

УДК 681.3

Д. В. Флейтман

Институт проблем регистрации информации НАН Украины
ул. Н. Шпака, 2, 03113 Киев, Украина

Решение задачи обеспечения живучести корпоративных информационных систем при частичном разрушении каналов связи

Рассмотрена задача обеспечения живучести корпоративных информационных систем при частичном разрушении каналов связи. Описан метод перенаправления информационных потоков по дугам сети, имеющим резервы по пропускной способности. Приведен алгоритм сведения решения поставленной задачи к решению задачи максимизации многопродуктовых потоков.

Ключевые слова: корпоративная информационная система, живучесть, потоки в сетях, максимальный поток, многопродуктовый поток, каналы связи.

Введение

Неотъемлемой частью технического обеспечения корпоративной информационной системы (КИС), более того, фундаментом ее технического обеспечения является разветвленная коммуникационная связь, включающая проводные, беспроводные и комбинированные каналы связи. Поэтому одним из важных направлений в повышении живучести КИС должно быть обеспечение устойчивости работы каналов связи даже в непредвиденных ситуациях. Устойчивая работа каналов связи в непредвиденных ситуациях, как и вообще устойчивая работа КИС, не может достигаться какими-либо разовыми мероприятиями. Это должна быть непрерывная направленная система действий, основанная на определенных методах, выполняемая на всем протяжении жизненного цикла КИС [4].

В настоящей работе рассматривается комплексный подход к повышению живучести каналов связи коммуникационной сети, обеспечивающей работу КИС. Описаны мероприятия по повышению живучести каналов связи, проводимые на всем протяжении создания, внедрения и эксплуатации КИС, которые позволяют, в случае частичного разрушения каналов связи, оперативно обеспечить функционирование КИС путем решения типовой задачи о максимальном потоке.

© Д. В. Флейтман

Математическая модель КИС

Опишем КИС сетевой моделью, узлы которой — организационно-технические комплексы (включающие программно-методические комплексы, комплексы программно-аппаратных средств и кадровые ресурсы), а дуги — различные каналы связи (проводные, беспроводные, комбинированные) [1].

При описании модели КИС будем использовать следующие понятия [1].

Функция системы — получение средствами КИС логически завершенного результата, представляющего самостоятельный интерес для пользователя.

Процесс обработки данных — набор процедур, реализующих определенную функцию КИС.

Задача — компонента (логический модуль) процесса обработки данных, функционирующая только в одном узле. Процесс обработки данных — последовательное выполнение задач.

Нештатная ситуация — непредвиденное изменение ресурсов КИС.

Ресурс КИС — средство программного, технического, информационного и организационного обеспечения КИС [4], которое может быть выделено на определенный интервал времени для выполнения задач передачи, обработки и хранения данных.

Критический процесс — процесс обработки данных, необходимый для выполнения основной функции КИС. Обязателен к выполнению даже при возникновении нештатных ситуаций.

Локальная база данных (ЛБД) — логически независимый фрагмент БД КИС, хранимый в одном узле.

Информационный поток (поток информации) — передача информации между узлами сети. Информационный поток характеризуется объемом передаваемой информации и временем доставки.

Реконфигурация — изменение конфигурации информационных потоков КИС с целью обеспечения требуемой пропускной способности компьютерной сети в условиях уменьшения ее коммуникационных ресурсов.

Обозначим (см. рис. 1):

u_i — i -й узел в сети;

d_{ij} — дуга сети, соединяющая узлы i и j ;

u_{ij} — пропускная способность d_{ij} .

Будем рассматривать узлы u_i сети как неделимые с точки зрения сетевой модели, а дуги d_{ij} — неориентированные. Таким образом, КИС описывается связной сетью, состоящей из множества узлов u_i и неориентированных дуг d_{ij} с пропускной способностью u_{ij} . Не умаляя общности, будем считать, что время передачи информации по дуге не включает время подготовки информации для пересылки (подготовка информации для пересылки включена в задачи, выполняемые в узлах сети).

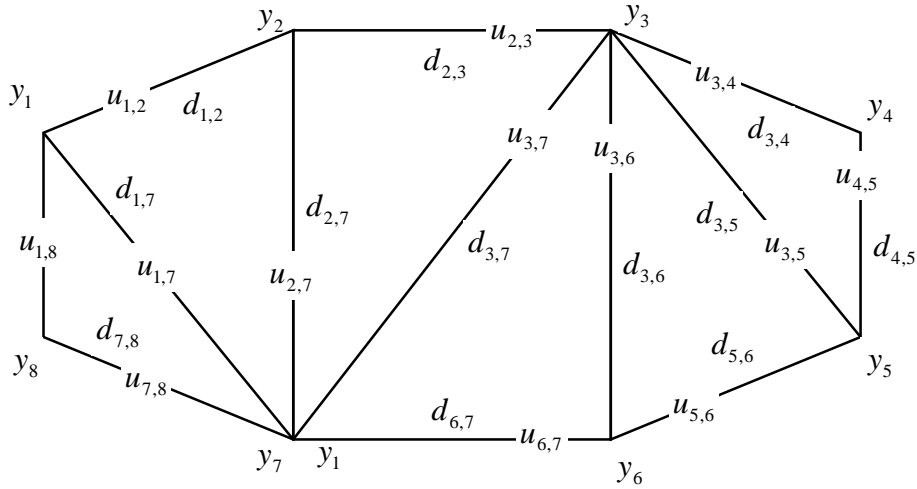


Рис. 1. Представление модели КИС

Для математического описания сетевой модели КИС введем обозначения:

P — число процессов обработки данных (далее — процессов), выполняемых КИС (число функций КИС);

K — число критических процессов, выполняемых КИС;

Z_p — число задач, обеспечивающих выполнение процесса p ;

z_p — z -я задача в последовательности реализации процесса p ;

L — количество ЛБД КИС;

VB_l — объем l -й ЛБД;

N — число узлов в сети;

NV — число внешних узлов сети;

T_p — максимальное время выполнения процесса p , заданное требованиями к системе;

T_p^K — максимальное время выполнения «критичных процессов» при возникновении нештатных ситуаций;

R_i — производительность вычислительных ресурсов узла i ;

V_i — объем внешней памяти для хранения ЛБД в узле i .

Для описания сетевой модели: логической и технологической взаимосвязи задач и баз данных, распределения задач и баз данных по узлам сетевой модели, введем двумерные массивы.

1. Матрица топологии:

$$MT(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{если существует } d_{ij}, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad i, j = \overline{1, N}.$$

2. Матрица использования ЛБД задачами процессов КИС:

$MV(z_p, l)$, $l = \overline{1, L}$ — максимальный объем порции информации, которой обмениваются l -я ЛБД и задача z_p .

3. Матрица взаимосвязи задач:

$$MZ(z_p, z1_p) = \begin{cases} 1, & z_p \text{ использует информацию } z1_p, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad z_p, z1_p = \overline{1, Z_p}.$$

4. Матрица распределения ЛБД по узлам сети:

$$MB(l, i) = \begin{cases} 1, & \text{если } l\text{-я ЛБД хранится в узле } i, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad l = \overline{1, L}, \quad i = \overline{1, N}.$$

5. Матрица нагрузки MN : определяет интенсивность выполнения задач в различные периоды времени (суток, месяца, квартала, года) $MN(z_p, h) = S$ (задач за единицу времени), где h — интересующий период времени.

6. Матрица функционирования КИС:

$$MF(z_p, i) = \begin{cases} 1, & \text{если задача } z_p \text{ выполняется в узле } i, \\ 0, & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad \begin{matrix} z_p = 1, \dots, Z_p, \\ p = 1, \dots, P, \quad i = 1, \dots, N. \end{matrix}$$

Для расчета времени выполнения процесса p введем обозначения функций:

$f(z_p)$ — время выполнения задачи z процесса p ;

$t(z_p)$ — время передачи информации для задачи z процесса p .

Условие функционирования КИС сформулируем следующим образом [1]: *система спроектирована в соответствии с требованиями, если определены все процессы и задачи, однозначно определена MF*

$$\sum_{i=1}^N \sum_{z_p=1}^{Z_p} \sum_{P=1}^P MF(z_p, i) = \sum_{p=1}^P Z_p, \quad (1)$$

и выполняется условие:

$$\sum_{z_p=1}^{Z_p} (f(z_p) + t(z_p)) \leq T_p, \quad p = 1, \dots, P. \quad (2)$$

Постановка задачи обеспечения живучести при частичном разрушении каналов связи

Общая постановка задачи обеспечения живучести КИС в случае возникновения нештатной ситуации (обеспечение функционирования КИС в критическом

режиме) сформулирована в [1]: в случае возникновения нештатных ситуаций, приведших к уменьшению пропускной способности некоторых дуг сети или уменьшению ресурсов некоторых узлов сети, перераспределить выполнение задач по узлам сети и перенаправить потоки информации между узлами по дугам сети с целью обеспечения своевременного выполнения критических функций системы. В математическом виде задача сводится к минимизации следующей функции цели:

$$\sum_{k=1}^K \left[C1_k \cdot \sum_{z_p=1}^{Z_p} (f(z_p) + t(z_p)) \right] + \sum_{i=1}^N C2_i t_i + \sum_{i=1}^N C3_i t_{ij} \rightarrow \min \quad (3)$$

при ограничениях:

$$\sum_{z_p=1}^{Z_p} (f(z_p) + U(z_p)) \leq T_p^K, \quad p = 1, \dots, K, \quad (4)$$

$$\sum_{z_p=1}^{Z_p} MF(z_p, i) \cdot r_p \leq R_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^L MB(l, i) \cdot VB_l \leq V_i, \quad i = \overline{1, N}, \quad (6)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij}, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где CI_i — весовые коэффициенты, $I=1,2,3$; t_i — время максимального увеличения ресурса узла i ; t_{ij} — время максимального увеличения пропускной способности d_{ij} ; x_{ij} — поток по d_{ij} .

Ограничение (4) — это требование выполнения критических процессов, ограничения (5) и (6) — требования не превышения имеющихся ресурсов узлов по производительности и внешней памяти, ограничение (7) — требование не превышения пропускной способности дуг.

Суть весовых коэффициентов CI_i , регулирующих область минимума целевой функции, заключается в том, чтобы найти решение функционирования КИС в критическом режиме, прибегая к восстановлению ресурсов только в крайнем случае, когда методами реконфигурации и реорганизации задача не решается.

В настоящей работе рассмотрим решение частной задачи: обеспечение живучести в наиболее часто встречающемся на практике случае [2, 3] — частичном выходе из строя каналов связи. Постановка задачи обеспечения живучести в этом случае следующая: определить x_{ij} , для которых

$$\sum_{k=1}^K (C1_k \cdot t(z_p)) + \sum_{i=1}^N C3_i t_{ij} \rightarrow \min \quad (8)$$

при ограничениях:

$$\sum_{z_p=1}^{Z_p} t(z_p) \leq \tilde{T}_p^K, \quad p = 1, \dots, K, \quad (9)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij}, \quad i, j = \overline{1, N}, \quad (10)$$

где $\tilde{T}_p^K = T_p^K - \sum_{z_p=1}^{Z_p} f(z_p)$.

Общий алгоритм решения

Для упрощения описания общего алгоритма будем считать, что объем и структура передаваемой по дугам d_{ij} информации не зависит от времени t .

Предполагается наличие в КИС блока сбора статистики и ведения матрицы МР — загрузки дуг сети.

Предположим обрыв связи между узлами y_i и y_j , т.е. удаление из сети дуги d_{ij} (не умаляя общности построения алгоритма, для облегчения восприятия, будем считать, что y_i и y_j были соединены непосредственно).

Как уже обозначалось выше x_{ij} — это поток по d_{ij} , т.е. объем информации, передаваемой между y_i и y_j за единицу времени. Введем обозначение:

x_{ij}^{mn} — объем информации (в составе x_{ij}), передаваемой по дуге d_{ij} между задачами m и n или между задачами и ЛБД m и l :

$$\sum_{m,n,l} (x_{ij}^{mn} + x_{ij}^{ml}) = x_{ij}, \quad m, n = \overline{1, (Z_p \cdot P)}, \quad l = \overline{1, L}.$$

Основной идеей алгоритма решения вышесформулированной задачи (8) является построение **виртуальной альтернативной сети (ВАС)**, обеспечивающей доставку информации, передаваемой по поврежденным каналам связи, используя резервы пропускной способности компьютерной сети, как заложенные в проекте, так и выявленные в результате сбора статистики функционирования КИС (матрица МР). Определение информационных потоков в ВАС должно быть выполнено таким образом, чтобы обеспечить функционирование КИС в соответствии с заданными требованиями для критического режима.

Построение ВАС проводится с требованиями минимального перепроектирования информационных потоков сети КИС.

Перепроектирование информационных потоков сводится к решению задачи анализа коммуникационных сетей для многопродуктовых потоков [5]: источниками и стоками являются задачи m, n и ЛБД l ($m, n = \overline{1, (Z_p \cdot P)}$ $l = \overline{1, L}$).

Прежде, чем описывать алгоритм решения задачи анализа коммуникационных сетей, покажем на простом примере построение ВАС.

На рис. 2 представлена коммуникационная сеть КИС, содержащая девять узлов. Пусть разрушена дуга $d_{5,6}$. Эта дуга поддерживает информационную связь четырех задач: $Z1, Z2, Z3, Z4$. На рис. 3 представлена виртуальная сеть, построенная на базе резервов коммуникационной сети КИС (заложенных в проекте и выявленных при сборе статистики), и служащая основой для дальнейшего построения ВАС. При этом пропускные способности (r_{ij}) дуг виртуальной сети $d_{1,2}, d_{2,5}, d_{5,7}, d_{4,6}, d_{6,9}$ увеличены за счет объема информации, которая передавалась по ним до повреждения связи между вышеупомянутыми задачами. Такое увеличение пропускной способности виртуальной сети обусловлено построением в дальнейшем новых информационных потоков для задач $Z1, Z2, Z3, Z4$. Представленная таким образом виртуальная сеть использует все имеющиеся резервы и служит основой для построения ВАС путем решения задачи анализа коммуникационных сетей [5]. Такой подход не требует перераспределения информационных потоков, которые не затронуты разрушением $d_{5,6}$.

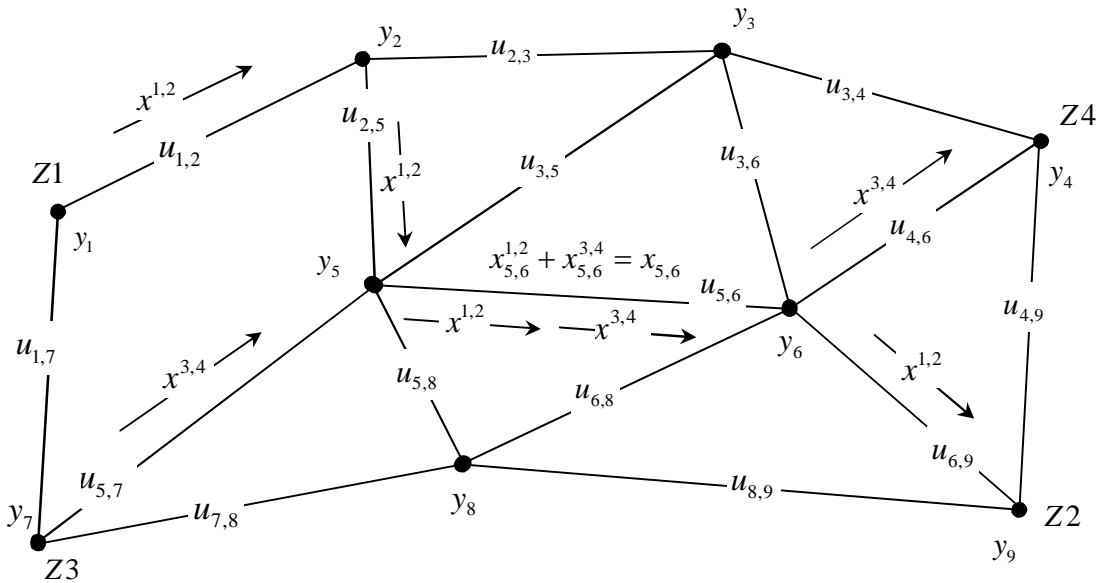


Рис. 2. Пример коммуникационной сети КИС

Допустим, для наглядности, что пропускные способности $r_{3,5}, r_{3,6}, r_{5,8}, r_{6,8}$ компенсируют $u_{5,6}$, тогда очевидно, что решение задачи анализа коммуникационной сети приведет к построению ВАС, представленной на рис. 4.

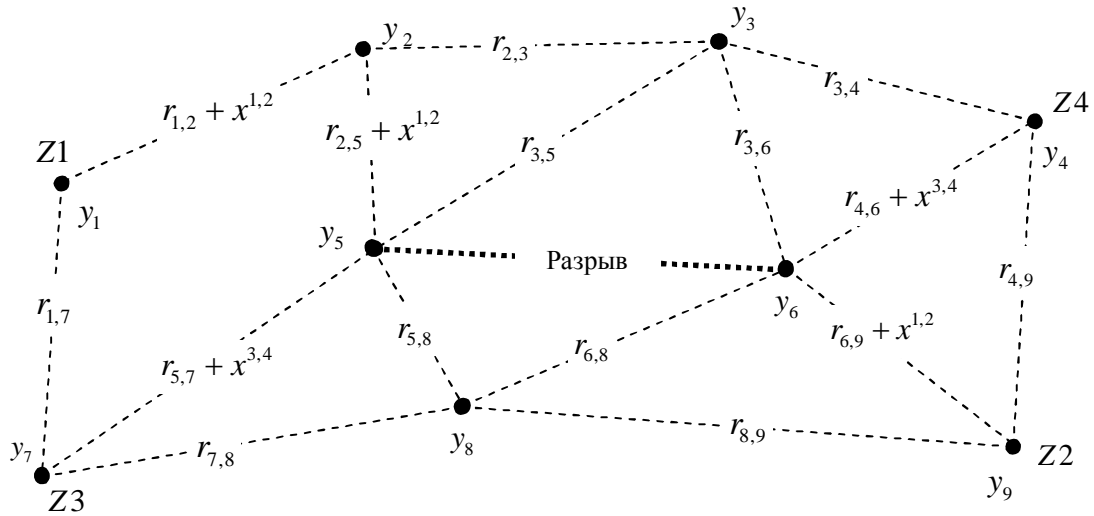


Рис. 3. Виртуальная сеть КИС

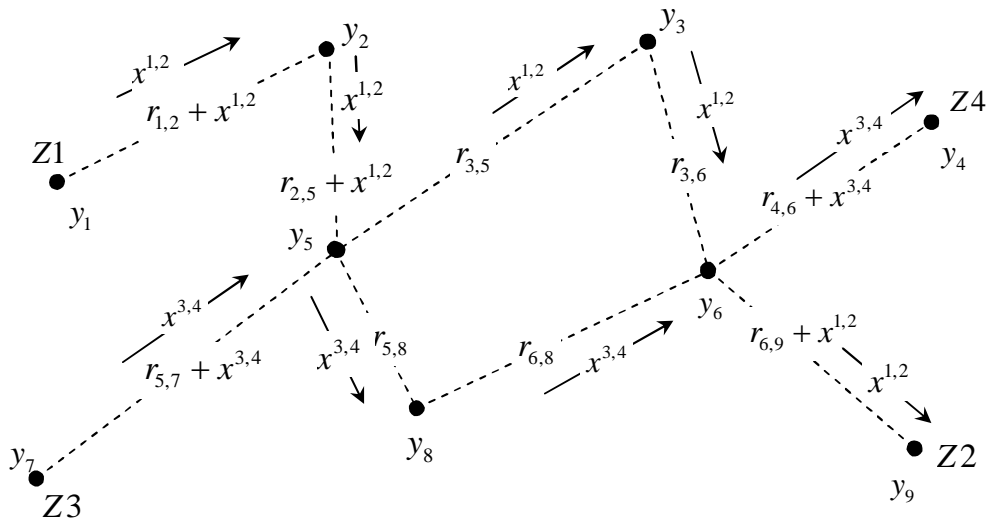


Рис. 4. ВАС, компенсирующая удаление $d_{5,6}$

Таким образом, вышеприведенными иллюстрациями показано, что задача (8) сводится к анализу построенной ВАС при известных множествах истоков, стоков и величинах потоков. Для описания математического алгоритма решения задачи (8) сформулируем ее в терминах задачи о максимальном многопродуктовом потоке.

Пусть для обеспечения живучести КИС при частичном разрушении ее коммуникационной сети описана виртуальная сеть, объединяющая все узлы, которые содержат задачи (или ЛБД) с разорванной информационной связью. Описание этой сети определяет источники и стоки информации (задачи и ЛБД, передающие и получающие информацию по каналам сети, которые разрушились) и объемы

информации, передаваемой между ними. Обозначим число пар источник-сток символом S , объем информации, передаваемой из источника в сток символом $X_s, (s = \overline{1, S})$, $X_s \geq x_{ij}^{mn}$. Пусть описанная виртуальная сеть содержит Q дуг с пропускными способностями $b_q, (q = \overline{1, Q})$, где b_q равно сумме $\sum_{i,j} x_{ij}^{mn}$ и резервных пропускных способностей, заложенных в проекте и выявленных в результате сбора статистики. Для каждой из S пар источник-сток возможна передача информации X_s по нескольким цепям (непрерывным последовательностям узлов и дуг), ведущим из источника в сток. Требуется пропустить потоки информации $X_s, (s = \overline{1, S})$ по цепям таким образом, чтобы не были превышены пропускные способности дуг $b_q, (q = \overline{1, Q})$, и сумма величин потоков по всем цепям была бы максимальной.

Произвольная цепь в виртуальной сети может быть представлена Q -мерным вектором, q -я компонента которого равна 1, если дуга q входит в эту цепь, и равна 0 в противном случае. Определим матрицу инцидентий дуги-цепи $A = [a_{qs}]$ следующим образом:

$$a_{qs} = \begin{cases} 1, & \text{если дуга } q \text{ входит в цепь } s, \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases}$$

Назовем в терминологии задачи о максимальном многопродуктовом потоке объем информации $X_s, s = \overline{1, S}$, передаваемой от источника (задачи или ЛБД) в сток (задачу или ЛБД) продуктом. Тогда задачу (8) обеспечения живучести КИС при частичном разрушении каналов связи можно сформулировать как задачу о максимальном многопродуктовом потоке [5] следующим образом:

$$\sum_{s=1}^S X_s \rightarrow \max \quad (11)$$

при условиях:

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^S a_{qs} X_s &\leq b_q, q = \overline{1, Q}, \\ X_s &\geq 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Условия в форме неравенств (12) можно представить в виде равенств, используя новые переменные $c_q (c_q \geq 0)$, называемые слабыми переменными:

$$\begin{aligned} \sum_{s=1}^S a_{qs} X_s + c_q &= b_q, q = \overline{1, Q}, \\ X_s, c_q &\geq 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Подробное описание алгоритма решения задачи (11), (13) приводится, например, в [5].

Полученные в результате решения задачи (11) a_{qs} определяют требуемую ВАС.

Таким образом, решение задачи обеспечения живучести КИС при частичном разрушении каналов связи коммуникационной сети сводится к решению типовой задачи максимизации многопродуктовых потоков.

Заключение

Обеспечение живучести КИС в рассматриваемом случае частичного разрушения каналов связи может быть эффективным только при условии предварительной подготовки исходной информации для решения задачи о максимальном многопродуктовом потоке — описании и поддержки в актуальном состоянии исходной виртуальной сети для построения ВАС. Работа по подготовке исходной информации должна непрерывно выполняться, начиная с этапов создания КИС, и в дальнейшем — в процессе обеспечения эксплуатации. Прежде всего, должна быть описана полная виртуальная сеть и различные ее варианты для групп задач (для прогнозируемых случаев разрушения каналов связи, исходя из специфики коммуникационных сетей КИС) на основе заложенных проектных резервов пропускной способности каналов связи. В дальнейшем, на этапе эксплуатации КИС, описание полной виртуальной сети и различных ее вариантов должны корректироваться в части пропускной способности каналов связи на основе статистических данных (матрицы MP). Должно также увеличиваться число дополнительных вариантов виртуальной сети исходя из опыта эксплуатации КИС. Средства обеспечения живучести в рассматриваемом случае — это составная часть системы повышения живучести КИС [4] и, как вся система, они должны вместе с КИС проходить все ступени ее жизненного цикла.

1. Додонов А.Г., Флейтман Д.В. К вопросу живучести корпоративных информационных систем. // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2004. — Т. 6, № 2. — С. 33–41.
2. Зайченко Е.Ю., Зайченко Ю.П. Задача о нахождении максимального потока в сетях АТМ и метод ее решения // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Вип. 48: [Редкол.: Кунцевич В.М. (голова) та ін.]
3. Зайченко Е.Ю. Сети АТМ: Моделирование, анализ и оптимизация. — К., 2003.
4. Флейтман Д.В. Жизненный цикл и живучесть корпоративных информационных систем. // Реєстрація, зберігання і оброб. даних. — 2004. — Т. 6, № 3. — С. 74–84.
5. Ху Т. Целочисленное программирование и потоки в сетях. — М.: Мир, 1974.

Поступила в редакцию 20.01.2005