между отказами t_i , число отказов, объем выборки N), $[NUT]$ и $[NRT]$. Здесь и далее используются следующие обозначения в планах испытаний: N – испытывается выборка определенного объема; U – в случае отказа изделия не восстанавливаются и не заменяются; R – отказавшие изделия заменяются; r – число отказов или отказавших элементов; z – испытания проводится определенное время; T – время испытаний или наработка. Для сокращения продолжительности испытаний используются планы $[NRr]$ (известны значения наработки между отказами t_i , число отказов r , объем выборки N) и $[NRT]$ (известны t_i , продолжительность испытаний $t_{исп}$ и N) [14]. Исходя из значений предельной относительной ошибки оценки показателя надежности, доверительной вероятности, числа предельных состояний (числа отказов r), предполагаемых коэффициента вариации v , продолжительности испытаний и вида закона распределения ресурса, определяется минимальный объем выборки.

На промышленных предприятиях могут использоваться следующие распределения [15–17]: экспоненциальное, логарифмически-нормальное (LN), диффузионное монотонное (DM) и немонотонное (DN). Выбор математической модели – закона распределения отказов – зависит от принятой методики расчета параметров надежности электронной продукции на предприятии.

Все соотношения, кроме экспоненциального, можно представить в общем виде как $\lambda(t) = F(\bar{t}_H, v, \bar{T}_0)$, т.е. как зависимость закона F от наработки до отказа, коэффициента вариации v и среднего времени наработки на отказ при определенных условиях испытаний.

Коэффициент вариации для ЭМ, содержащих полупроводниковые электроэлементы, в которых наибольшая доля отказов обусловлена усталостными явлениями из-за циклического изменения температур, токов и механических напряжений, находится в интервале 0,4–0,8. Для отказов, связанных с процессами протекания электрического тока, накоплением зарядов, электродиффузией и др., коэффициент имеет значения 0,7–1,5. Важно отметить, что коэффициенты вариации для ЭМ и для отдельных электроэлементов, составляющих элементную базу этих ЭМ, совпадают из-за сохранения механизмов деградации в ЭМ [18]. В связи с этим по полученному в ходе испытаний параметру v для крупных ЭМ можно судить о значении коэффициента вариации наработки электроэлементов.

Аналитически вычислить параметры надежности с получением удовлетворительного приближения к реальным значениям не представляется возможным из-за сложности модели надежности ЭМ. Наибольшие трудности возникают в случае вновь разрабатываемого сложного ЭМ, поэтому на предприятиях электронной промышленности используются испытания, в том числе ускоренного типа. При этом у производителей возникает желание сократить время и затраты на дорогостоящие испытания ЭМ.

При прогнозировании параметров надежности прибегают к экстраполяции временного ряда, например, зависимости $\lambda(t)$, причем предполагается, что закон распределения прогнозируемого параметра во времени заранее известен [19]. Такие зависимости установлены для различных причин отказов в элементах ЭМ и являются нелинейными, как и процесс развития дефектов, который имеет периоды приработки, стабильного развития и резкого возрастания. В руководящих документах при неизвестном характере зависимости прогнозируемого параметра рекомендуется использовать линейную модель, что позволяет прогнозировать значение параметра «с запасом» сверху, и не дается рекомендаций по выбору конкретного значения коэффициента v . Понятно, что и от закона изменения, и от параметра v будут зависеть результаты прогнозирования.

По этой причине необходим подход, позволяющий прогнозировать параметры надежности разнородных многономенклатурных ЭМ после проведения испытаний без усложнения процесса обработки результатов.

Предложенные методы решения и полученные результаты

Для решения поставленной в работе задачи предложено сначала определить исходные данные в соответствии с типом и целью испытаний ЭМ. Примем для определенности, что выбран план, при котором испытывается одновременно N объектов, отказавшие изделия не ремонтируются и не заменяются, по аналогии с планами испытаний $[NUr]$ и $[NUt]$, а цель испытаний – прогнозирование момента времени, когда параметр надежности достигнет предельно допустимого значения [19], или значения этого параметра на конец интервала прогнозирования. Также исходными данными являются принятые значения предельной относительной ошибки – 0,10 и доверительной вероятности – 0,90. Прогнозирование параметров надежности ЭМ проводится по второй группе типовых ситуаций по [19], т.е. неизвестны коэффициенты математической модели (ММ) определенного вида для ряда измеренных значений параметра.

Минимальное количество ЭМ для испытаний определяется в зависимости от вида закона распределения и коэффициента ν по табл. 1. Так как распределение и значение ν неизвестны, то необходимо поставить на испытания не менее 200 ЭМ.

Распределение	ν						
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Экспоненциальное (предельная ошибка)	32	50	65	100	125	150	200
LN	25	40	65	80	100	125	150
Диффузионное	15	26	41	59	81	105	133

Таблица 1. Минимальное количество ЭМ для испытаний (N)

В результате испытаний получается временной ряд значений параметра надежности $X(t) = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ на интервале времени $[0; t_m]$, где $t_m = t_{исп}$, называемый предысторией или ретроспективой (рис. 1).

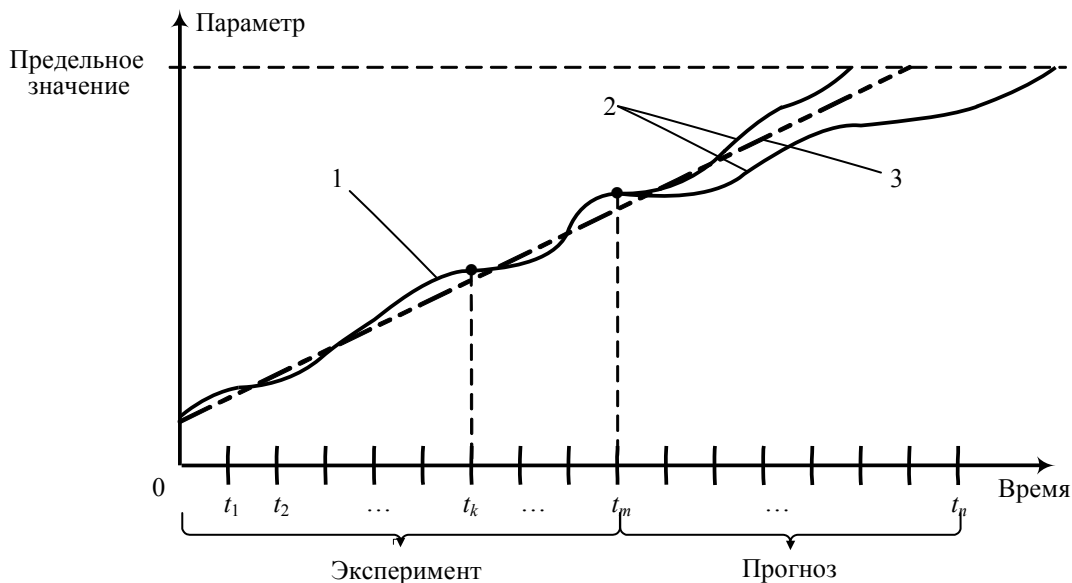


Рис. 1. Принцип прогнозирования временного ряда: 1 – экспериментальная часть распределения; 2 – возможные варианты прогноза; 3 – экстраполяция экспериментальных данных

Для прогнозирования временного ряда используем следующую методику. Разобьем интервал $[0; t_m]$ точкой t_k на две части так, чтобы отрезок $[t_k; t_m]$ составлял около 30% от отрезка $[0; t_m]$. Первый интервал необходим для настройки коэффициентов модели метода прогнозирования или для обучения метода, а второй – для оценки приближения ММ к исходному ряду. Таким образом, интервал $[t_k; t_m]$ содержит контрольные значения исследуемого показателя. Длина отрезка $[t_m; t_n]$ соответствует глубине прогноза. Из всего множества методов прогнозирования используем группу для регрессионного анализа; здесь путем подбора параметров на ретроспективе ряда осуществляется выбор наилучшей ММ. Использование этих методов в настоящей работе обусловлено тем фактом, что виды зависимостей прогнозируемого параметра надежности заранее известны. Для прогнозирования в настоящей работе использован метод группового учета аргументов (МГУА), основанный на подборе постепенно усложняющихся моде-

лей и выборе наилучшей (наилучших), исходя из минимума отклонения от контрольного участка ряда. При работе метода МГУА используется полиномиальная базисная функция. Другие методы прогнозирования, например, основанные на теории нелинейной динамики или искусственных нейронных сетей [20], также могут использоваться в предлагаемом подходе. Подключаемые методы будут представляться в качестве агентов-методов, работающих в МАС, и предлагать свои варианты решения общей задачи.

Структура разработанной МАС представлена на рис. 2. МАС работает следующим образом.

Загрузка исходного ряда X , начальных условий и задания осуществляются посредством управляющего агента. Он же подключает для поиска все необходимые агенты-методы для прогнозирования параметра надежности и запускает поиск. Если нет предпочтений – информации в базе данных (БД) результатов, то запускаются все «известные» системе методы прогнозирования. Тем самым организуется обучение системы на основе результатов, полученных ранее.

Затем агенты-методы и агенты-ММ начинают свою работу, в результате происходит подбор коэффициентов ММ – вариантов приближения к оптимальному решению. Варьируются как полиномиальные базисные функции и их коэффициенты, так и законы распределения $\lambda(t)$ и коэффициенты вариации v из ряда значений 0,4–1,2 с шагом 0,1.

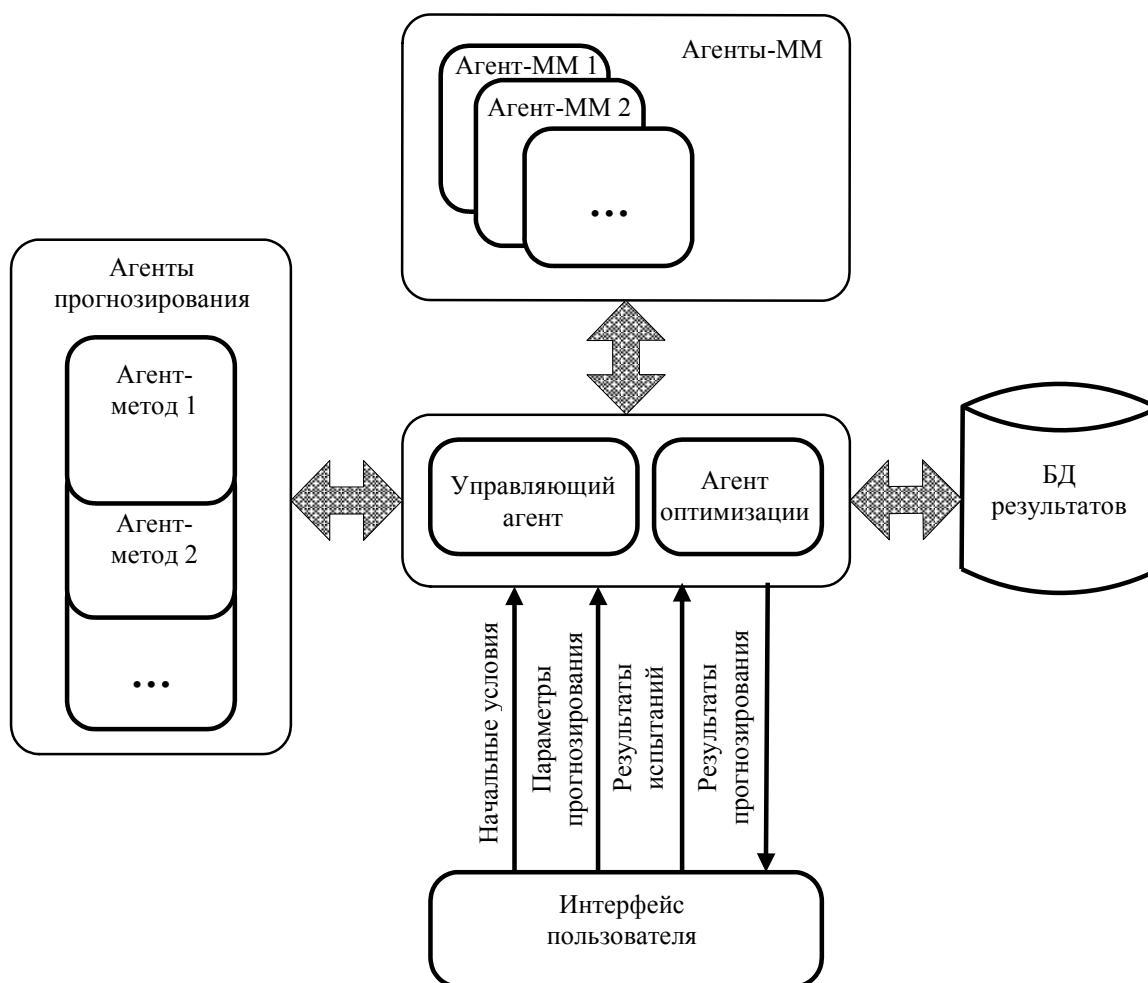


Рис. 2. Структура разработанной системы

С помощью значений ряда $[0; t_k]$ вычисляются коэффициенты S_p по известной процедуре МГУА и (или) других методов, имеющихся в системе, а также варьируются значения v .

При работе МАС на участке $[t_k; t_m]$ рассчитываются текущие отклонения δ_w каждой ММ от фактических значений, а также среднеквадратические отклонения σ_w в конце участка агентом оптимизации. При этом в системе образуется набор

$$\{Q_w(S_p), v_j\},$$

где w – количество ММ Q ; p – количество коэффициентов S ММ; j – количество вариаций коэффициента, равное 9. Таким образом, количество всех вариантов ММ не превысит произведения $j \cdot w = 9w$. При этом каждому варианту ММ-распределения придается жизненный ресурс R_w , который при приближении к фактическим значениям ряда увеличивается, а при удалении – уменьшается. При выполнении условия

$$R_i < R_{гр}, i=1,2,\dots,w,$$

где $R_{гр}$ – граничное значение ресурса, i -я ММ в дальнейшем не используется. Окончательно после усечения множества вариантов остается несколько наилучших ММ. Вся информация поступает агенту-координатору, который для интервала $[t_m; t_n]$ строит прогноз, используя отобранные модели.

Эксперимент

Для проведения имитационного эксперимента с целью прогнозирования интенсивности отказов был использован МГУА с разнотипными базисными функциями и данные по испытаниям ЭМ с разнородной элементной базой – резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, микросборки и микросхемы различной степени интеграции. Спрогнозируем результаты 56 ч климатических испытаний двухсот ЭМ после 48 ч реальных испытаний, данные по которым сведены в табл. 2. Из нее следует, что через 16 ч отказал один ЭМ, после 24 ч – еще один и так далее.

Наработка времени, t_i , ч	8	16	24	32	40	48
Зафиксированное число отказов ЭМ	0	1	1	1	1	4

Таблица 2. Результаты климатических испытаний ЭМ

По [21] число ЭМ, поставленных на испытания, должно превышать

$$N_{\min} = \frac{K_p}{t_{\text{исп}} \lambda_{\text{контр}}},$$

где K_p – коэффициент, зависящий от числа отказов, при достижении которых испытания считаются неудачными; $\lambda_{\text{контр}}$ – значение интенсивности отказов, выбираемое из ряда рекомендованных значений. Для имеющихся исходных данных из вышеприведенного соотношения получим контрольный предел:

$$\lambda_{\text{контр}} = \frac{15,4}{60 \cdot 200} = 1,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч},$$

исходя из рекомендованных значений и округляя, получим $\lambda_{\text{контр}} \approx 1 \cdot 10^{-3}$ 1/ч, а число отказов в ходе испытаний не должно превышать 10.

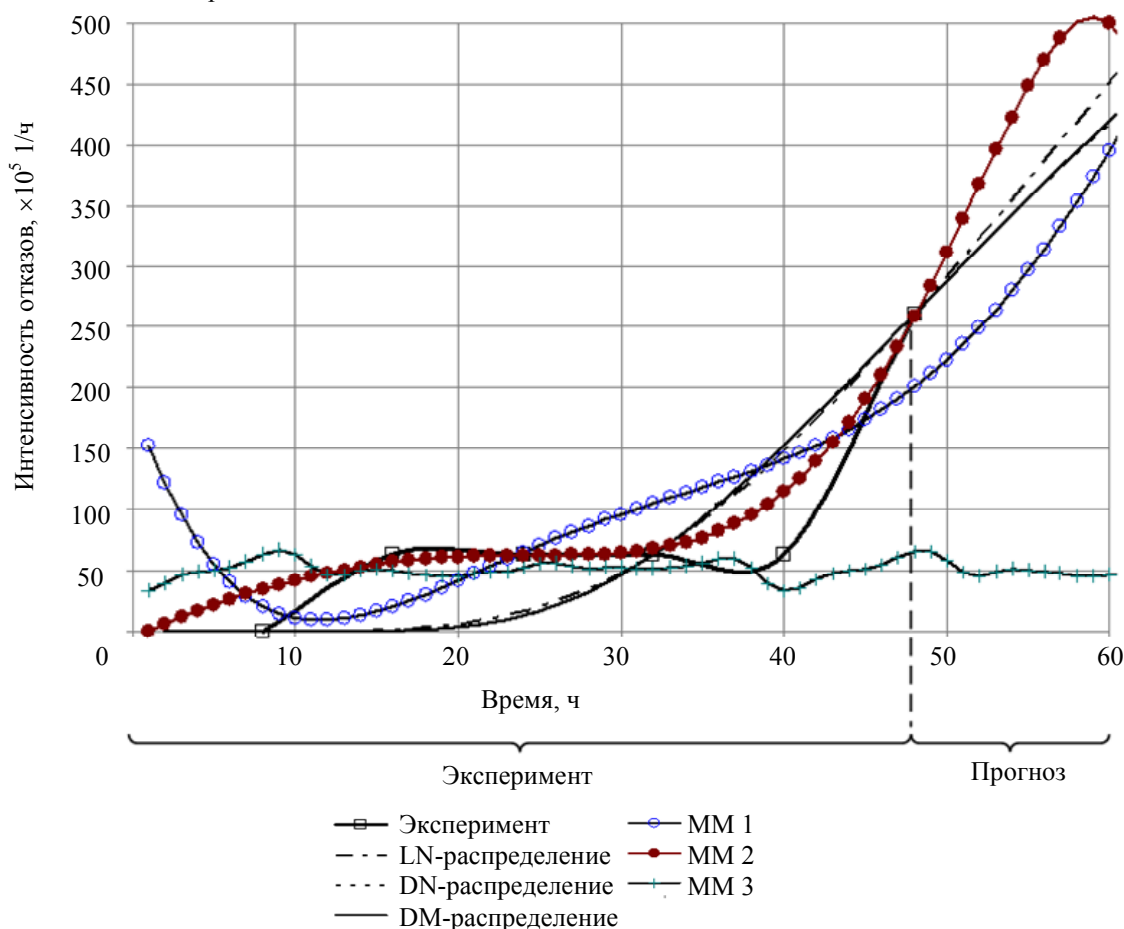


Рис. 3. Экспериментальные графики

Пересчитаем данные временного ряда в значения $\lambda(t)$ по известному статистическому соотношению [22], затем произведем сглаживание временного ряда. Построим прогноз на отрезке времени [48; 56], для чего, варьируя виды ММ по известным двухпараметрическим распределениям и с помощью МГУА, получаем множество ММ. Вывод о точности полученных вариантов ММ в целом производится на основе сравнения значений среднеквадратических отклонений, как среднего отклонения фактической кривой от теоретической с граничными значениями $\sigma_{гр}$ и $R_{гр}$, и отбора наилучших вариантов. Также подбирается оптимальное значение коэффициента ν , при котором двухпараметрические LN-, DN- и DM-распределения близки к исходному ряду значений. Полученные данные расчетов при $\nu_{opt} = 0,6$ представлены в табл. 3. Согласно выбранным граничным значениям ММ, Q_4 исключается. По оставшимся ММ строится прогноз (рис. 3) интенсивности отказов ЭМ. Из него следует, что по прошествии 60 ч испытаний предел $\lambda_{контр}$ будет достигнут по всем вариантам ММ, кроме ММ Q_3 , следовательно, после проведенных фактически 48 ч испытаний можно сделать вывод, что надежность выборки ЭМ неудовлетворительна, а число отказов превысит 10.

Модель	Рассчитанные данные				Использование при прогнозе
	σ	$\sigma_{гр}$	R_i	$R_{гр}$	
LN	73,8	110	53,7	20	Да
DN	77,4		42,7		Да
DM	77,2		40,1		Да
Q_1 по МГУА	104,9		40,3		Да
Q_2 по МГУА	47,3		22,8		Да
Q_3 по МГУА	100,4		55,1		Да
Q_4 по МГУА	1002,1		2,9		Нет

Таблица 3. Результаты расчетов

Заключение

Предложенный подход позволяет строить и среднесрочные прогнозы. Но так как при увеличении глубины прогноза будет снижаться точность, то в работе предложено использовать не только стандартные двухпараметрические распределения, но и альтернативные модели, полученные с помощью методов регрессионного анализа, в том числе и метода группового учета аргументов. Разработанная многоагентная система позволяет сократить время и упростить обработку результатов испытаний электронных блоков с разнородным составом электрорадиоэлементов, особенно изготавливаемых впервые.

References

- Bondarenko I.B., Kalyaeva E.A., Koksharov D.N. Adaptatsiya parametrov geneticheskogo algoritma dlya optimizatsii slozhnykh funktsii [Adaptation of parameters of genetic algorithm for complex function optimization]. *Izv. vuzov. Priborostroenie*, 2011, vol. 54, no. 9, pp. 5–9.
- Bondarenko I.B., Gatchin Yu.A., Trofimova E.Yu. Prognozirovaniye nadezhnosti uzlov pechatnykh plat pri uskorennykh ispytaniyakh [Reliability prediction of PCB assemblies with accelerated tests]. *Trudy kongressa po intellektual'nyim sistemam i informatsionnym tekhnologiyam (IS-IT'12)* [Proc. of the Congress on Intelligent Systems and Information Technology (IS-IT'12)]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2012, vol. 2, pp. 92–97. (In Russian)
- Romanov V. Kolichestvennaya otsenka nadezhnosti integral'nykh mikroskhem s uchetom matematicheskoi modeli otkazov [Quantitative assessment of the reliability of integrated circuits based on mathematical models of failures]. *Elektronnyye komponenty i sistemy*, 2005, no. 4, pp. 4–7.
- Wooldridge M. *An introduction to multiagent systems*. 2nd ed. Wiley, NY, 2009, 484 p.
- Russel S., Norving P. *Artificial intelligence. A modern approach*. 2nd ed. Prentice Hall Publ., 2010, 1152 p.
- Gaston M.E., Desjardins M. The effect of network structure on dynamic team formation in multi-agent systems. *Computational Intelligence*, 2008, vol. 24, no. 2, pp. 122–157. doi: 10.1111/j.1467-8640.2008.00325.x
- Barton L. & Allan V.H. Methods for coalition formation in adaptation-based social networks. *Lecture Notes in Computer Science*, 2007, vol. 4676, pp. 285–297. doi: 10.1007/978-3-540-75119-9_20
- Shoham Y., Leyton-Brown K. *Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008, 532 p.
- Dignum F., Bradshaw J., Silverman B., van Doesburg W. *Agents for games and simulations: Trends in techniques, concepts and design*. Springer, 2010, 273 p.
- deWeerd M.M., Zhang Y., Klos T. Multiagent task allocation in social networks. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2012, vol. 25, no. 1, pp. 46–86. doi: 10.1007/s10458-011-9168-3
- Gatchin Yu.A., Bondarenko I.B., Solov'ev D.V. Primenenie mnogoagentnogo podkhoda pri prinyatii optimal'nykh reshenii [Application of multi-agent approach for optimal decisions creation]. *Trudy kongressa po intellektual'nyim sistemam i informatsionnym tekhnologiyam (IS-IT'13)* [Proc. of the Congress on Intelligent Systems and Information Technology (IS-IT'13)]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2013, vol. 1, pp. 19–22. (In Russian)
- Bondarenko I.B., Korobeynikov A.G., Prokhozhev N.N., Mikhailichenko O.V. Prinyatie tekhnicheskikh reshenii s pomoshch'yu mnogoagentnykh sistem [Adoption of technical solutions using multi-agent systems]. *NB: Kibernetika i programirovaniye*, 2013, no 1, pp. 16–20.

13. RD 50-690-89. *Metodicheskie ukazaniya. Nadezhnost' v tekhnike. Metody otsenki pokazatelei nadezhnosti po eksperimental'nym dannym* [Guidance document 50-690-89. Methodical instructions. Reliability in engineering. Estimation methods for reliability by experimental data]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1990. 133 с.
14. GOST 27.410-87. *Nadezhnost' v tekhnike. Metody kontrolya pokazatelei nadezhnosti i plany kontrol'nykh ispytaniy na nadezhnost'* [State Standard 27.410-87. Reliability in engineering. Control methods of reliability and monitoring plans for reliability tests]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1987, 79 p.
15. Rumbell T., Barnden J., Denham S., Wennekers T. Emotions in autonomous agents: comparative analysis of mechanisms and functions. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2012, vol. 25, no. 1, pp. 1–45. doi: 10.1007/s10458-011-9166-5
16. Strogonov A. Otsenka dolgovechnosti BIS po rezultatam uskorennykh ispytaniy [Estimation of durability of microcircuits based on the results of accelerated tests]. *Tekhnologii v elektronnoi promyshlennosti*, 2007, no. 3, pp. 90–96.
17. Zelenkov A.A., Golik A.P. Otsenka nadezhnosti bortovoi avioniki na osnove DN-raspredeleniya [Evaluation of avionic's reliability using DN-based distribution]. *Elektronika ta sistemy upravleniya*, 2009, no. 2 (20), pp. 12–17.
18. Strel'nikov V.P., Antipenko K.A. O metodicheskikh pogreshnostyakh prognozirovaniya resursa vysokonadezhnykh izdelii elektronnoi tekhniki [On methodological errors of resource forecasting at highly reliable electronic products]. *Matematicheskie mashiny i sistemy*, 2004, no. 3, pp. 164–167.
19. RD 26.260.004-91. *Metodicheskie ukazaniya. Prognozirovaniye ostatochnogo resursa oborudovaniya po izmeneniyu parametrov ego tekhnicheskogo sostoyaniya pri ekspluatatsii* [Guidance document 26.260.004-91. Methodical instructions. Prediction of residual life of equipment to change the parameters of its technical condition during operating]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1991, 38 с.
20. Bondarenko I.B., Gatchin Yu.A., Geranichev V.N. Sintez optimal'nykh iskusstvennykh neironnykh setei s pomoshch'yu modifitsirovannogo geneticheskogo algoritma [Synthesis of optimal artificial neural networks by modified genetic algorithm]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2012, no 2 (78), pp. 51–55.
21. GOST 25359-82. *Izdeliya elektronnoi tekhniki. Obshchie trebovaniya po nadezhnosti i metody ispytaniy* [State Standard 25359-82. Electronic products. General requirements for reliability and test methods]. Moscow, Izdatel'stvo standartov Publ., 1982, 7 p.
22. Ivanov A.I., Bondarenko I.B. Modelirovaniye nadezhnosti elektronnoi tekhniki pri uslovii edinchnykh otkazov [Modeling reliability of electronic equipment subject to single failures]. *Materialy VIII mezhdunarodnoi nauchno-practicheskoi konferentsii «Obrazovaniye i nauka v XXI veke–2012»* [Proc. VIII international scientific and practical conference “Education and science at XIX century - 2012”]. Sofia: 2012, pp. 49–54.

- Бондаренко Игорь Борисович** – доцент, кандидат технических наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, igorlitmo@rambler.ru
- Иванов Алексей Игоревич** – аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО), Санкт-Петербург, Россия, alexska90@gmail.com
- Igor V. Bondarenko** – Associate professor, PhD, Associate professor, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, igorlitmo@rambler.ru
- Alexei I. Ivanov** – postgraduate, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University), Saint Petersburg, Russia, alexska90@gmail.com

Принято к печати 28.11.13
Accepted 28.11.13