

УДК 004.7:519.87(043.3)

Колисник Е.В., Колисник Д.С.

Национальный авиационный университет

МЕТОД УПРАВЛЕНИЯ НАДЕЖНОСТЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ СЕТИ БОЛЬШОГО МАСШТАБА

Kolisnyk E.V., Kolisnyk D.S. Method of reliability management of computer network of large scale. The problem of computing a set of reliability management, containing a large number of switching nodes is considered. In this situation it is impossible to neglect the physical failure of network nodes. The questions of detection of failure knots are research. It is offered approach, based on regular control of parameters and state of network knots taking into account their a priority descriptions of reliability. A classification of network failures, system architecture analysis of network nodes, the control method of the reliability of critical components based on the Bellman dynamic programming are represented. We have given the recommendations for further development of the proposed methods and algorithms.

Keywords: computer network, reliability management, Bellman dynamic programming, physical failure, classification of network failures

Колісник О.В., Колісник Д.С. Метод управління надійністю комп'ютерної мережі великого масштабу. Розглянуто задачу управління надійністю комп'ютерної мережі, що містить велику кількість комутаційних вузлів. У цій ситуації вже не можна нехтувати фізичними відмовами мережних вузлів. Запропоновано класифікацію мережних відмов, архітектура системи аналізу стану мережних вузлів, метод управління надійністю критичних вузлів на основі динамічного програмування Беллмана. Дано рекомендації щодо подальшого розвитку запропонованих методів і алгоритмів.

Ключові слова: комп'ютерна мережа, управління надійністю, динамічне програмування Беллмана, фізична відмова, класифікація мережних відмов

Колисник Е.В., Колисник Д.С. Метод управления надежностью компьютерной сети большого масштаба. Рассмотрена задача управления надежностью компьютерной сети, содержащей большое количество коммутационных узлов. В этой ситуации уже нельзя пренебрегать физическими отказами сетевых узлов. Предложены классификация сетевых отказов, архитектура системы анализа состояния сетевых узлов, метод управления надежностью критичных узлов на основе динамического программирования Беллмана. Даны рекомендации по дальнейшему развитию предложенных методов и алгоритмов.

Ключевые слова: компьютерная сеть, управление надежностью, динамическое программирование Беллмана, физический отказ, классификация сетевых отказов

I. Введение

Одним из факторов в обеспечении надежности компьютерных сетей служит эффективное управление их ресурсами. Одной из важнейших функциональных областей управления является управление надежностью, целью которого является обнаружение аномального состояния, определение причины его возникновения, локализация неисправности в сети, регистрация, доведение соответствующей информации до обслуживающего персонала, выдача рекомендаций по устранению неисправностей.

Однако в настоящее время методы управления надежностью в компьютерных сетях разработаны недостаточно. Например, в работах [1, 2] и других основное внимание уделяется поиску неисправностей, связанных с неправильным конфигурированием функционально исправных сетевых узлов – серверов, коммутаторов, маршрутизаторов.

В работах [3, 4] сделана общая постановка задачи управления надежностью сети и контроля работоспособности сетевых узлов. Там отмечается, что при увеличении масштаба сети уже нельзя пренебрегать вероятностями физического отказа сетевых узлов.

В работе [5] исследованы вопросы функционирования сети в условиях применения ненадежных узлов и элементов, то есть резервирования по логике “*m* из *n*” или другой логике.

В работах [6, 7] вопросы поиска отказавших узлов, в частности, маршрутизаторов, предлагается решать путем активной репликации, то есть, по существу, дублирования или горячего резервирования каждого маршрутизатора и постоянного сравнения состояний реального объекта с эталоном (активной репликой). Такой подход требует неоправданного усложнения и удорожания системы в целом.

Поэтому в данной работе предлагается подход, основанный на регулярном контроле параметров и состояния сетевых узлов с учетом их априорных характеристик надежности.

Для управления надежностью компьютерной сети как большой информационной системы необходимо решать следующие задачи.

1. Выделить наиболее ответственные (критичные) сетевые узлы, от исправности которых зависит безотказная работа сети или ее автономного сегмента.

2. Постоянно собирать и анализировать информацию о параметрах и состоянии сетевых узлов. Эта работа должна проводиться в реальном времени.

3. Решать задачу распознавания перегрузок и физических отказов сетевых узлов.

4. Резервировать наиболее критичные сетевые узлы.

Рассмотрению данных вопросов и посвящена настоящая статья.

II. Причины отказов в информационных сетях

Ниже представлены основные признаки, в соответствии с которыми классифицируются отказы узлов и элементов в информационно-коммуникационных сетях. В табл. 1 представлены категории ошибок, которые могут приводить к снижению работоспособности вплоть до полного останова сети, который трактуется как отказ сети.

Категории ошибок

Табл. 1

Признак классификации	Вид отказа
Характер изменений параметра к моменту отказа	внезапный постепенный (параметрический) перемежающийся (сбои)
Степень потери полезных свойств	полный частичный
Возобновляемость полезных свойств	необратимый обратимый
Связь с другими отказами	независимый зависимый
Наличие внешних признаков	явный неявный
Причина возникновения	конструктивный технологический эксплуатационный
Период появления	период приработки в процессе нормальной эксплуатации период старения при хранении при испытаниях
Стоимость отказа	простой техники (убыток от ремонта) невыполнение задачи (убытки, неустойки) моральный ущерб, утрата имиджа

Далее (см. табл. 2) рассмотрены категории сетевых отказов и их статистические характеристики. С учетом этих характеристик можно рационально распределять ресурсы, выделяемые для решения задач управления надежностью сети [8-10].

Категории сетевых отказов

Табл. 2

№	Категория	Параметр, характеристика или описание	
1	Проблемы аппаратного обеспечения	Процент отказов – приблизительно 25%	
2	Ошибки оператора	Более чем 5 % всех системных отказов	
3	Сетевые запоминающие устройства высокого качества	Среднее время наработки на отказ жесткого диска – до 10 ⁶ часов	
4	Проблемы программного обеспечения	Процент отказов – приблизительно 25%	
5	Сетевые проблемы	Распределение ошибок по уровням модели взаимодействия открытых систем в локальных компьютерных сетях:	
		- прикладной уровень	20%
		- уровень представления данных	5%
		- сеансовый уровень	5%
		- транспортный уровень	15%
		- сетевой уровень	25%
		- канальный уровень	10%
- физический уровень	20%		
6	Дополнительные проблемы:		
6а.	Последствия перегрузок и неподобающей работы сети	Возникает проблема распознавания классов “отказ оборудования – перегрузки”	
6б.	Последствия атак и вторжений	Возникает проблема распознавания классов атак	
6в.	Последствия стихийных бедствий (пожары, землетрясения, подтопления и т. п.)	Возникает проблема скорейшей ликвидации последствий	

Из общей задачи управления надежностью вытекают частные задачи контроля и показатели оценки его эффективности, в том числе оценки достоверности, длительности и стоимости контроля. Комплексным критерием является критерий «эффективность/стоимость контроля».

Для управления параметрами и состоянием сети, включая управление надежностью, необходимо осуществлять текущую классификацию сетевых аномалий. Внешними проявлениями выхода из строя или ненадлежащего функционирования сетевого коммутационного узла могут быть как физические отказы, так и перегрузки. Теоретически администратор сети должен получать сигнальную информацию о состоянии перегруженного узла, однако, на практике эта информация может не дойти до центра анализа и мониторинга, как раз вследствие общей перегрузки сетевого маршрута или сегмента. Поэтому необходимо применять дополнительные методы обнаружения отказавших сетевых узлов. Рассмотрим эту задачу в общих чертах.

III. Архитектура системы обнаружения и локализации отказавших сетевых узлов

Проблема анализа аномалий трафика заключается в том, чтобы определить, какая информация содержится в пакетном трафике, и как она используется для обнаружения отказа маршрутизатора. Очевидно, маршрутизатор, функционирующий неправильно, может произвольно изменить адресацию. Например, при отказе маршрутизатор может сбрасывать или изменить маршруты пакетов, или перенаправить их на другие маршрутизаторы. Тем не

менее, такая аномалия может быть обнаружена, принимая во внимание распределенный характер пересылки пакетов.

На абстрактном уровне представим механизм анализа аномалий трафика как вектор условий

$$\mathbf{T}_{rc} \left[r_{ps}, d(r_{psi} | r_{ps}, t_{li}), d(r_{psj} | r_{ps}, t_{lj}) \right], \quad (1)$$

где r_{ps} – сетевой сегмент с маршрутами $\{r_{ps1}, r_{ps2}, \dots, r_{psi}, \dots, r_{psj}, \dots, r_{psN}\}$, трафик которого между маршрутизаторами r_{psi} , r_{psj} , $i, j \in N$ анализируется для оценки их работоспособности;

$d(r_{psi} | r_{ps}, t_{li})$ – характеристики трафика, проходящего через i -й маршрутизатор;

t_{li} – средняя задержка доставки пакетов.

Если маршрутизаторы r_{psi} и r_{psj} исправны, то информация об их состоянии (норма вектора \mathbf{T}) лежит в допустимых пределах: $\|\mathbf{T}\| \leq \|\mathbf{T}_{norm}\|$, т.е. интенсивность трафика на выходе маршрутизатора равна интенсивности на входе, а задержки доставки лежат в допустимых пределах.

На рис. 1 изображена архитектура системы анализа параметров трафика с алгоритмом маршрутизации по критерию состояния связей.

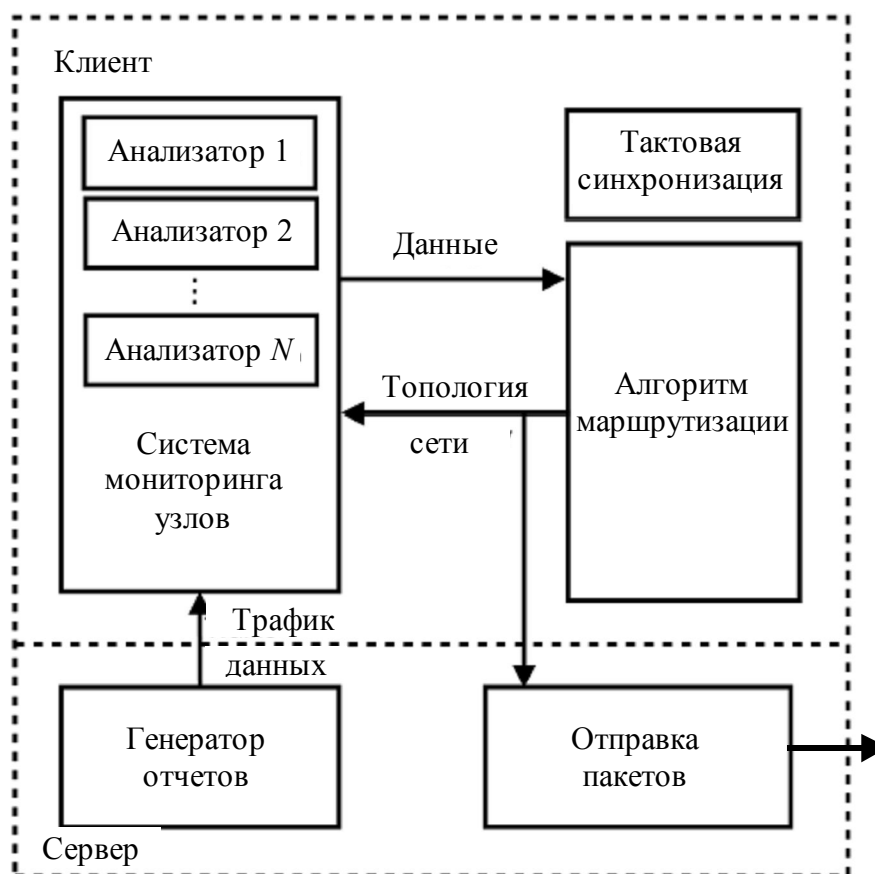


Рис. 1 Архитектура системы анализа параметров трафика

Для управления надежностью сетевых узлов, помимо контроля перегрузок, в сетях, содержащих большое количество сетевых коммутационных узлов, необходимо обеспечивать нормальное функционирование сети при физических отказах [11].

IV. Определение оптимального числа резервных узлов

Рассмотрим задачу определения оптимального числа резервных сетевых узлов с учетом ограничивающих факторов (результатирующих расходов). Под затратами будем понимать массу, габариты, стоимость, энергопотребление, дополнительный ресурс канала передачи и т. п.

Сформулируем задачу оптимального резервирования сетевых узлов и элементов как задачу определения нужного количества резервных устройств, при котором обеспечивается заданное значение показателя надежности сети при минимальных затратах:

$$M_{rs}(\mathbf{Y}) \rightarrow \min, \quad i = \overline{1, N}, \quad \Psi_{(y_i) \in L} \quad (2)$$

где \mathbf{L} – вектор ограничений на составляющие показателя надежности $\Psi(\mathbf{Y})$.

Пусть телекоммуникационная сеть состоит из сегментов, которые в рамках задач управления надежностью можно считать автономными. В свою очередь, автономный сегмент (АС) состоит из сетевых узлов, каждый из которых имеет $m_j, j = \overline{1, n_s}$ резервных устройств. Обозначим вероятность безотказной работы каждого узла через $p_j, j = \overline{1, n_s}$. Если считать, что отказ любого сетевого узла приводит к отказу сети в целом, тогда вероятность безотказной работы сети выражается так:

$$P_M = \prod_{j=1}^{n_s} [1 - (1 - p_j)^{m_{ns}}] \quad (3)$$

Если вероятность отказа сетевого узла $q_j = 1 - p_j$ является величиной второго порядка малости по сравнению с p_j , то есть $q_j = 1 - p_j \ll 1, q_j \ll p_j$, то вероятность отказа сети в целом

$$Q_M \approx \sum_{j=1}^{n_s} q_j^{m_j}, \quad M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_s}\} \quad (4)$$

где $M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_s}\}$ – множество резервных элементов.

Общие расходы на резервирование системы выражаются в виде линейной функции:

$$C_M = \sum_{j=1}^{n_s} c_j m_j \quad (5)$$

где c_j – затраты на резервирование j -го узла.

Для поиска оптимального числа резервных сетевых узлов с учетом ограничивающих факторов теоретически можно использовать классический метод множителей Лагранжа [12]. Но для сложных систем более приемлемыми являются численные методы [12, 13].

Из множества численных методов приемлемым и таким, что достаточно легко формализуется, является метод динамического программирования [14]. В отличие от методов прямого или покоординатного поиска [12], при использовании метода динамического программирования является возможность значительного сокращения вариантов перебора при поиске наилучшего варианта. Для этого вводится так называемая доминирующая последовательность – подмножество вариантов, наиболее перспективными для поиска оптимального варианта.

Рассмотрим общее множество вариантов решения как совокупность точек в координатах "цена - вероятность отказа." Относительно задачи оптимального резервирования логично считать, что некоторый набор, представляющий комбинацию резервных элементов, является более приемлемым, чем другой набор, если для одного и того же допустимого уровня надежности установки этого набора в составе сетевого сегмента связано с меньшими затратами. Другие наборы, соответственно, исключаются из анализа.

Рассмотрим на численном примере процедуру расчета оптимального состава резервированного сетевого сегмента по следующим исходным данным.

В сегменте телекоммуникационной сети есть три коммутационных узла. Рассчитаем схему оптимального резервирования путем введения "горячего" резерва для любого узла в условиях, когда вероятность отказа сегмента за период $[0, T]$ не должна превышать $Q_3(T) \leq 3 \cdot 10^{-6}$ при минимальных затратах. Исходные вероятности безотказной работы и соответствующие (нормированные) стоимости резервирования узлов следующие:

$$\begin{cases} Q_{31}(T) = 10^{-5}, & C_{31} = 0,3; \\ Q_{32}(T) = 2 \cdot 10^{-6}, & C_{32} = 0,2; \\ Q_{33}(T) = 10^{-6}, & C_{33} = 0,1. \end{cases}$$

Максимальное число резервных узлов не более 2: $M \leq 2$.

1. Сначала рассмотрим часть сетевого сегмента, в состав которого входят первый и второй узлы и вычислим надежность и затраты на построение этой части для различных вариантов резервирования.

Матрица доминирующей последовательности для данной задачи имеет вид

$$\mathbf{R} = [r_{m1, m2}], \quad m1, m2 = \overline{0, 2}; \quad m1 + m2 \leq 2,$$

где: $r_{m1, m2} = [Q_{\text{res}}, C_{\text{res}} |_{m1, j, m2, j}]$, $j = \overline{1, 2}$; Q_{res} – результирующая вероятность отказа; C_{res} – расходы при различных вариантах резервирования.

Поскольку по условиям задачи максимальное число резервных узлов не превышает двух единиц, возможны такие варианты резервирования и соответствующие им вероятности отказов и расходы:

$\mathbf{R}[0, 0]$ – резервирование отсутствует:

$$\mathbf{R}[0, 0] \rightarrow \begin{cases} C_{00\text{res}} = C_{31} + C_{32} = 0,3 + 0,2 = 0,5 \\ Q_{00\text{res}} = Q_{31} + Q_{32} = 10^{-5} + 2 \cdot 10^{-6} = 1,2 \cdot 10^{-5}; \end{cases} \quad (6)$$

$\mathbf{R}[1, 0]$ – однократное резервирование только первого узла:

$$\mathbf{R}[1, 0] \rightarrow \begin{cases} C_{10\text{res}} = 2C_{31} + C_{32} = 0,6 + 0,2 = 0,8 \\ Q_{10\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32} = 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-6} \approx 2 \cdot 10^{-6}; \end{cases} \quad (7)$$

$\mathbf{R}[2, 0]$ – двукратное резервирование только первого узла:

$$\mathbf{R}[2, 0] \rightarrow \begin{cases} C_{20\text{res}} = 3C_{31} + C_{32} = 0,9 + 0,2 = 1,1 \\ Q_{10\text{res}} = Q_{31}^3 + Q_{32} = 10^{-15} + 2 \cdot 10^{-6} \approx 2 \cdot 10^{-6}; \end{cases} \quad (8)$$

$\mathbf{R}[0, 1]$ – однократное резервирование только второго узла:

$$\mathbf{R}[0, 1] \rightarrow \begin{cases} C_{01\text{res}} = C_{31} + 2C_{32} = 0,3 + 0,4 = 0,7 \\ Q_{01\text{res}} = Q_{31} + Q_{32}^2 = 10^{-5} + 4 \cdot 10^{-12} \approx 10^{-5}; \end{cases} \quad (9)$$

$\mathbf{R}[0, 2]$ – двукратное резервирование только второго узла:

$$\mathbf{R}[0, 2] \rightarrow \begin{cases} C_{02\text{res}} = C_{31} + 3C_{32} = 0,3 + 0,6 = 0,9 \\ Q_{02\text{res}} = Q_{31} + Q_{32}^3 = 10^{-5} + 8 \cdot 10^{-18} \approx 10^{-5}; \end{cases} \quad (10)$$

$\mathbf{R}[1, 1]$ – однократное резервирование первого и второго узла:

$$\mathbf{R}[1, 1] \rightarrow \begin{cases} C_{11\text{res}} = 2C_{31} + 2C_{32} = 0,6 + 0,4 = 1,0 \\ Q_{11\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32}^2 = 10^{-10} + 4 \cdot 10^{-12} = 1,04 \cdot 10^{-10}. \end{cases} \quad (11)$$

Сравнивая результаты расчетов по формулам (6-11), делаем однозначный вывод, что только варианты (6), (7) и (11) удовлетворяют ограничениям при заданных исходных данных.

2. Добавим к первому и второму узлам последовательно подключенный третий коммутационный узел и рассмотрим варианты новой доминирующей последовательности

$$\mathbf{R}_{\text{res}} = [r_{m1,m2,m3}], \quad m1, m2, m3 = \overline{0,2}; \quad m1 + m2 + m3 \leq 2.$$

С учетом ограничения на количество резервных элементов, поставим в соответствие предыдущим вариантам (6), (7), (11) допустимые варианты общих доминирующих последовательностей:

$$\begin{cases} \mathbf{R}[1,0] \rightarrow \mathbf{R}_{\text{res}}[1,0,1]; \\ \mathbf{R}[2,0] \rightarrow \mathbf{R}_{\text{res}}[2,0,0]; \\ \mathbf{R}[1,1] \rightarrow \mathbf{R}_{\text{res}}[1,1,0]. \end{cases}$$

Выбрав эти последовательности, добавим к ним значение затрат и при соединении трех коммутационных узлов (КУ):

$$\mathbf{R}_{\text{res}}[1,0,1] \rightarrow \begin{cases} C_{\text{res}} = 2C_{31} + C_{32} + 2C_{33} = 0,6 + 0,2 + 0,2 = 1,0; \\ Q_{\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32} + Q_{33}^2 = 10^{-10} + 2 \cdot 10^{-6} + 10^{-12} \approx 2 \cdot 10^{-6}. \end{cases} \quad (12)$$

$$\mathbf{R}_{\text{res}}[2,0,0] \rightarrow \begin{cases} C_{\text{res}} = 3C_{31} + C_{32} + C_{33} = 0,9 + 0,2 + 0,1 = 1,2; \\ Q_{\text{res}} = Q_{31}^3 + Q_{32} + Q_{33} = 10^{-15} + 2 \cdot 10^{-6} + 10^{-6} \approx 3 \cdot 10^{-6}. \end{cases} \quad (13)$$

$$\mathbf{R}_{\text{res}}[1,1,0] \rightarrow \begin{cases} C_{\text{res}} = 2C_{31} + 2C_{32} + C_{33} = 0,6 + 0,4 + 0,1 = 1,1; \\ Q_{\text{res}} = Q_{31}^2 + Q_{32}^2 + Q_{33} = 10^{-10} + 4 \cdot 10^{-12} + 10^{-6} \approx 10^{-6}. \end{cases} \quad (14)$$

По вероятности отказа практически все варианты удовлетворяют поставленной ограничению (6), однако по расходам на резервирование наиболее подходящим является вариант (12). Другими словами, наиболее целесообразно сделать однократный резерв для первого и третьего коммутационных узлов.

Заключение

1. Нельзя механически переносить принципы анализа на надежность простых изделий, на большие системы типа ИС. Если для простых объектов массового производства испытания на надежность ориентированы либо на принятие, либо на забраковку объекта, то испытания большой системы ориентируется на управление надежностью в ходе ее создания.

2. Наиболее целесообразным решением проблемы оценки надежности ИС в целом является расчетно-экспериментальный метод, т.е. сочетание натуральных испытаний и расчетов, и последующее подтверждение полученных расчетных оценок.

3. В варианте "горячего" резерва поток сетевого трафика, поступающего на резервируемые узлы, может разделяться на две части, которые обрабатываются параллельно в основном (рабочем) и резервном узлах. Благодаря этому можно ожидать уменьшения задержек обработки в коммутационных узлах и, соответственно, снижение расходов общего сетевого ресурса. Надо отметить, что эти рассуждения имеют качественный характер и нуждаются в дальнейших теоретических и экспериментальных исследований. В частности, необходимо учитывать снижение надежности резервного узла при его работе в горячем режиме.

Литература

1. Бигелу С.Дж. Сети: поиск неисправностей, поддержка и восстановление ; пер. с англ. / С.Дж. Бигелу. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 1200 с.
2. V. Wilson E. Network Monitoring and Analysis – A Protocol Approach to Troubleshooting / V. Wilson E. – Prentice Hall, Inc., 2000. – 359 p.
3. Tanenbaum A.S. Computer Networks ; 5th Ed. / Andrew S. Tanenbaum, David J. Wetherall. – Prentice Hall, Cloth, 2011. – 960 pp.
4. Торошанко Я.І. Задачі управління надійністю телекомунікаційних мереж / Я.І. Торошанко // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – №5(39). – С. 65-71.
5. Perlman R. Network Layer Protocols With Byzantine Robustness // Ph.D. Thesis, M.I.T., 1988. – 121 p.
6. Mizrak A.T. Detecting Malicious Routers // Ph. D. Dissertation, University of California, San Diego, CA, 2007. – 155 p.
7. Toroshanko Ya.I. Automatic search of breaks with step-by-step variations of parameters of tests in communication systems / Ya.I. Toroshanko., V.S. Shmatko // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №3(31). – С. 14-19.
8. Hudyma R. Causes of failure in IT telecommunications networks. [Електронний ресурс] / R. Hudyma, Deborah I. Fels – Proceedings of SCI – 2004. Florida. – С. 35-38 // – Режим доступу: <http://www.ryerson.ca/clt/publications/papers/ITFailure.doc>
9. Gary M. Weiss Predicting Telecommunication Equipment Failures from Sequences of Network Alarms – 7 p. // To appear in Handbook of Knowledge Discovery and Data Mining. – W. Kloesgen and J. Zytkow (eds.). – Oxford University Press, 2002. – 1064 p.
10. Shooman M.L. Reliability of Computer Systems and Networks – Fault Tolerance, Analysis and Design / M.L. Shooman . – John Wiley & Sons, Inc., New York, 2002. – 546 p.
11. Muralidhar Kurudi Hanumantharao. Hierarchical schemes for routing and flow control in communication networks // Ph.D. Thesis, 1985. – 251 p.
12. Перегудов Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.Л. Тарасенко. – Москва : Высшая школа, 1989. – 364 с.
13. Моисеев Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – Москва : Наука, 1981. – 488 с.
14. Беллман Р. Динамическое программирование и уравнения в частных производных / Р. Беллман, Э. Энджел. – Москва : Мир, 1974. – 207 с.

Автори статті

Колісник Олена Василівна – к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій, Національний авіаційний університет, Київ. Тел.: +380 (95) 097 73 12. E-mail: kolisnuk1973@mail.ru

Колісник Дмитро Сергійович – студент, Національний авіаційний університет, Київ. Тел.: +380 (50) 925 38 38. E-mail: kolisnuk1973@mail.ru

Authors of the article

Kolisnyk Olena Vasylivna – candidate of sciences (technical), associate professor of computer information technologies department, National Aviation University, Kyiv. Tel.: +380 (95) 097 73 12. E-mail: kolisnuk1973@mail.ru

Kolisnyk Dmytro Serhiyovych – student, National Aviation University, Kyiv. Tel.: +380 (50) 925 38 38. E-mail: kolisnuk1973@mail.ru

Дата надходження
в редакцію: 23.07.2016 р.

Рецензент:
доктор технічних наук, доцент Б.М. Стрихалюк
Національний університет «Львівська політехніка»