

УДК 681.31

**К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ НАДЁЖНОСТИ
СЛОЖНЫХ ПОДСИСТЕМ КОРПОРАТИВНОЙ СЕТИ,
ПОЛНОСТЬЮ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ В
ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Калимулина Э.Ю.

*(Московский технический университет связи и информа-
тики, Москва)*

elmira-yu-k@mail.ru

Рассматриваются вопросы оценки надёжности сложных параллельных подсистем корпоративной сети, восстанавливаемых в процессе эксплуатации при неэкспоненциальном распределении времени восстановления. Описывается методика расчёта надёжности таких подсистем.

Ключевые слова: надёжность, компьютерные сети, восстанавливаемые системы.

Одним из важнейших этапов проектирования корпоративных сетей (КС) является этап расчёта показателей надёжности её функционирования, причём хорошее качество проектирования избавляет от дополнительных материальных и временных затрат на устранение ошибок на стадии эксплуатации. С усложнением программно-аппаратных комплексов, применяемых для реализации конкретной КС, возникает необходимость в разработке новых методов и методик расчёта, позволяющих адекватно оценивать показатели надёжности и эффективности таких систем. На сегодняшний момент наиболее эффективными при анализе надёжности являются абстрактные модели, построенные не на основе конкретных аппаратных единиц, а на базе логических подсистем, реализующих конкретные функции в работе

сети. На первом этапе проектирования данные модели позволяют определить оптимальную надёжность логических подсистем. Но на последующих этапах проектирования, для перехода от абстрактных функциональных блоков в модели надёжности к более конкретным подсистемам, которые могут быть доведены до программно-аппаратной реализации, данные логические подсистемы должны быть рассмотрены более детально. Например, в работе [4], сложная информационная система моделировалась всего тремя блоками. В работе [3] КС моделировалась четырьмя блоками: сеть доступа, центрально-вычислительный комплекс, магистральная транспортная сеть, сервис-центр, локально-вычислительная сеть.

Рассмотрим один из блоков – центрально-вычислительный комплекс (ЦВК). Системного уровня детализации достаточно для определения значения надёжности ЦВК в целом, но в дальнейшем полученное целевое значение надёжности должно быть распределено между элементами, образующими ЦВК. Сам ЦВК – это сложная система, предназначенная для осуществления обработки большого объема данных для оператора связи и реализованная на основе большого числа серверов (>100), обрабатывающих данные параллельно. Адекватно оценить надёжность такой системы, рассматривая её как один функциональный блок, нельзя. Следовательно, нужна детализация, в частности, возникает задача определения надёжности параллельной системы, состоящей из большого числа элементов. Основным методом, используемым при решении таких задачи, сегодня является метод имитационного моделирования. Несмотря на многие его достоинства, к числу которых, прежде всего, относится достаточно высокая точность, его отличает большая трудоемкость создания модели и большое время, необходимое для получения результатов. Кроме того сложность создания модели заключается ещё и в том, что некоторые упрощения, которые, казалось бы могли сократить время расчётов, просто некорректны при моделировании КС. Например, законы, под которыми работают технические устройства сетей связи, в

большинстве случаев отличаются от экспоненциальных законов [5]. В данной работе будет сделано только общее предположение о том, что времена восстановления подсистем имеют некоторые произвольные функции распределения $F_e(t)$. Второе упрощение, делаемое при расчёте надёжности параллельных систем – идентичность элементов. В корпоративных сетях при добавлении параллельных линий связи при резервировании сетей доступа и магистральных сетей в качестве резервных используют линии связи с характеристиками, отличными от характеристик основной линии. Из-за высокой стоимости в качестве резервных обычно используются каналы, имеющие меньшую пропускную способность и, соответственно, другую надёжность [1,3]. Такая же ситуация и с ЦВК: поскольку серверные мощности наращиваются постепенно, то каждый последующий добавляемый сервер или группа серверов отличаются по своим надёжностным характеристикам от тех, что уже введены в эксплуатацию, в процессе функционирования серверы с разными характеристиками производительности будут иметь разную надёжность.

Цель данной статьи - разработка методики расчёта надёжности параллельной системы для случая, когда все подсистемы различны. Поскольку все подсистемы КС полностью восстанавливаются после отказа, то рассматриваться будет случай только восстанавливаемых систем. На сегодняшний момент все известные методы расчёта надёжности таких систем основываются на построении графа состояний системы, определении переходных вероятностей между состояниями и выводе на основе этих данных формул для характеристик надёжности. В работе [3] автором получен ряд формул, по которым можно определить показатели надёжности для подобных систем с небольшим числом состояний (~50). Однако для большего числа применение данных формул требует значительных вычислительных затрат.

Следовательно, необходимо построить модель для нахождения показателей надёжности параллельных систем с большим числом разнородных элементов. С учётом замечаний, сформулированных выше, и известных методов расчёта надёжности по

графу состояний, построим граф состояний для общего случая – для системы, состоящей из n подсистем. Для наглядности всё множество состояний на графе удобно разбить на следующие подмножества:

- подмножество «0» – 0 отказавших элементов, данное подмножество включает всего 1 состояние;
- подмножество «1» - 1 отказавший элемент, в данном подмножестве n возможных состояний;
- подмножество «2» - 2 элемента находится в состоянии отказа, данное подмножество включает $n(n-1)/2$ возможных состояний;
- подмножество «3» - 3 элемента находится в состоянии отказа, $n(n-1)(n-2)/3$ возможных состояний;
- ...
- подмножество « $n-2$ » - ($n-2$) элемента находится в состоянии отказа, включает $n(n-1)/2$ возможных состояний;
- подмножество « $n-1$ » - ($n-1$) элемента находится в состоянии отказа, n состояний;
- уровень « n » - n элементов находится в состоянии отказа, 1 состояние.

Таким образом, число состояний на каждом таком уровне, где из n работоспособными остаются ($n-z$) элементов с различной надёжностью, находится элементарно как $C_n^z = \frac{n!}{z!(n-z)!}$.

Каждое состояние системы будем задавать бинарным вектором: $S_{lm}(t) = \{s_1(t), s_2(t), s_3(t), \dots, s_n(t)\}$, где l - число отказавших элементов ($l = \overline{0, n}$), $m = \overline{0, n! / l!(n-l)!}$ - номер состояний в l -ом подмножестве; $s_i(t)=1$ - если i -ая подсистема была работоспособна в момент времени t , $s_i(t)=0$ - если находилась в состоянии отказа.

Каждому состоянию соответствует n входящих дуг и n выходящих, общее число дуг графа: $\sum_{l=0}^n \frac{n!n}{l!(n-l)!}$. Дуга характери-

зует изменение состояние одного элемента: либо переход из работоспособного состояния в состояние отказа, либо восстановление. Интенсивности отказов у всех подсистем различны и равны: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$. Времена восстановлений подсистем имеют произвольные функции распределения: $F_{e1}(t), F_{e2}(t), \dots, F_{en}(t)$.

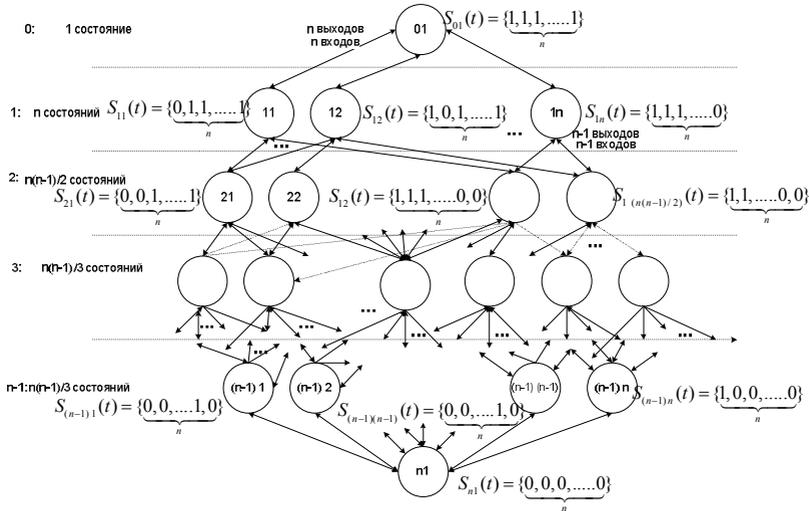


Рис. 1. Интерпретация модели подсистемы корпоративной сети ориентированным графом.

Коэффициент готовности для системы, имеющей m состояний, матрицу переходных вероятностей $P=(p_{ij})$ и вектор безусловных математических ожиданий времени пребывания в каждом из состояний $\eta=(\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_m)$ находится следующим образом [6]:

$$K_T = \frac{\sum_{j \in E_+} \eta_j \pi_j - \sum_{j \in E_-} \eta_j \pi_j}{\sum_{j \in E} \eta_j \pi_j}, \quad \pi = (\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m) - \text{вектор решения}$$

ния, $\pi_i = D_i / \sum_{j=0}^m D_j$, где D_i - минор детерминанта матрицы $I-P$,

получаемый вычеркиванием i -го столбца и i -ой строки, I – единичная матрица. Однако не трудно заметить из самой формулы, что данный подход не эффективен с точки зрения времени работы алгоритма: вычисление миноров матрицы занимает много времени.

Рассмотрим другой подход к оценке надёжности системы, представимой графом на рис.1. Рассмотрим вероятность того, что система, находясь в момент времени $t_0=0$ в момент времени t окажется в нерабочем состоянии, т.е. откажет. Вероятность отказа здесь обозначим через Q_0 . Как и ранее, будем считать, что $F_{ai}(t)$ – функция распределения времени восстановления i -го элемента, $F_i(t) = 1 - \exp\{-\lambda_i t\}$ – функция распределения времени работы до отказа i -го элемента.

Поведение системы, представленной графом на рис. 1, можно описать некоторым случайным процессом $\zeta(t)$. Пространство состояний этого процесса $E = \{0, 1, 2, \dots\}$. Предположим, что в начальный момент времени $\zeta(0) = 0$, т.е. в системе все элементы находятся в работоспособном состоянии. Переход из некоторого состояния $n-l$ в состояние $n-l+1$ следует рассматривать как отказ одного элемента. В зависимости от того, сколько элементов должны оставаться работоспособными, чтобы вся система находилась в работоспособном состоянии, под отказом системы можно понимать переход:

- из состояния $n-1$ в состояние n , если для работоспособного состояния системы достаточно, чтобы один элемент находился в рабочем состоянии;
- из некоторого состояния $n-m$ в состояние $n-m+1$, если система остаётся работоспособной при m работающих элементах.

В частности второму варианту соответствует условие работоспособности центра обработки данных оператора связи, где для нормального функционирования системы, достаточно, чтобы из 1000 серверов, работало примерно 950.

Преимущество описанной выше схемы заключается в том, что она позволяет легко выделить промежуточные состояния, например, состояние частичного отказа. В случае необходимости можно рассмотреть различные схемы восстановления системы, определить оптимальные варианты профилактического обслуживания системы.

Оценим характеристики надёжности для данной модели. Составление системы интегральных уравнений и её решение для общего случая, когда элементы не одинаковые, – труднореализуемая задача. Рассмотрим некоторые приближённые оценки. Найдём вероятность отказа системы за время t по монотонной траектории, когда система последовательно переходит из состояний 0 в состояния $1, 2, \dots, n-1, n$. Время до первого отказа системы будем оценивать как: $\tau = \min\{t : \xi(t) = n \mid \xi(0) = 0\}$. На рис. 2 показаны графики результатов имитационного моделирования системы, состоящей из 50 элементов. Для наглядности элементы считались одинаковыми, и под отказом понимался: 1) отказ 40 элементов (отказ в момент τ_1), 2) отказ 30 элементов (момент τ_1). Из траекторий реализации случайного процесса видно, что оценки времени работы системы до первого отказа и вероятности отказа по монотонной траектории могут быть использованы в качестве нижних границ надёжности, что в большинстве инженерных приложений, в частности, при анализе надёжности компьютерных сетей [2], находит широкое применение.

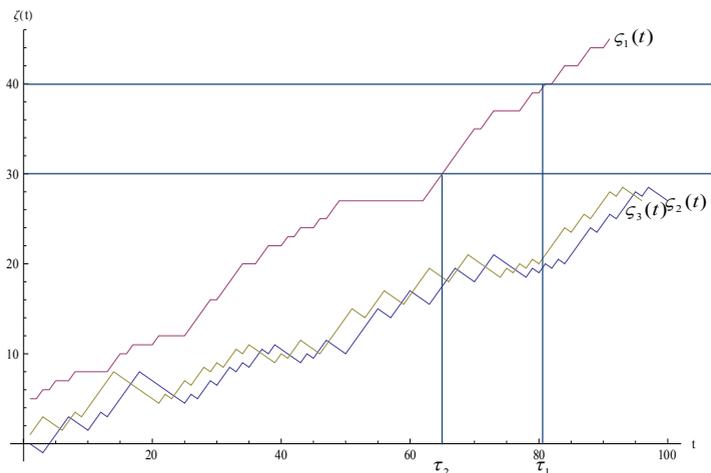


Рис. 2. График траектории случайного процесса.

Рассмотрим траекторию, когда последовательно отказываются элементы 1, 2, ..., n-1, n. Вероятность отказа по такой монотонной траектории находится как:

$$\begin{aligned}
 Q_{10} = & \int_{0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n} \lambda_1 \text{Exp}[-\lambda_1 x_1] (1 - F_{e_1}(x_n)) \\
 & \lambda_2 \text{Exp}[-\lambda_2 (x_2 - x_1)] (1 - F_{e_2}(x_n - x_1)) \dots \\
 & \dots \lambda_{n-1} \text{Exp}[-\lambda_{n-1} (x_{n-1} - x_{n-2})] (1 - F_{e_{n-1}}(x_n - x_{n-2})) \\
 & \lambda_n \text{Exp}[-\lambda_n (x_n - x_{n-1})] (1 - F_{e_n}(x_n - x_{n-1})) dx_n dx_{n-1} \dots dx_2 dx_1.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Для систем с нагруженным резервом отказ может произойти по одной из монотонных траекторий. Всего таких траекторий на графе (рис. 1) $n!$. Аналогичное выражение для вероятности отказа $Q_{20}, \dots, Q_{(n-1)0}, Q_{n0}, \dots, Q_{(n)0}$ для каждой траектории трудно получить путем последовательных перестановок сомножителей в выражении (1). Перепишем выражение (1) в следующем виде:

$$Q_{10} = \prod_{j=1}^n \lambda_j \int_{0 < x_1} \int_{< x_2} \dots \int_{< x_{n-1}} \int_{< x_n} \text{Exp}[-\sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i - x_{i-1})]$$

$$\prod_{i=1}^n (1 - F_{ei}(x_n - x_{i-1})) dx_n dx_{n-1} \dots dx_2 dx_1$$

где $x_0=0$, $Q_0 = \sum_{\text{по всем траекториям } i} Q_{i0}$.

Произведём замену: $y_0 = x_n - x_0$, $y_1 = x_n - x_1$, ...,
 $y_{n-1} = x_n - x_{n-1}$, соответственно, $x_n - x_{n-1} = y_{n-1}$,
 $x_{n-1} - x_{n-2} = y_{n-2} - y_{n-1}$, ..., $x_2 - x_1 = y_1 - y_2$, $x_1 - x_0 = y_0 - y_1$,
 $y_n = 0$:

$$Q_{10} = \prod_{j=1}^n \lambda_j \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \text{Exp}[-\sum_{i=1}^n \lambda_i (y_{i-1} - y_i)] \quad (2)$$

$$\prod_{i=1}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1}.$$

Оценим Q_{10} сверху. От (2) перейдём к интегралу \overline{Q}_{10} :

$$Q_{10} \leq \overline{Q}_{10} = \prod_{j=1}^n \lambda_j \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \prod_{i=1}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1}. \quad (3)$$

Оценка снизу:

$$Q_{10} \geq \underline{Q}_{10} = \prod_{j=1}^n \lambda_j \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \text{Exp}[-\lambda y_0] \prod_{i=1}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1}, \quad (4)$$

где в качестве λ берётся произведение $\prod_{i=1}^n \lambda_i$.

Тогда: $0 \leq \overline{Q}_{10} - Q_{10} \leq \overline{Q}_{10} - \underline{Q}_{10}$,

$$\begin{aligned}
\overline{Q_{10}} - \underline{Q_{10}} &= \\
&= \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \int \dots \int (1 - \text{Exp}[-\lambda y_0]) \prod_{i=1}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1} \leq \\
&\leq \lambda \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \int y_0 (1 - F_{e1}(y_0)) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1} = \quad (5) \\
&= \frac{\lambda}{(n-1)!} \int_0^\infty y_0^n (1 - F_{e1}(y_0)) dy_0 = \\
&= \frac{\lambda}{(n-1)!} \frac{1}{(n+1)} \int_0^\infty y_0^{n+1} dF_{e1}(y_0) = \frac{\lambda E\xi^{n+1}}{(n-1)!(n+1)}.
\end{aligned}$$

Рассмотрим теперь соотношение (5) в предположении, что для среднего времени восстановления и среднего времени работы i -ой подсистемы выполнено условие

$$E\xi_{\text{восст.}i} / E\xi_{\text{отк.}i} = T_{\text{восст.}i} / T_{\text{отк.}i} \rightarrow 0; \quad (6)$$

для экспоненциальных законов распределения времени отказа и восстановления: $\lambda_i / \mu_i \rightarrow 0$.

Данное условие очевидно для элементов корпоративной сети: среднее время восстановления (ремонта) какой-либо подсистемы КС во много раз меньше среднего времени безотказной работы подсистемы. Тогда из (6) следует, что $\lambda E\xi^1 \ll 1$.

Обозначим $E\xi = \int_0^\infty td(1 - F(t)) = T$. Рассмотрим $(n+1)$ -ый начальный момент:

$$\begin{aligned}
E\xi^{n+1} &= \int_0^{\infty} t^{n+1} dF(t) = \\
&= t^{n+1} (1 - F(t)) \Big|_0^{\infty} + n(n+1) \int_0^{\infty} (1 - F(x)) dx \\
&= \int_0^{\infty} t^{n-1} \left(1 - \frac{1}{\int_0^t (1 - F(x)) dx} \int_0^t (1 - F(x)) dx \right) dt = \quad (7) \\
&\leq n(n+1) T \int_0^{\infty} t^{n-1} \int_t^{\infty} (1 - F(x)) dx dt = \\
&= n(n+1)(n-1) T^2 \int_0^{\infty} t^{n-2} \int_t^{\infty} (1 - F(x)) dx dt \quad \dots \quad (n+1)! T^{n+1}.
\end{aligned}$$

Выражение (5) можно оценить с учётом (7):

$$\frac{\lambda E\xi^{n+1}}{(n-1)!(n+1)} \leq \lambda n T^{n+1},$$

тогда:

$$Q_{10} \approx \overline{Q}_{10} \prod_{j=1}^n \lambda_j \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \int_{i=1}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1}.$$

С помощью полученного выражения можно найти вероятность безотказной работы $1 - Q_{10}$ для случаев, когда время восстановления всех подсистем распределено одинаково с различными параметрами для наиболее часто используемых при анализе надёжности сетей распределений.

Теперь рассмотрим траекторию, когда процесс $\zeta(t)$ делает в некоторый момент времени один скачок вниз (рассмотрим случай, когда только одна подсистема восстанавливается, а затем снова отказывает):

1) в некоторый момент t_1 отказывает подсистема 1, затем в какой-то момент времени на интервале $(x_n - x_1)$ эта подсистема восстанавливается и снова отказывает в момент x_n ;

2) остальные подсистемы последовательно отказывают в моменты времени x_2, x_3, \dots, x_n и не успевают восстановиться до момента времени x_n .

Вероятность отказа по такой траектории находится аналогично вероятности отказа по монотонной траектории:

$$\begin{aligned}
Q_{11} &= \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i \int_{0 < x_1 < x_2 < \dots < x_{n-1} < x_n < x_{n+1}} \dots \int \int \int \text{Exp}[-\lambda_1 x_1] F_{e1}(x_n - x_1) \\
&\quad \text{Exp}[-\lambda_2(x_2 - x_1)](1 - F_{e2}(x_{n+1} - x_1)) \dots \\
&\quad \dots \text{Exp}[-\lambda_n(x_n - x_{n-1})](1 - F_{en}(x_{n+1} - x_{n-1})) \\
&\quad \text{Exp}[-\lambda_1(x_{n+1} - x_n)](1 - F_{e1}(x_{n+1} - x_n)) dx_{n+1} dx_n dx_{n-1} \dots dx_2 dx_1 = \\
&= \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1} > y_n} \dots \int \int \int \text{Exp}[-(\lambda_1 y_n + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i (y_{i-1} - y_i))] \\
&\quad F_{e1}(y_{n-1}) \prod_{i=2}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_n < \\
&< C \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1} > y_n} \dots \int \int \int \text{Exp}[-y_0(\lambda_1^2 + \sum_{i=2}^n \lambda_i)] \\
&\quad \prod_{i=2}^n (1 - F_{ei}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_n \leq \\
&\leq C \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1} > y_n} \dots \int \int \int y_0 (1 - F_{e1}(y_0)) dy_0 dy_1 \dots dy_n = \\
&= C \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i \int_0^{\infty} \frac{y_0^{n+1}}{n!} (1 - F_{e1}(y_0)) = \tag{8} \\
&= \frac{C \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i}{n!(n+2)} \int_0^{\infty} y_0^{n+2} dF_{e1}(y_0) = \frac{C \lambda_1 \prod_{i=1}^n \lambda_i E \xi^{n+2}}{n!(n+2)},
\end{aligned}$$

где C – некоторая константа ($0 < C < 1$).

$$\text{Тогда } \frac{Q_{10}}{Q_{11}} \approx \frac{Q_{11}}{Q_{11}} \leq \frac{C \lambda_1 E \xi^{n+1}}{n!(n+2) I_n} \leq \frac{C \lambda_1 E \xi^{n+1}}{n!(n+2) I_n} \rightarrow 0,$$

где $I_n = \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \prod_{i=1}^n (1 - F_{\theta_i}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1}$, следо-

вательно, для оценки вероятности отказа можно использовать формулу (3), где для нагруженного резерва берётся сумма $Q_0 = \sum Q_{i0}$ по всем монотонным траекториям. Нетрудно заметить, что данная формула справедлива для случая ненагруженного резервирования. В этом случае, порядок отказа элементов точно известен, т.е. все подсистемы можно пронумеровать так, что последовательно будут отказывать элементы 1, 2, ..., n. Траектория отказов в этом случае будет единственной. Поэтому расчёт можно осуществлять по формуле (3).

С учётом полученных формул, можно определить надёжность подсистем корпоративной сети, которые функционируют параллельно в смысле надёжности или для которых применяется нагруженное резервирование: ЛВС, Сеть доступа, подсистемы ЦВК как:

$$1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^3 \sum_{\pi_{\theta_i}} \left(\prod_{j=1}^{n_i} \lambda_{ij} \int_{y_0 > y_1 > \dots > y_{n-2} > y_{n-1}} \prod_{j=1}^{n_i} (1 - F_{\theta_{ij}}(y_{i-1})) dy_0 dy_1 \dots dy_{n-1} \right) \quad (9)$$

где $i=1,2,3$ для ЛВС, Сети доступа и ЦВК, соответственно, n_i - число параллельных подсистем в каждом блоке, $F_{\theta_{ij}}(t)$ - функция распределения времени восстановления для j -ой подсистемы i -го блока, π_{θ_i} - множество монотонных путей для каждого блока.

Полученная математическая модель позволяет аналитическим путем рассчитать надёжность сложной системы (в том числе корпоративных сетей), состоящих из большого количества подсистем с различными характеристиками надёжности, восстанавливаемых в процессе эксплуатации и работающих параллельно в смысле надёжности. Формулы получены для общего случая и позволяют определить коэффициент готовности для подсистем с неэкспоненциальным временем восстановления. На основе полученных формул могут быть разработаны алгоритми-

ческие процедуры, которые позволят, не прибегая к построению сложной имитационной модели сети, оценить надёжность корпоративной сети и значительно сократить время расчётов.

Литература

1. АНАНЬЕВ А.Н. *Разработка и исследование методов расчёта надёжности корпоративных сетей региональных операторов связи*//Электросвязь. – 2002. – №10. – С.30-33.
2. АНАНЬЕВ А.Н. *Разработка и исследования математических моделей и методик расчета показателей качества функционирования корпоративных сетей региональных операторов связи*//Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: МТУСИ, 2002.
3. ВОРОНЦОВ Ю.А., КАЛИМУЛИНА Э.Ю. *Обеспечение надёжности корпоративных сетей операторов связи*//Вестник связи. – 2004. – №10.
4. ПЕРЕГУДА А.И., ТВЕРДОХЛЕБОВ Р.Е. *Математическая модель надёжности информационных систем*//Методы менеджмента качества. – 2004. – №6.
5. ЧЕРКЕСОВ Г.Н. *Надёжность аппаратно-программных комплексов*. – Спб.: Питер, 2005.
6. BARLOW R. E., PROSCHAN F. *Mathematical theory of reliability*. – SIAM, 1996.