

УДК 681.326.019.3

РАСЧЕТ БЕЗОТКАЗНОСТИ СТРУКТУРИРОВАННОЙ КАБЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Г.В. СЕЧКО, Т.Г. ТАБОЛИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 12 мая 2009

Проведен анализ методов расчета безотказности структурированной кабельной системы (СКС) при параллельном и последовательном соединении элементов в надежном смысле. При допущении равнонадежности каналов для параллельного соединения элементов предложен эффективный и простой метод расчета безотказности СКС. Метод апробирован на конкретном примере. Предлагаемая методология ориентировочного расчета надежности СКС является пригодной для инженерных расчетов.

Ключевые слова: надежность, структурированная кабельная сеть, метод расчета безотказности.

Введение

Структурированная кабельная система (СКС) — основа информационной инфраструктуры любого предприятия, позволяющая свести в единую систему множество информационных сервисов разного назначения: локальные вычислительные и телефонные сети, системы безопасности, видеонаблюдения и т.д. Именно поэтому так велика роль СКС при построении информационной системы: от того, насколько грамотно выполнена и рассчитана СКС, зависят надежность и безопасность различных операций, без которых невозможна деятельность современного предприятия.

В указаниях [1] в качестве одного из расчетов, сопутствующих проектированию локальной вычислительной сети (ЛВС), рекомендуется брать расчет безотказности СКС, которая в общем случае представляет собой набор коммутационных элементов (кабелей, разъемов, коннекторов, кроссовых панелей и шкафов) [2]. Как вести такой расчет, в [1] не говорится. И если для расчета при последовательном соединении элементов в надежном смысле методология проведения расчета известна, то для параллельного соединения элементов в литературе приводятся только сложные приближенные формулы [3, с. 114] для инженерных расчетов. Поэтому в данной статье предложен более простой метод расчета безотказности СКС для параллельного соединения элементов при некоторых реальных допущениях.

Аналитический расчет безотказности при последовательном соединении элементов ведется в порядке, описанном в [3]. Для определения показателей безотказности СКС предполагается, что закон распределения наработки до отказа всех элементов СКС простейший (экспоненциальный), и отказ любого из элементов приводит к отказу СКС в целом. Последнее условие называется последовательным соединением элементов комплекса технических средств (КТС) в надежном смысле. Оно означает, что вероятность безотказной работы $P_{\text{сумм}}$ системы с интенсивностью отказов $\lambda_{\text{сумм}}$, состоящей из N элементов, каждый i -й из которых обладает интенсивностью отказов λ_i , равна произведению таких же вероятностей P_i элементов, т.е.

$$P_{\text{сумм}} = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_i \cdot \dots \cdot P_N. \quad (1)$$

Подставляя в (1) формулы для вероятности безотказной работы при экспоненциальной модели отказа

$$P_i = \exp(-\lambda_i \cdot t), \quad P_{\text{сумм}} = \exp(-\lambda_{\text{сумм}} t), \quad (2)$$

получим

$$\exp(-\lambda_{\text{сумм}} t) = \exp(-\lambda_i t). \quad (3)$$

Выражение (3) легко преобразуется к виду

$$\lambda_{\text{сумм}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i. \quad (4)$$

Для учета влияния условий эксплуатации (4) дополняют к виду

$$\lambda_{\text{сумм}} = \sum_{i=1}^N \lambda_i K_{\text{э}i}. \quad (5)$$

При этом в (5) $K_{\text{э}i}$ — коэффициент эксплуатации, зависящий от параметров эксплуатации элемента. Таблицы зависимости названных коэффициентов от параметров эксплуатации, а также значения λ_i для различных элементов КТС приведены в [4]. Например, для керамических конденсаторов часть необходимой таблицы [4, с. 21] имеет следующий вид

Таблица 1. Зависимость $K_{\text{э}i}$ от температуры и электрической нагрузки

Температура, градусов Цельсия	$K_{\text{э}i}$ при $U/U_{\text{ном}}$			
	0,1	0,2	0,3	0,4
25	0,14	0,17	0,22	0,28
30	0,15	0,18	0,24	0,30

Меньшая по объему, чем в [4], таблица значений λ_i приведена в [5, с. 59–61]. Там же, на с. 62, даны коэффициенты, учитывающие не только электрическую нагрузку и влияние температуры (эффект Аррениуса), но и поправку на место установки аппаратуры (лаборатория или офис, полевые условия, борт самолета или морского судна). При расчете следует учесть и надежность паяных соединений (паек), а также обжимных соединений, которые можно принять [5, с. 59] равными для паяк $\lambda_1=10^{-8} \text{ ч}^{-1}$, а для обжимных соединений $\lambda_1=2 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Теоретическая часть

Похожим образом можно рассчитать и надежность СКС при параллельном соединении ее элементов. Параллельное соединение означает, что отказ любого из элементов не приводит к отказу СКС в целом. Отказ СКС в целом наступает только при отказе всех элементов. Это легко проиллюстрировать примером двухканальной системы обработки информации. Каждый канал — элемент системы. При отказе одного из каналов система не теряет работоспособности по второму каналу, который продолжает обрабатывать информацию. В этом случае суммарная вероятность отказа $F_{\text{сумм}}$ для системы из двух элементов, каждый из которых имеет вероятность отказа F_1 и F_2 , равна:

$$F_{\text{сумм}} = F_1 F_2. \quad (6)$$

Подставляя в (1) значения $F_{\text{сумм}}$, а также F_1 и F_2 , найденные из

$$F_1 = 1 - P_1, \dots, F_2 = 1 - P_2, \dots, F_{\text{сумм}} = 1 - P_{\text{сумм}}, \quad (7)$$

получим

$$F_{\text{сумм}} = 1 - P_{\text{сумм}} = (1 - P_1)(1 - P_2), \quad (8)$$

откуда

$$P_{\text{сумм}} = P_1 + P_2 - P_1 P_2. \quad (9)$$

Формула (1) реализует логическую операцию **И** (логическое произведение или для множеств **S1** и **S2** их пересечение **S3=S1 ∩ S2**), а формула (9) — логическую операцию **ИЛИ** (логическую сумму или объединение **S3=S1 ∪ S2**, **S1+S2** множеств). Для большинства СКС логическая схема ее в надежностном смысле имеет параллельно-последовательное соединение элементов, показанное на рис. 1.

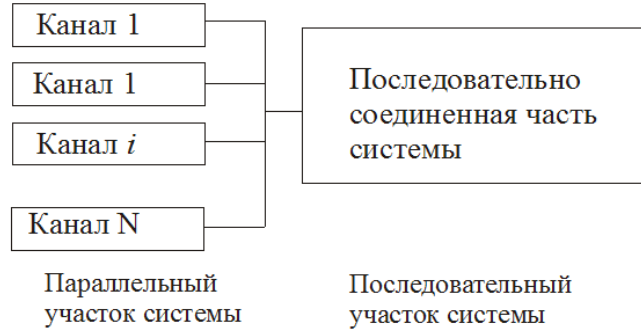


Рис. 1. Логическая схема СКС в надежностном смысле

Данная схема характерна тем, что все соединенные последовательно компоненты схемы (последовательный участок системы) объединены в последовательно соединенную часть системы, обладающую в произвольный момент времени t суммарной вероятностью безотказной работы $P_{\text{сумм}}^{\text{посл}}$ (суммарное последовательное), вероятностью отказа $F_{\text{сумм}}^{\text{посл}}$ и интенсивностью отказов $\lambda_{\text{сумм}}^{\text{посл}}$, причем

$$P_{\text{сумм}}^{\text{посл}} = 1 - F_{\text{сумм}}^{\text{посл}} = \exp(-\lambda_{\text{сумм}}^{\text{посл}} t), \quad (10)$$

а параллельные каналы системы (последовательность коммутационных и других элементов, ведущих к каждому компьютеру, (каждый канал состоит из элементов, его формирующих, за исключением компьютера, сетевой платы и соединений между ними) равнонадежны. Также каналы системы обладают в произвольный момент времени t суммарной вероятностью безотказной работы $P_{\text{сумм}}^{\text{парал}}$ (суммарное параллельное), вероятностью отказа $F_{\text{сумм}}^{\text{парал}}$ и интенсивностью отказов $\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}$, причем, как и в (10),

$$P_{\text{сумм}}^{\text{парал}} = 1 - F_{\text{сумм}}^{\text{парал}} = \exp(-\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}} t). \quad (11)$$

Как следует из (7), (8) при условии равных надежностей каналов, для параллельного участка системы (канал 1 — канал N) общая вероятность безотказной работы $P_{\text{общ}}^{\text{парал}}$ участка, обладающего интенсивностью отказов $\lambda_{\text{общ}}^{\text{парал}}$, равна:

$$P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = 1 - (1 - P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^N. \quad (12)$$

Основание степени в (12) представляет собой бином Ньютона, поэтому

$$P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = 1 - \sum_{i=0}^N (-1)^i C_N^i (P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^i, \quad (13)$$

где биномиальный коэффициент C_N^i вычисляется по формуле

$$C_N^i = \frac{N!}{i!(N-i)!}. \quad (14)$$

Подставив (14) в (13), после приведения подобных, получим

$$P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = \sum_{i=1}^{N-1} (-1)^{i+1} C_N^i (P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^i. \quad (15)$$

Значения биномиальных коэффициентов C_N^i в (13)–(15) могут быть вычислены более легко, чем по (14), с помощью треугольника Паскаля.

После подстановки биномиальных коэффициентов в (15), последняя формула примет вид:

при $N=1$

$$P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = 1 - (1 - P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^1 = P_{\text{сумм}}^{\text{парал}}; \quad (16)$$

при $N=2$

$$P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = 1 - (1 - P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^2 = 2P_{\text{сумм}}^{\text{парал}} - (P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^2; \quad (17)$$

при $N=3$

$$P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = 1 - (1 - P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^3 = 3P_{\text{сумм}}^{\text{парал}} - 3(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^2 + (P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^3; \quad (18)$$

при $N=20$

$$\begin{aligned} P_{\text{общ}}^{\text{парал}} = & 1 - (1 - P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{20} = 20P_{\text{сумм}}^{\text{парал}} - 190(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^2 + 1140(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^3 - \\ & - 4981(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^4 + 15776(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^5 - 38896(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^6 + 77520(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^7 - \\ & - 125970(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^8 + 167960(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^9 - 184756(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{10} + 167960(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{11} - \text{и т.д.} \quad (19) \\ & - 125970(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{12} + 77520(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{13} - 38896(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{14} + 15776(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{15} - \\ & - 4981(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{16} + 1140(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{17} - 190(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{18} + 20(P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{19} - (P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^{20} \end{aligned}$$

Сравнение методов расчета надежности при последовательном и параллельном соединении элементов показывает, что:

1) расчет при последовательном соединении элементов проще расчета при параллельном соединении,

2) оценка показателя безотказности, полученная в предположении последовательного соединения элементов, будет ниже, чем аналогичная при параллельном соединении, поэтому первую оценку будем считать минимальной оценкой безотказности, а вторую — максимальной;

3) выбор того или другого типа соединения элементов в надежностном смысле зависит от изложения критериев отказов в документации. Если записанным, например, в паспорт СКС, критерием отказа СКС является выход из строя любого элемента СКС (при этом СКС будет продолжать работать, но с меньшей эффективностью), то следует использовать только "Последовательное соединение элементов СКС в надежностном смысле". Если же запись критерия отказа в паспорт СКС не содержит требований по эффективности (например, работоспособной признается СКС даже с 2-мя компьютерами или каналами), то следует использовать "Параллельное соединение элементов СКС в надежностном смысле".

Для упрощения расчета при параллельном соединении заметим, что закон распределения отказов был предположен экспоненциальным, а все параллельные каналы — равнонадежными. Данное допущение можно сделать истинным, комплектуя каналы СКС при проектировании одинаковыми элементами. В этих условиях формула для расчета наработки на отказ обратно пропорциональной интенсивности отказов $\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}$ следующая:

$$M_t = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (20)$$

для экспоненциального распределения отказов примет вид

$$M t = \int_0^{\infty} P t dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (21)$$

Подставляя (16) в (20), получим при $N=2$ и обозначениях (11):

$$\frac{1}{\lambda_{\text{общ}}^{\text{парал}}} = 2 \int_0^{\infty} P_{\text{сумм}}^{\text{парал}}(t) dt - \int_0^{\infty} (P_{\text{сумм}}^{\text{парал}})^2 t dt = \frac{2}{\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}} - \frac{1}{2\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}}, \quad (22)$$

где биномиальные коэффициенты равны 2 и 1. Другой пример: при $N=3$

$$\frac{1}{\lambda_{\text{общ}}^{\text{парал}}} = 3 \int_0^{\infty} P_{\text{сумм}}^{\text{парал}}(t) dt - 3 \int_0^{\infty} P_{\text{сумм}}^{\text{парал}}(t)^2 dt + \int_0^{\infty} P_{\text{сумм}}^{\text{парал}}(t)^3 dt = \frac{3}{\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}} - \frac{3}{2\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}} + \frac{1}{3\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}}, \quad (23)$$

где биномиальные коэффициенты соответственно равны 3, -3 и 1. Алгоритм получения формул (22) и (23) ясен, поэтому получить аналогичные формулы для более высоких N не составит труда.

Расчетная часть

Рассмотрим расчет надежности СКС при последовательном соединении элементов на конкретном примере. Предположим, что структура СКС (без компьютеров и патч-кордов) выглядит так, как показано на рис. 2, где обозначены:

1) центральный коммутатор (ЦК) — восьмипортовый ЦК (активное сетевое оборудование, коммутационный шкаф в серверной), здесь и далее сведения о фактической надежности устройства берем из данных наблюдений за аналогами его во время их эксплуатации, поэтому принимаем $\lambda_{\text{ЦК}}=3 \cdot 10^{-6}\text{ч}^{-1}$; 2) раб/комм оконечный (2, 3, 5, 6, 8, 9, 11, 12) (РК2, РК3, РК5, РК6, РК8, РК9, РК11, РК12) — двадцатишестипортовый рабочий коммутатор (активное сетевое оборудование, 3Com Switch), в его линию включены последовательно сам свитч ($\lambda=1,3 \cdot 10^{-6}\text{ч}^{-1}$), двадцать пять информационных розеток RC-45 (на перспективу), один участок кабеля (от РК1/РК4, РК7, РК10/ от раб/комм оконечного до объединительного коммутатора, описанного в следующем пункте, и двадцать пять участков кабеля от раб/комм оконечного к информационным розеткам), общая интенсивность отказов при пренебрежении по причине высокой надежности розеток и кабеля будет складываться из интенсивности отказов свитча и интенсивности отказов

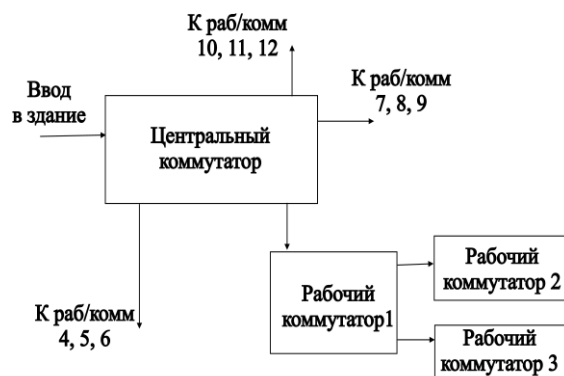


Рис. 2. Упрощенная структура СКС для расчета надежности

($\lambda_{\text{с}}=2 \cdot 10^{-8}\text{ч}^{-1}$) пятьдесят два обжимных соединения на концах двадцати шести участков кабеля и составит $1,3+0,02 \cdot 52 \cdot 10^{-6}=2,04 \cdot 10^{-6}\text{ч}^{-1}$;

3) раб/комм объединительный (1, 4, 7, 10) (РК1, РК4, РК7, РК10) — двадцатишестипортовый рабочий коммутатор (активное сетевое оборудование, 3Com Switch), содержит свитч и три участка кабеля — первый кабель соединяет каждый РК данной группы с ЦК, два оставшихся — с РК оконечными, общая интенсивность отказов по аналогии с предыдущим пунктом составит $1,3+0,02 \cdot 3 \cdot 10^{-6}=1,36 \cdot 10^{-6}\text{ч}^{-1}$. Таким образом, структура на рис. 2 имеет четыре параллельных равнонадежных канала из коммутаторов (1, 2, 3), (4, 5, 6), (7, 8, 9), (10, 11, 12), из которых на рисунке показан только первый — (1, 2, 3).

При расчете поправочными коэффициентами на условия эксплуатации в первом приближении пренебрегаем. Тогда расчет надежности СКС при последовательном соединении элементов в надежностном смысле по формуле (4) можно свести в табл. 2.

Таблица 2. Расчет надежности при последовательном соединении в надежностном смысле

Элемент	Интенсивность отказов, 10^{-6}	Число элементов	Общая интенсивность, 10^{-6}
ЦК	3	1	3
РК окончный	2,04	8	16,32
РК объединительный	1,36	4	5,44
Итого			$24,76 \cdot 10^{-6}$

Как следует из табл. 2, минимальная оценка безотказности СКС при последовательном соединении элементов в надежностном смысле равна: интенсивность отказов — $24,76 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$, средняя наработка на отказ — $1/24,76 \cdot 10^{-6} = 40\,400 \text{ ч} = 4,6$ года.

Для сравнения проведем расчет надежности СКС при параллельном соединении. Параллельно соединены РК2 и РК3, а последовательно с ними РК1. Далее имеются такие же цепочки (каналы) из РК4-РК6, РК7-РК9, РК10-РК12. Всего цепочек 4, они соединены параллельно, а последовательно с ними — ЦК.

Рассмотрим одну из 4-х цепочек: параллельное соединение РК2 и РК3 и последовательное с ними РК1. По (21) общая интенсивность $\lambda_{\text{РК2/РК3}}$ равна:

$$1/\lambda_{\text{РК2/РК3}} = (1/\lambda_{\text{РК}})(2 - 1/2) = 1,5/\lambda_{\text{РК}}. \quad (24)$$

Откуда, с учетом табл. 2,

$$\lambda_{\text{РК2/РК3}} = \lambda_{\text{РК}}/1,5 = (2,04/1,5) \cdot 10^{-6} = 1,36 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}. \quad (25)$$

Общая интенсивность отказов $\lambda_{\text{цепочки}}$ равна:

$$\lambda_{\text{цепочки}} = \lambda_{\text{РК}} + \lambda_{\text{РК2/РК3}} = (1,36 + 1,36) \cdot 10^{-6} = 2,72 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}. \quad (26)$$

Рассчитанных цепочек 4, т.е. $N=4$. Из табл. 2 или по треугольнику Паскаля находим биномиальные коэффициенты — (4, -6, 4, -1). Это означает, что для этих коэффициентов формула (23) переписывается:

$$\frac{1}{\lambda_{\text{общ}}^{\text{парал}}} = \frac{4}{\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}} - \frac{6}{2\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}} + \frac{4}{3\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}} - \frac{1}{4\lambda_{\text{сумм}}^{\text{парал}}}. \quad (27)$$

Следовательно, суммарная интенсивность отказов 4-х цепочек $\lambda_{\text{цепочек}}^{\text{сумм}}$ равна:

$$1/\lambda_{\text{цепочек}}^{\text{сумм}} = (1/\lambda_{\text{цепочки}})(4 - 3 + 4/3 - 1/4) = (1/\lambda_{\text{цепочки}})(25/12) \quad (28)$$

$$\lambda_{\text{цепочек}}^{\text{сумм}} = \lambda_{\text{цепочки}}(12/25) = (12/25) \cdot 2,72 \cdot 10^{-6} = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}. \quad (29)$$

Для СКС в целом максимальная оценка интенсивности отказов при параллельном соединении элементов в надежностном смысле равна:

$$\lambda_{\text{СК}} + \lambda_{\text{цепочки}}^{\text{сумм}} = (3 + 1,31) \cdot 10^{-6} = 4,31 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}, \quad (30)$$

а средняя наработка на отказ — $1/4,31 \cdot 10^{-6} = 232\,000 \text{ ч}$, или более чем в 5 раз выше, чем при последовательном соединении элементов в надежностном смысле.

Заключение

Вышеприведенная методология позволяет произвести примерную оценку безотказности СКС также при условии того, что каналы СКС на рис. 1 не являются равнонадежными. Для этого наработку на отказ канала с более высокой надежностью (при двух каналах для простоты)

следует считать равной наработке на отказ другого канала. Безотказность СКС в целом при этом будет занижена, зато появится возможность оценить эту заниженную безотказность по предлагаемой методике. Полученная оценка безотказности будет означать, что фактическая наработка на отказ СКС будет не ниже, а фактическая интенсивность отказов СКС не выше полученных взаимосвязанных оценок наработки на отказ и интенсивности отказов при наличии сделанного допущения о равнонадежности каналов.

Таким образом, предлагаемая методология ориентировочного расчета надежности СКС является несложной и пригодной для инженерных расчетов.

CALCULATION OF FAULTNESS OF THE STRUCTURED CABLING SYSTEM

G.V. SECHKO, T.G. TABOLICH

Abstract

An effective and simple method to calculate the faultness of structured cabling system is offered. Assuming equal reliability of channels structured cabling system faultness model is obtained for parallel connection of its elements in reliability aspect.

Литература

1. *Глецевич И.И.* Конспект лекций по курсу "Локальные вычислительные сети". Минск, 2006.
2. *Олифер В.Г., Олифер Н.А.* Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы. СПб., 2001.
3. *Козлов Б.А., Ушаков И.А.* Справочник по курсу надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М., 1975.
4. Надежность изделий электронной техники производственно-технического назначения и народного потребления: Справочник. М., 1983.
5. *Йенсен Ф., Беккер П.* Проектирование надежных электронных схем. М., 1977.