

## РОЗДІЛ 4

АВТОМАТИКА, КОМП'ЮТЕРНІ  
ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.362.2

*А.А. Гнатовская*

Одесский государственный экологический университет, ул. Львовская, 15, Одесса, 65016, Украина

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОАГРУЖЕННЫХ СРЕДСТВ С РЕЗЕРВИРОВАНИЕМ  
В САПР КРИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

*Предложена модель повышения надежности теплонагруженной системы за счет применения аппаратной избыточности, основанной на применении методов резервирования. Произведены модельные эксперименты в САПР критических систем, позволяющие оценить эффективность применения аппаратного резервирования для повышения надежности теплонагруженных средств.*

**Ключевые слова:** Надежность; Термоэлектрические устройства; Критические системы; Теплонагруженные средства.

*Г.А. Гнатовська*

Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, Одеса, 65016, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОАВАНТАЖЕНИХ ЗАСОБІВ З РЕЗЕРВУВАННЯМ В САПР  
КРИТИЧНИХ СИСТЕМ

*Запропоновано модель підвищення надійності теплоавантажених системи за рахунок застосування апаратної надмірності, заснованої на використанні методів резервування. Виконані модельні експерименти в САПР критичних систем, що дозволяють оцінити ефективність застосування апаратного резервування для підвищення надійності теплоавантажених засобів.*

**Ключові слова:** Надійність; Термоелектричні пристрої; Критичні системи; Теплоавантажені засоби.

DOI: 10.15673/0453-8307.3/2015.39282



This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## I. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Повышение надежности теплонагруженных средств с термоэлектрическими охлаждающими устройствами (ТЭУ) может быть обеспечено на различных этапах: проектирования, изготовления, эксплуатации различными методами, однако необходимо учитывать, что надежность закладывается при проектировании, реализуется при изготовлении и расходуется при эксплуатации [1]. Все методы повышения надежности сводятся к: снижению интенсивности отказов составляющих элементов, резервированию, уменьшению времени непрерывной работы, уменьшению времени восстановления и выбору рациональной организации регламентных работ [2].

Надежность системы не может быть выше надежности самого ненадежного элемента, поэтому при синтезе систем необходимо повысить

надежность критических элементов с низкими показателями надежности до более высокого уровня.

Параметры надежности теплонагруженных устройств не могут быть обеспечены только параметрическими методами и требуют для обеспечения работоспособности управления их надежностью. Достижение заданного уровня надежности теплонагруженных средств может быть достигнуто аппаратной избыточностью, т.е. резервированием.

При проектировании систем, работающих в условиях критических тепловых нагрузок, вероятность выхода из строя теплонагруженных элементов оказывается весьма высокой. САПР критических систем должны обеспечивать возможность надежно ориентированного проектирования не только используя параметрические методы повышения надежности, но и применять подсистемы аппаратного резервирования.

## II. МОДЕЛЬ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОАГРУЖЕННОЙ СИСТЕМЫ ЗА СЧЕТ АППАРАТНОЙ ИЗБЫТОЧНОСТИ

Метод резервирования основан на принципе избыточности. Это означает, что в системе наряду с основными элементами и устройствами, выполняющими предназначенные им функции – обеспечение заданного теплового режима элемента или составной части радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), должны быть предусмотрены такие же резервные элементы и устройства, которые не являются функционально необходимыми, а предназначены для замены соответствующих основных элементов и устройств в случае их отказа.

Простейшими универсальными схемами резервирования являются последовательное и параллельное соединение независимых элементов в системе. Последовательное соединение – это соединение независимых элементов, когда отказ одного из элементов ведет к отказу всей системы. Если система состоит из  $N$  независимых элементов, которые в последовательном соединении работают независимо, то общая вероятность безотказной работы такой системы за время  $t$  определяется выражением [3]:

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

где  $P_i(t)$  – вероятность безотказной работы  $i$ -го элемента.

Вероятность появления отказа в системе:

$$Q(t) = 1 - \prod_{i=1}^N P_i(t). \quad (2)$$

Если принять условие, что ТЭУ состоит из одинаковых  $N$  элементов, имеющих одинаковые (равные) вероятности безотказной работы  $P_i(t) = P_k(t)$ , тогда выражения (1) и (2) преобразуются к виду:

$$P(t) = P_k^N(t) \quad Q(t) = 1 - P_k^N(t). \quad (3)$$

При параллельном соединении независимых элементов отказ всех элементов приводит к отказу системы в целом. Вероятность безотказной работы параллельного соединения равна:

$$P(t) = 1 - \prod_{i=1}^K [1 - P_i(t)]. \quad (4)$$

Для случая элементов равной (одинаковой) надежности:

$$P(t) = 1 - [1 - P_k(t)]^K. \quad (5)$$

Выражение (5) показывает, что увеличение количества резервных элементов приводит к повышению общей надежности системы.

Резервирование может осуществляться двумя основными способами: общее резервирование, при котором резервируется вся система; раздельное резервирование, при котором система резервиру-

ется по отдельным элементам либо составным частям.

Следует отметить, что с целью повышения надежности система может резервироваться  $m$  резервными элементами. Тогда отношение количества резервных элементов к числу основных элементов является кратностью резервирования.

На практике используются два способа включения резерва [3]:

- постоянное резервирование, когда резервные элементы либо устройства подключены параллельно основным на протяжении всего времени работы;

- резервирование замещением, когда резервные элементы либо устройства включаются только после отказа основного элемента либо устройства.

При постоянном резервировании дублирующие элементы (устройства) присоединены к основным и находятся в одинаковом с ними рабочем режиме. Система с постоянным резервированием должна быть спроектирована таким образом, чтобы отказ одного или нескольких основных либо резервных элементов не влиял на режим её работы. Перечисленные виды резервирования относятся к аппаратной избыточности, что связано с усложнением технических решений, повышением энергозатрат.

Основным достоинством постоянного резервирования является его простота, нахождение в тех же условиях, как и основные элементы, что принципиально для систем охлаждения, в то же время его целесообразно использовать для не энергоёмких элементов и составных частей РЭА.

При определении величины среднего времени безотказной работы системы, состоящей из двух постоянно включенных резервных элементов  $a$  и  $b$ , обладающих интенсивностью отказов  $\lambda_a$  и  $\lambda_b$  для случая внезапных отказов, используем следующие соотношения:

- для среднего времени безотказной работы  $T_0$ :

$$T_0 = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (6)$$

$$\text{если } P(t) = e^{-\lambda t}, \text{ то } T_0 = \frac{1}{\lambda};$$

- для совместных событий правило сложения вероятностей имеет вид:

$$P_{\Sigma}(t) = P_a(t) + P_b(t) - P_a(t)P_b(t) \quad (7)$$

где  $P_{\Sigma}(t)$ ,  $P_a(t)$ ,  $P_b(t)$  – вероятность безотказной работы системы за время  $t$  элемента  $a$  и элемента  $b$ , соответственно;

- для экспоненциального закона распределения:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad (8)$$

$$T_{p,ном} = \frac{1}{\lambda_a} + \frac{1}{\lambda_b} - \frac{1}{\lambda_a + \lambda_b}. \quad (9)$$

Если  $\lambda_a = \lambda_b = \lambda$ , тогда

$$T_{p,ном} = \frac{3}{2} \cdot \frac{1}{\lambda} = 1,5T_0, \quad (10)$$

где  $T_0$  – среднее время безотказной работы одного элемента.

Таким образом, видно, что для повышения надежности в два раза необходимо в случае постоянного включения резерва применить трехкратное резервирование. Снижение роста надежности при увеличении кратности резервирования с физической точки зрения объясняется тем, что при постоянном включении резервные устройства (элементы) расходуют свой ресурс постоянно и до момента отказа работающего устройства часть ресурса оказывается израсходованной. Это указывает на недостаточную эффективность постоянного резервирования, однако такие преимущества постоянного резерва, как обеспечение теплового контакта ТЭУ постоянного резерва по сравнению с тепловым контактом подключаемых ТЭУ могут оказаться определяющими.

Резервирование замещением предполагает включение резервных элементов только после отказа работающего элемента. Включение может производиться как автоматически, так и вручную. Состояние, в котором находятся резервные элементы (устройства) до момента их включения в работу вместо отказавшего элемента можно охарактеризовать как ненагруженный резерв, когда резервные элементы (устройства) находятся в нерабочем состоянии.

Нагруженный резерв, предполагает нахождение резервных элементов (устройств) в рабочем состоянии наравне с основным. Облегченный резерв, предполагает, что резервные элементы (устройства) нагружены не полностью (режим работы облегченный, например для ТЭУ режим  $Q_0 = 0$ , обеспечивающий только перепад температур).

Вероятность безотказной работы системы, состоящей из  $K$  параллельных равнонадежных элементов при идеальном переключающем устройстве и простейшем потоке отказов равна [4]:

$$P_{рез}(t) = \left[ 1 + \frac{t}{T_0^I} + \frac{1}{2!} \left( \frac{t}{T_0^I} \right)^2 + \dots + \frac{1}{(K-1)!} \left( \frac{t}{T_0^I} \right)^{K-1} \right] e^{-\frac{t}{T_0^I}},$$

где  $T_0$  – среднее время безотказной работы каждого из  $K$  элементов.

Из физических соображений среднее время безотказной работы резервированной системы при ненагруженном резерве определяется суммой значений среднего времени безотказной работы элементов:

$$T_{общ} = KT_0^I. \quad (11)$$

Тогда для случая ненагруженного резерва, если время безотказной работы основного элемента (устройства) и резервных элементов (устройств) распределено по экспоненциальному закону, то вероятность безотказной работы:

$$P_{р.зам}(t) = e^{-\frac{t}{T_0}} \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{(i-1)!} \left( \frac{t}{T_0} \right)^{i-1}, \quad (12)$$

где  $T_0$  – среднее время безотказной работы основного или резервного элемента (устройства).

В  $T_0^I = T_0$ ;  $m$  – кратность резервирования и  $(m+1) = K$ .

Среднее время безотказной работы всей системы можно определить путем интегрирования выражения (12) в пределах от 0 до  $\infty$ :

$$P_{р.зам} = \sum_{i=1}^{m+1} T_{0i} = (m+1)T_0. \quad (13)$$

Вероятность безотказной работы рассматриваемой системы за время  $t$  при простейшем потоке отказов для двух элементов (устройств), из которых один основной, а другой резервный, равна:

$$P_{р.зам}(t) = e^{-(\lambda_a + \lambda_b)t} + \frac{\lambda_a}{\lambda_a + \lambda_b - \lambda'_b} \cdot \left[ e^{-\lambda'_b t} - e^{-(\lambda_a + \lambda_b)t} \right] + e^{\lambda_a t} \left[ 1 - e^{-\lambda'_b t} \right]. \quad (14)$$

Соотношение (14) позволяет рассчитать любой случай включения резервного элемента при условии «идеального» переключателя и при  $\lambda_a = \lambda'_b$  совпадает с формулой (7).

В случае ненагруженного резерва, когда  $\lambda_b = 0$  (отсутствует расход ресурса до момента включения резервного элемента), тогда соотношение (14) можно представить в виде:

$$P_{р.зам}(t) = e^{-\lambda_a t} + \frac{\lambda_a}{\lambda_a - \lambda'_b} (e^{-\lambda'_b t} - e^{\lambda_a t}). \quad (15)$$

Для случая, когда элементы равнонадежны ( $\lambda_a = \lambda'_b$ ) получим:

$$P_{р.зам}(t) = e^{-\lambda t} (1 + \lambda t), \quad (16)$$

что совпадает с выражением (12) при  $m=1$ .

Для определения среднего времени безотказной работы системы, проинтегрируем уравнение (14) в пределах  $(0, \infty)$ , получим:

$$T_{р.зам} = \frac{1}{\lambda_a + \lambda_b} + \frac{\lambda_a}{\lambda'_b (\lambda_a + \lambda_b)} + \frac{\lambda_b}{\lambda_a (\lambda_a + \lambda_b)}$$

Соотношение (16) является общим, позволяющим определить среднее время безотказной работы дублированной системы для любого способа включения резерва. Так для нагруженного резерва, если  $\lambda_a = \lambda_b = \lambda'_b = \lambda$  соотношение (16) дает

$$T_{р.зам} = 1,5 \frac{1}{\lambda} = 1,5T_0, \text{ если применить ненагруженный резерв, } \lambda_a = \lambda'_b = \lambda, \text{ а } \lambda_b = 0, \text{ тогда из}$$

формулы (16) получим  $T_{р.зам} = 2T_0$ .

Таким образом, преимущества включения резерва замещением состоит в следующем: включение резерва не изменяет режим работы резервированной системы; резервные элементы (устройства) сохраняют свой ресурс до момента включения в работу.

Параметры надежности оказывают прямое воздействие на процесс проектирования теплонагруженной подсистемы, трансформируя ее архитектуру. Очевидно, что осуществляя проектирование элементов теплонагруженной подсистемы с приоритетом по показателям надежности в САПР, за счет применения методов аппаратной избыточности получим архитектуру, которая определяет стоимостные и массогабаритные характеристики изделия. Важно то, что определяя параметры надежности теплонагруженной подсистемы на стадии проектирования, разрабатывается архитектура системы, удовлетворяющая заданным показателям технического задания.

### III. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АППАРАТНОГО РЕЗЕРВИРОВАНИЯ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ТЕПЛОАГРУЖЕННОЙ СИСТЕМЫ

Эффективность резервирования предопределяет его использование для задачи повышения надежности, как критических теплонагруженных элементов, так и системы в целом. Сдерживающим фактором является стоимость и невозможность реализации многократного резервирования при ограниченных массогабаритных параметрах системы.

Предложенная модель повышения надежности теплонагруженной системы с термоэлектрическими устройствами за счет аппаратной избыточности, реализована в подсистеме САПР в модуле аппаратного резервирования [5]. В качестве среды моделирования и проектирования подсистемы САПР для расчета и сопоставления выигрышей систем при применении различных видов резервирования выбрана среда LabVIEW. Ее основным достоинством является практическое совпадение процессов моделирования и проектирования системы, что в несколько раз повышает скорость создания законченных систем мониторинга, обработки информационных потоков и управления [6].

Учитывая особенность тепловых охладителей на ТЭУ, связанную с отбором тепловой энергии от приемников излучения теплопроводностью и сложностью реализации резерва замещением, рассмотрим выигрыш от общего резервирования при постоянном включении резерва. Обозначим число теплонагруженных элементов системы через  $n$ , интенсивности отказов элементов  $i$ -го типа при  $i = 1, 2, \dots, n$  через  $\lambda_i$ , текущее время, меньшее времени старения –  $t$ , кратность резервирования –  $m$ . Тогда задача анализа сводится к оценке эффективности аппаратного резервирования для повышения надежности, сопоставить выигрыш от аппаратного и нагрузочного резервирования и оценить последствие отказов за счет перераспределения нагрузки на резервные элементы.

Оценим выигрыш надежности  $G_q(t)$  по вероятности отказа и выигрыш по среднему времени безотказной работы  $G_T$ , под которыми будем понимать отношение соответствующего показателя надежности нерезервированной системы к показателю резервированной системы.

Выражения для определения выигрыша надежности по вероятности отказа для постоянного резервирования имеет вид [3]:

$$G_q(t) = \frac{Q_0(t)}{Q_C(t)} = \frac{(1 - e^{-\lambda t})}{(1 - e^{-\lambda t})^{m+1}} = \frac{1}{(1 - e^{-\lambda t})^m}$$

$$G_T = \frac{T_c}{T_0} = \sum_{i=1}^{m+1} \frac{1}{i}, \quad (17)$$

где  $Q_0(t)$  – вероятность отказа исходной системы;  $Q_C(t)$  – вероятность отказа резервированной системы;  $\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i = const$  – интенсивность отказов исходной нерезервированной системы.

Представим выигрыш по функции надежности от интенсивности отказов, времени и кратности резервирования в виде

$$G(x, m) = \frac{1}{(1 - e^{-x})^m}, \quad \text{где } x = \lambda \cdot t.$$

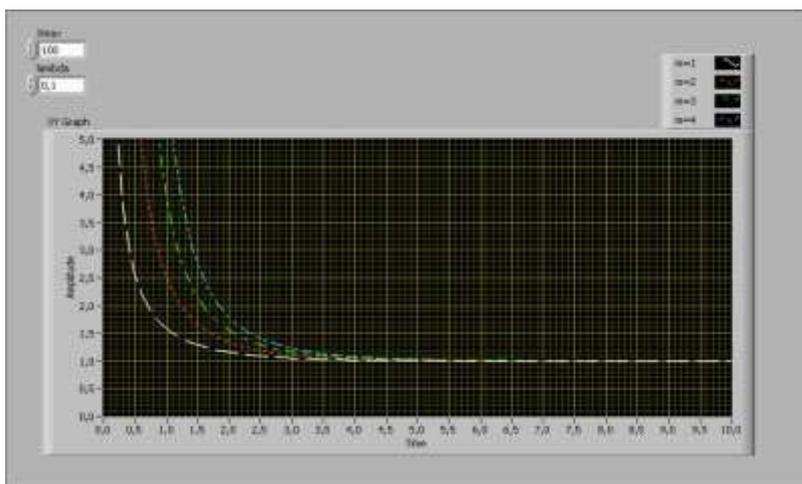
Графическое представление выигрышей для постоянного резервирования при кратностях  $m = 1, 2, 3, 4$  представлено на рисунке 1.

Оценим выигрыш надежности  $G_n(t)$  по вероятности отказа при нагруженном резервировании с кратностью  $n = 2, 3, 4, 5$ , используя зависимость:

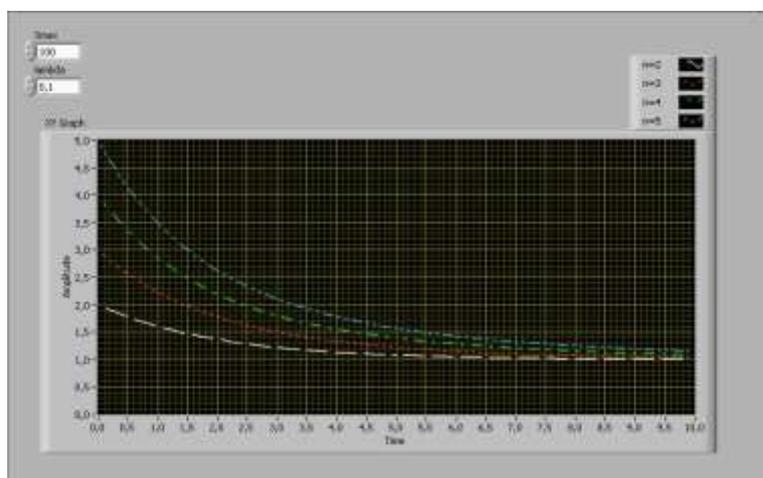
$$G_n(t) = \frac{Q_0(t)}{Q_n(t)} = \frac{(1 - e^{-\lambda t})}{(1 - e^{-\lambda t})^n}.$$

При проведении модельных экспериментов в подсистеме САПР выполнена оценка эффективности применения резервирования по предложенной модели повышения надежности теплонагруженной системы за счет аппаратной избыточности. Графики выигрышей по вероятности отказа для нагрузочного резервирования представлены на рисунке 2.

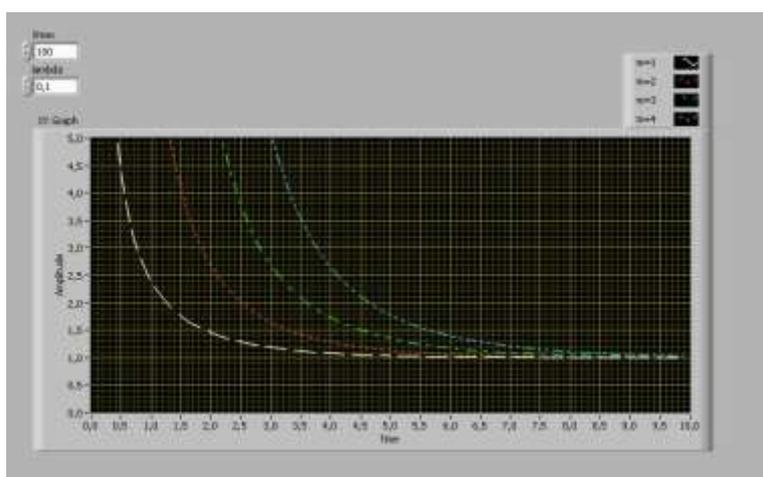
Оценим выигрыш надежности  $G_Z(t)$  по вероятности отказа при резервировании замещением, который описывает следующая аналитическая зависимость:  $G_Z(t) = \frac{Q_0(t)}{Q_Z(t)} = \frac{(1 - e^{-\lambda t})}{(1 - e^{-\lambda t}) \sum_{i=0}^m \frac{(\lambda t)^i}{i!}}$ .



*Рисунок 1 – Выигрыш надежности по вероятности отказа для постоянного резервирования*



*Рисунок 2 – Выигрыш надежности по вероятности отказа для нагрузочного резервирования*



*Рисунок 3 – Выигрыш надежности по вероятности отказа для резервирования замещением*

Анализ полученных графических зависимостей выигрышей от применения различных видов резервирования при проведении модельных экспериментов в подсистеме САПР позволяет сделать следующие выводы:

- при больших значениях  $\lambda t$ , выигрыш надежности монотонно убывает, стремясь к надежности исходной системы;
- наибольший выигрыш от применения резервирования наблюдается при высокой параметрической надежности и малых временах (импульсных режимах) функционирования системы.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аппаратное и нагрузочное резервирование дают выигрыш по надежности проектируемой системы и позволяют получить заданный уровень надежности для стандартных условий эксплуатации; при увеличении кратности аппаратного резервирования  $m$  или кратности нагрузочного резервирования  $n$  надежность повышается незначительно; эффективность резервирования особо отчетливо проявляется при высокой исходной (параметрической) надежности элементов и малом времени функционирования системы.

*A. A. Gnatovskaya*

Odessa state environmental University, 15 Lvovskaya Str., Odessa, 65016, Ukraine

### SIMULATION OF HEAT-LOADED MEANS WITH RESERVATION OF CRITICAL SYSTEMS IN CAD SYSTEMS

*The article represents the issues of simulation of heat-loaded means with reservation of critical systems in CAD systems. The reliability parameters of heat-loaded devices cannot be achieved only by parametric methods and require to ensure efficient management of their reliability. Achievement of this level of reliability for heat-loaded systems is possible by hardware redundancy, i.e. redundant. The model which could improve the heat-loaded system reliability through the use of hardware redundancy, based on the use of redundancy techniques was presented. The effectiveness of reservation techniques in the early stages of development and design determines its usage for reliability improving as critical thermally loaded elements and the system as a whole. Application of the proposed model of reliability improvement of heat-loaded means due to hardware redundancy in the CAD subsystem allows evaluating the effectiveness of different methods of hardware reservation to improve the reliability of heat-loaded system.*

**Keywords:** Reliability; Thermoelectric devices; Critical Systems; Heat-loaded means.

#### REFERENCES

1. Steshenko, V. B. 2002. Praktika avtomatizirovanogo proektirovaniya radioelektronnykh ustroystv. – M.: Nolidzh, 768 p. (in Russian)
2. Avensisyann, D. A. 2005. Avtomatizatsiya proektirovaniya elektrotehnicheskikh sistem i ustroystv. – M.: Vysshaya shkola, 511 p. (in Russian)
3. Polovko, A. M., Gurov, S. V. 2006. Osnovy teorii nadezhnosti: Praktikum. – SPb: BHV-Peterburg, – 560 p. (in Russian)

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Стешенко, В. Б. Практика автоматизированного проектирования радиоэлектронных устройств [Текст] / В. Б. Стешенко. – М.: Нолидж, 2002. – 768 с.
2. Авенсисян, Д. А. Автоматизация проектирования электротехнических систем и устройств [Текст] / Д. А. Авенсисян. – М.: Высшая школа, 2005. – 511 с.
3. Половко, А. М. Основы теории надежности [Текст] : Практикум / А. М. Половко, С. В. Гуров. – СПб: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.
4. Кандырин, Ю. В. Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР. учеб. пособие: [Текст] / Ю. В. Кандырин. – М.: МЭИ, 2004. – 176 с.
5. Гнатовская, А. А. Проектирование теплонагруженных систем с восстановлением [Текст] / В. И. Мещеряков, В. П. Зайков, А. А. Гнатовская // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Тематичний випуск: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ» – 2011. – № 33. – С. 64 – 70.
6. Блюм, П. LabVIEW: Стиль программирования [Текст] / П. Блюм. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 400 с.

4. Kandyirin, Yu. V. 2004. Metody i modeli mnogokriterialnogo vyibora variantov v SAPR. Ucheb. posobie. – M.: MEI, – 176 p. (in Russian)
5. Mescheryakov, V. I., Zaykov, V. P., Gnatovskaya, A. A. 2011. Proektirovanie teplonagruzhennykh sistem s vosstanovleniem. *Visnik Natsionalnogo tehnlchnogo unIversitetu «HPI»*. *Tematichniy vipusk: Novi rIshennya v suchasniy tehnologIyah*. – *HarkIv: NTU «HPI»*, no. 33, 64-70. (in Russian)
6. Blyum, P. 2008. LabVIEW: Stil programmirovaniya – M.: DMK Press. – 400 p. (in Russian)

Отримана в редакції 15.01.2015, прийнята до друку 23.04.2015