

---

---

УДК 621.316:681.3

## ВКЛАД СОСТАВЛЯЮЩИХ В НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ СМПР

© 2021 г. М. И. Успенский\*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр “Коми научный центр Уральского отделения Российской академии наук”,  
Сыктывкар, Россия*

*\*e-mail: uspensky@energy.komisc.ru*

Поступила в редакцию 12.01.2021 г.

После доработки 15.02.2021 г.

Принята к публикации 24.02.2021 г.

Наблюдение за режимами электроэнергетической системы с целью управления ими в настоящее время может осуществляться системой мониторинга переходных режимов (СМПР), выполняющей непрерывное измерение и регистрацию векторных величин режима, синхронизируемых с помощью сигналов системы единого времени. Одной из частей, входящих в СМПР, является локальная информационная сеть, надежность функционирования которой во многом определяет правильную работу СМПР. Для оценки указанной надежности ее удобно разделить на составляющие: аппаратную или техническую надежность, связанную с отказом (разрушением) элементов канала передачи или целостностью линий связи; надежность трафика, определяемую временной потерей или искажением данных без отказа элемента канала передачи; программную надежность из-за ошибок при разработке программ исполнения обмена; противостояние внешнему целенаправленному воздействию на передаваемую информацию. В данной работе основное внимание уделено оценке надежности первых трех составляющих надежности информационной сети, показана суммарная величина такой надежности, оценен вклад каждой из составляющих. Здесь не рассматривалась последняя составляющая (противостояние внешнему целенаправленному воздействию), которой в настоящее время посвящено огромное число работ.

*Ключевые слова:* система мониторинга переходных режимов, локальная информационная сеть, надежность и готовность аппаратного и программного обеспечения, готовность трафика, надежность программного обеспечения

**DOI:** 10.31857/S0002331021020138

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение за режимами электроэнергетической системы (ЭЭС) с целью управления ими в настоящее время может осуществляться системой мониторинга переходных режимов (СМПР), выполняющих непрерывное измерение и регистрацию векторных величин режима, синхронизируемые с помощью сигналов системы единого времени [1]. СМПР состоит из измерительных трансформаторов, устройств синхронизированных векторных измерений (УСВИ), концентраторов данных векторных измерений (КДВИ) и оборудования локальной информационной сети (ЛИС). Надежность функционирования СМПР определяется надежностью каждого из элементов системы мониторинга. Рассмотрим работу последнего элемента – локальной информационной сети.

Отказ сети определяется потерей терминальной связи, причем в это понятие входит не только отсутствие такой связи, но и искажение передаваемой информации. Тогда надежность сети включает четыре составляющих, а именно: 1) аппаратную или техническую надежность, связанную с отказом (разрушением) элементов канала передачи или целостностью линий связи; 2) надежность трафика, определяемую временной потерей или искажением данных без отказа элемента канала передачи; 3) программную надежность из-за ошибок при разработке программ исполнения обмена; 4) противостояние внешнему целенаправленному воздействию на передаваемую информацию.

Здесь будет показан подход к оценке составляющих первых трех пунктов, рассмотрены алгоритм и реализация такого подхода на примере 10-узловой ЭЭС, оценены суммарная величина надежности ЛИС СМПР и доли вклада составляющих, а также отмечены некоторые особенности модели информационной сети.

## 2. АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ СЕТИ СМПР

Аппаратную часть сети СМПР составляют связи сети, электроника УСВИ и КДВИ. Поскольку работа блоков центрального процессора и коммуникационного интерфейса КДВИ при дублировании подобна работе этих элементов в УСВИ, то воспользуемся оценкой надежности этих блоков в [2], полученной из системы Марковских уравнений вероятностей состояния, с учетом разных длин основного и резервного каналов связи. Тогда готовность  $A_{зв}$  звена связи сети, состоящего из дублируемого источника информации (СМПР, КДВИ или, при необходимости, промежуточного усилителя) и линий канала связи можно определить, как

$$A_{зв} = A_{КДВИ} A_{св}, \quad (1)$$

где

$$A_{КДВИ} = \frac{\mu_{КДВИ}^2}{(\mu_{КДВИ} + \lambda_{КДВИ})^2}, \quad (2)$$

а

$$A_{св} = \frac{\mu_{ло} \mu_{лр}}{(\mu_{ло} + \lambda_{ло})(\mu_{лр} + \lambda_{лр})}. \quad (3)$$

Здесь  $A_{КДВИ}$  – готовность дублируемого источника информации;  $\lambda_{КДВИ}$  и  $\mu_{КДВИ}$  – интенсивности отказа и восстановления источника соответственно;  $A_{св}$  – готовность линии связи. Сюда же следует отнести и физическую готовность носителей информации (витой пары, оптоволокна, высокочастотного канала), каждый элемент которого характеризуется длиной  $l_i$ , удельной интенсивностью отказов основной –  $\lambda_{ло}$  и резервной –  $\lambda_{лр}$  и средним временем восстановления основной –  $r_{ло}$  и резервной –  $r_{лр}$  линий на единицу длины. Поскольку показатели надежности коммуникационных линий  $\lambda_{лин}$  и  $r_{лин}$  примерно линейно зависят от длины связи, а  $\mu_{лин} = 1/r_{лин}$ , то вероятность работоспособного состояния элемента носителя информации (готовность звена связи  $l$ ) несложно оценить, как

$$A_{зв,i} = \frac{\mu_{лин,i}}{\mu_{лин,i} + \lambda_{лин,i}} = \frac{1/(r_{лин,i} l_i)}{1/(r_{лин,i} l_i) + \lambda_{лин,i} l_i} = \frac{1}{\lambda_{лин,i} r_{лин,i} l_i^2 + 1}. \quad (4)$$

Следует заметить, что  $r_{лин}$  включает две составляющие: переменную поиска нарушения, зависящую от расстояния, и постоянную, связанную с восстановлением. Но поскольку вторая составляющая имеет небольшие значения по сравнению с первой, мы ею пренебрегаем. Следовательно, готовность коммуникационной линии обратно пропорциональна квадрату ее длины. В отличие от дублирования в электронике, где

Таблица 1. Структура кадра С.37.118-2011

Поле	Размер
Синхронизирующий байт (SYNC)	2 байта
Число байт фрейма (FRAMESIZE)	2 байта
Идентификатор PMU (IDCODE)	2 байта
Секунды отсчета (SOC)	4 байта
Доля секунды/флаг качества (FRACSEC)	4 байта
Флаг состояния (STAT)	2 байта
Векторы (PHASORS)	$8 \times n$ байт (с плавающей запятой)
Частота (FREQ)	4 байта (с плавающей запятой)
Скорость изменения частоты (DFREQ)	4 байта (с плавающей запятой)
Аналоговые данные (ANALOG)	$8 \times m$ байт (с плавающей запятой)
Цифровые данные (DIGITAL)	$2 \times l$ байт (дискретные значения)
Циклическая проверка избыточности (CHK)	2 байта

$l$  – число источников дискретной информации;  $m$  – число источников аналоговой информации;  $n$  – синхронизированные векторы (величина и фаза).

резервное устройство обычно повторяет основное, дублирование носителей информации чаще всего обеспечивается элементами различных показателей надежности. Это связано с тем, что в нормальном режиме связь обеспечивается по наикратчайшей линии в сети коммуникации, а в случае режима резервирования информация идет по оставшейся в сети связи, которая может быть существенно длиннее основной. При этом подход к решению такой задачи тот же, что и при дублировании электронных блоков (2), только с учетом разных значений  $\lambda_j$  и  $\mu_j$  для  $j$ -ой связи (3).

## 2. НАДЕЖНОСТЬ ТРАФИКА

Надежность трафика заключается в передаче информации своевременно, без потерь и искажений, связанных с загрузкой канала обмена. Потери из-за трафика связаны с недопустимой задержкой или потерей части информации по причине перегрузки канала информации, но не связаны с отказом элементов устройств этого канала, что учтено в аппаратной надежности. Следовательно, надежность трафика определяется выбором пропускной способности с учетом задержки передаваемой информации.

Кадр информации от узла генерации или линии электропередачи, формируемый каждым УСВИ, объединяет 9 измерений векторов: 3 тока и 3 напряжения (величина и фаза), 3 мощности (активная и реактивная составляющие); 2 аналоговые величины: ток и напряжение возбуждения генератора; состояние устройств синхронизированных векторных измерений и состояние коммутирующих элементов. Кроме того, пакет передачи включает частоту и скорость ее изменения, метку времени и обвязку для взаимодействия с информационной сетью в стандарте С.37.118-2011. Структура кадра с данными приведена в табл. 1.

Тогда объем информации от одного УСВИ занимает  $b_{и} = 8 \times 9 + 2 \times 8 + 2 + 2 = 92$  байта. Объем дополнительной информации на кадр одного узла (первые шесть позиций табл. 1) составляет  $b_{к} = 6 + 8 + 8 + 2 = 24$  байта. В зависимости от числа УСВИ – источников измерительной информации и передаваемых измерений в секунду объем пакета часто лежит в пределах 100–400 байт. Приблизительная пропускная способность канала в кбит/с в зависимости от числа устройств-источников и скорости выборки с учетом запаса в 10% приведена в табл. 2 [3]. При этом 1 кбит = 1024 бита.

**Таблица 2.** Требуемая пропускная способность канала, кбит/с

Измерений в секунду	Количество устройств			
	2	10	40	100
25	50	249	997	2392
50	100	499	1994	4984
100	200	997	3988	9969

Задержка информации связана как с типом канала обмена, так и с временем разгрузки его приемного буфера. Доставка пакета приемнику требует затрат времени  $T_d$ , которое, в общем случае, определяется временем распространения сигнала  $T_{pc}$ , временем передачи пакета по линии связи  $T_{пп}$  и временем ожидания пакета в очереди в узле связи  $T_{ож}$ .

$$T_d = T_{pc} + T_{пп} + T_{ож}. \quad (5)$$

Время распространения сигнала  $T_{pc}$  в большинстве систем связи определяется временем распространения электрического или оптического сигнала (электромагнитного поля). Задержка импульса в оптоволокне  $(3.5 \dots 5) \times l$  (нс) [4], а в медном проводе  $5 \times l$  (мкс) [5], где  $l$  – длина канала в км.

Время передачи пакета  $T_{пп}$  зависит от скорости передачи данных по линии связи  $v_{п}$  (кбит/с) и объема или длины пакета  $L_{п}$  (кбит)

$$T_{пп} = L_{п}/v_{п}. \quad (6)$$

Принимая, что скорость распространения зависит только от материала канала, считаем, что время передачи по каналу зависит только от длины пакета.

Основной задачей при проектировании сети передачи данных является обеспечение баланса между трафиком (потоком заявок  $\lambda$ , в нашем случае частота измерений), объемом ресурсов сети (пропускной способностью) и качеством предоставления услуги (потоком обслуживания  $\mu$ , параметр обработки запроса). При решении такой задачи рассматриваются два уровня модели взаимодействия открытых систем (ВОС): сетевой и канальный.

**Сетевой уровень.** На сетевом уровне рассматриваются маршруты пропуска трафика в сети. Для этого сеть связи удобно описать моделью графа [6] (в данном случае неориентированного), в которой узлы сети (маршрутизаторы) соответствуют вершинам графа, а линии связи дугам графа. Время передачи к узлу-приемнику – это время, которое пакет проводит в линии сети. Такое время в определенной степени случайно.

Интенсивность нагрузки на дуги графа сети  $\rho_{ij}$ , определяемая отношением интенсивности потока заявок от узла-источника информации  $i$  к интенсивности потока обслуживания узлом-приемником  $j$  ( $\lambda_i/\mu_j$ ), зависит от количества устройств и объема информации от каждого устройства. В нашем случае интенсивность потока заявок определяется частотой измерений параметров в узлах энергосистемы:  $\lambda = f_{изм} = \frac{1}{T_{изм}}$ , интенсивность потока обслуживания – величиной, обратной времени доставки пакета:  $\mu = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{L_{п}/v_{п} + T_{pc}}$ , и поскольку это время в нашем случае должно быть меньше периода заявки, то  $T_{ож} = 0$ . Иначе произойдет запланированная потеря информации. С другой стороны, электроника приемника создает дополнительную задержку  $T_{эл}$  в среднем примерно 5 мкс. Тогда

$$\rho_{ij} = \frac{L_{п}/v_{п} + T_{pc} + T_{эл}}{T_{изм}}. \quad (7)$$

**Канальный уровень.** На данном уровне требуется оценить необходимую пропускную способность линий связи между узлами сети. В общем случае, для оценки вероятности потерь может быть использована приближенная формула [7]

$$q_{ij} = \frac{1 - \rho_{ij}}{1 - \rho_{ij}^{N_j+1}} \rho_{ij}^{N_j}, \quad (8)$$

где  $N_j$  – число секций накопителя приемника  $j$ ;  $\rho_{ij}$  – интенсивность нагрузки линии  $ij$ . Отсутствие потерь при этом определится как

$$p_{ij} = 1 - q_{ij}. \quad (9)$$

Понятно, что такая оценка соответствует одной информационной линии, связывающей два узла. С учетом последовательности включения звеньев линии связи двух узлов, проходящей через промежуточные узлы, общая оценка вероятности потери информации определится как

$$Q_\Sigma = 1 - \prod_{ij} p_{ij} = 1 - \prod_{ij} (1 - q_{ij}). \quad (10)$$

### 3. ОТКАЗ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Отказ программного обеспечения (ПО) связан с его несоответствием поставленным задачам. Существует множество определений программной ошибки. Наиболее приемлемым представляется определение [8]: *Надежность ПО – есть вероятность того, что программа какой-то период времени будет работать без сбоев с учетом степени их влияния на выходные результаты.*

Частота появления ошибок из статистических данных, приведенная к 100% ошибок, дана в табл. 3, причем позиция “Неполное или ошибочное задание” раскрыта более подробно.

ПО не подвержено износу и его надежность определяется только ошибками разработки. Таким образом, со временем этот показатель должен был бы возрасти, если коррекция выявленных ошибок не вносит новые ошибки.

Для ответственных применений, к которым следует отнести ПО СМПП, к моменту поставки системы клиенту в нем может содержаться от 4 до 15 ошибок на 100 000 строк кода программы [10]. Для наглядности отметим, что число строк кода WINDOWS XP более 45 млн, программы NASA – 40 млн, ядра Linux 4.11 более 18 млн. При оценке программы СМПП в 10 млн строк кода число ошибок в начале эксплуатации программы  $E = (V/100000) \times 4 = 400$  ошибок. Тогда, используя формулу средней наработки программного обеспечения на отказ, получим

$$\lambda_{\text{ПО}} = \beta \frac{E}{V} = 0.01 \frac{400}{10^7} = 4 \times 10^{-7} \quad \text{или} \quad t_{\text{ПО}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ПО}}} = \frac{10^7}{4 \times 8760} \approx 285 \text{ лет,}$$

где  $E$  – число ошибок на программу, принятую в эксплуатацию;  $V$  – объем программы в строках кода;  $\beta$  – коэффициент сложности программы, обычно в диапазоне 0.001–0.01;  $\lambda_{\text{ПО}}$  – интенсивность отказов и  $t_{\text{ПО}}$  – наработка на отказ программного обеспечения; 8760 – число часов в году. При значении одна ошибка на 1000 строк кода, принятом для прикладных программных средств после тестирования при том же объеме строк кода  $E = 10000$  ошибок

$$\lambda_{\text{ПО}} = \beta \frac{E}{V} = 0.01 \frac{10000}{10^7} = 10^{-5} \quad \text{или} \quad t_{\text{ПО}} = \frac{1}{\lambda_{\text{ПО}}} = \frac{10^5}{8760} \approx 11.4 \text{ года}$$

или примерно один отказ в 12 лет.

Таблица 3. Частота появления некоторых типов ошибок [9]

Причина ошибки	Частота, %
Отклонение от задания	12
Пренебрежение правилами программирования	10
Ошибочная выборка данных	10
Ошибочная логика или последовательность операций	12
Ошибочные арифметические операции	9
Нехватка времени для решения	4
Неправильная обработка прерываний	4
Неправильные константы или исходные данные	3
Неточная запись	8
Неполное или ошибочное задание	28
⇓	
<i>Ошибки в числовых значениях</i>	12
<i>Недостаточные требования к точности</i>	4
<i>Ошибочные символы или знаки</i>	2
<i>Ошибки оформления</i>	15
<i>Неправильное описание аппаратуры</i>	2
<i>Неполные или неточные основы разработки</i>	52
<i>Двусмысленность требований</i>	13

#### 4. ПОРЯДОК ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ЛИС

Поскольку надежность информационной сети исследуется применительно к заданной схеме, то алгоритм исследования выглядит следующим (рис. 1).

1. Задаются исследуемая схема обмена информацией в виде связей между узлами, типом связей (проводные, оптоволоконные, высокочастотные и т.д.) и длиной звеньев связей, а также начальные условия: интенсивности отказа и восстановления источников информации  $\lambda_{ИИ}$  и  $\mu_{ИИ}$ , удельные интенсивности отказов звеньев основной и резервной линий ( $\lambda_{ло}$  и  $\lambda_{лр}$ ) и среднее время восстановления основной и резервной линий ( $r_{ло}$  и  $r_{лр}$ ) на единицу длины, задержка распространения  $T_{рс}$ , задержка в электронных устройствах  $T_{эл}$ , скорость передачи  $v_{п}$ , частота передачи  $f_{изм}$  или период измерений  $T_{изм}$ , число источников информации в каждом узле. Здесь под звеном подразумевается связь между соседними узлами.

2. Выбираются основной и резервные маршруты обмена информации между источниками и диспетчерским пунктом, причем первый обычно определяется по кратчайшему пути от источника информации до диспетчерского пункта, остальные — в зависимости от отказавшего звена связи.

3. Каждому маршруту ставится в соответствие его набор звеньев.

4. Выполняется расчет информационных нагрузок звеньев каждого маршрута в нормальном и аварийном с точки зрения отказа звеньев режиме.

5. На основе подготовленной информации вычисляются аппаратные готовности и надежность трафика маршрутов нормального и аварийного режима.

6. Рассчитываются готовности маршрутов с учетом резервирования.

7. Оценивается составляющая, учитывающая надежность разработки программного обеспечения.

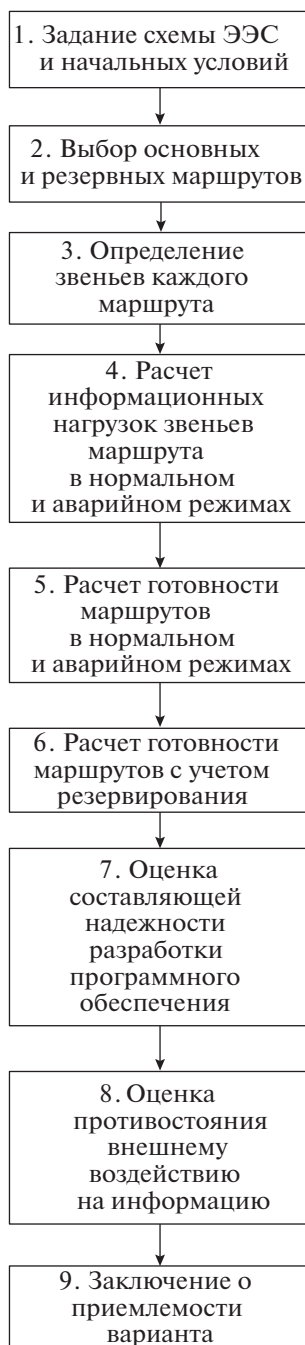


Рис. 1. Алгоритм исследования надежности информационной сети.

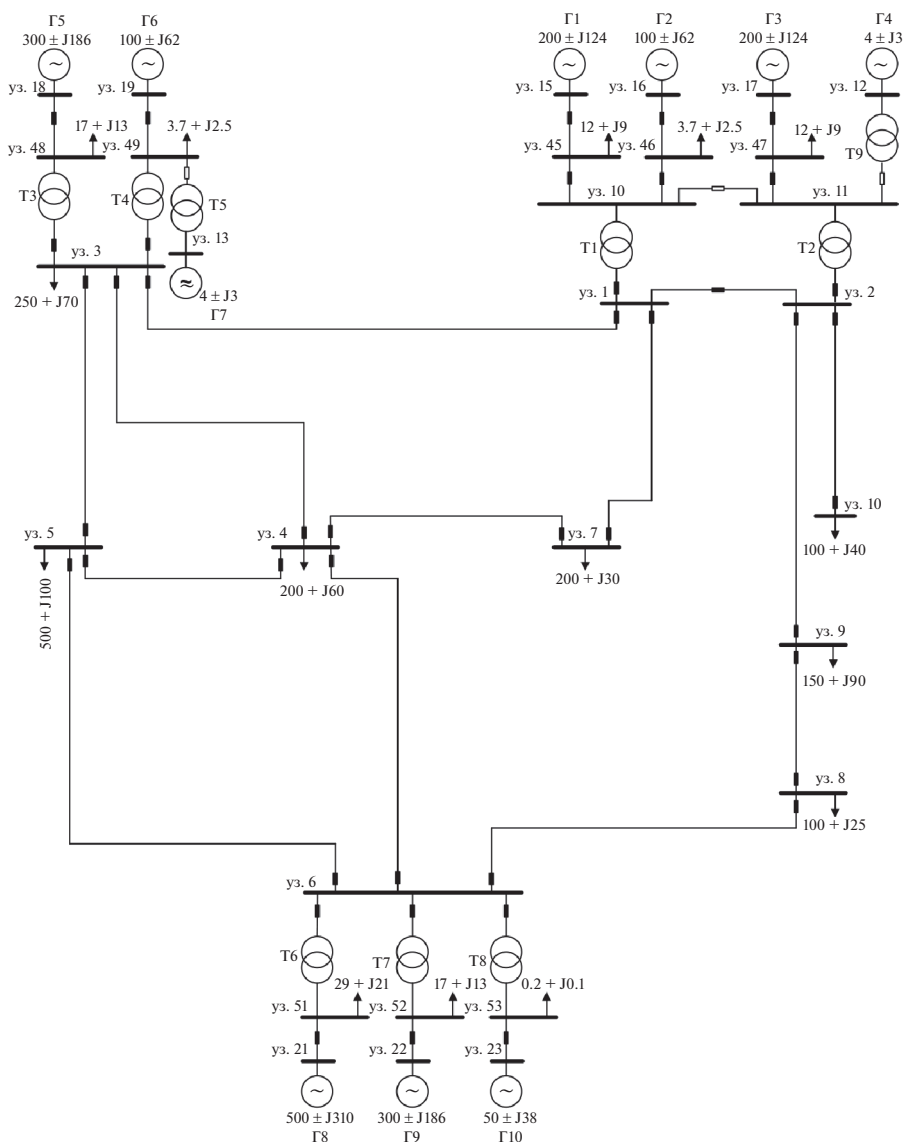


Рис. 2. Схема модели тестовой ЭЭС. Черный выключатель – включен, белый – выключен.

8. Выполняется оценка противостояния внешнему воздействию на информацию. Упомянув эту позицию, мы не останавливаемся детально на такой оценке, отсылая читателя к литературным источникам, например, [11, 12].

9. Делается заключение о приемлемости исследуемого варианта и, по необходимости, о слабых его местах.

Рассмотрим изложенный подход на примере 10-узловой ЭЭС, рассмотренной в [13], рис. 2. Не останавливаясь на оптимальном составе УСВИ, назначим их установку в каждый узел сети и выберем места для КДВИ в узлах 4 и 9. Определим основной и резервный канал обмена информацией от УСВИ каждого узла, табл. 4 и рис. 3. На рисунке 4а такие



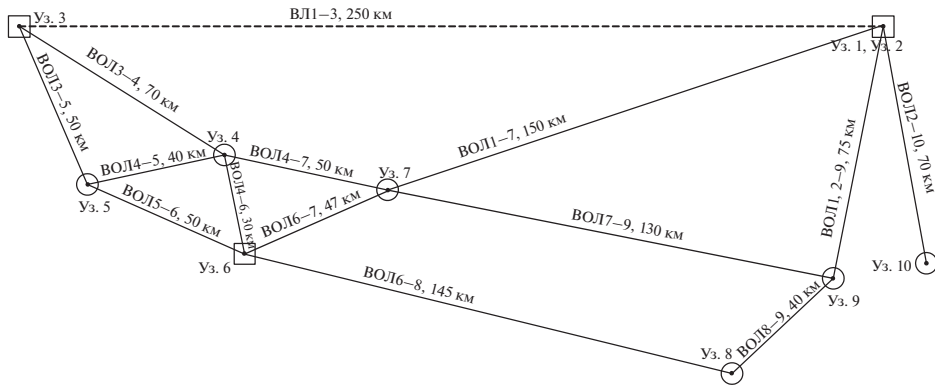


Рис. 3. Географическое расположение объектов тестовой ЭЭС. Масштаб в 1 см 16 км.

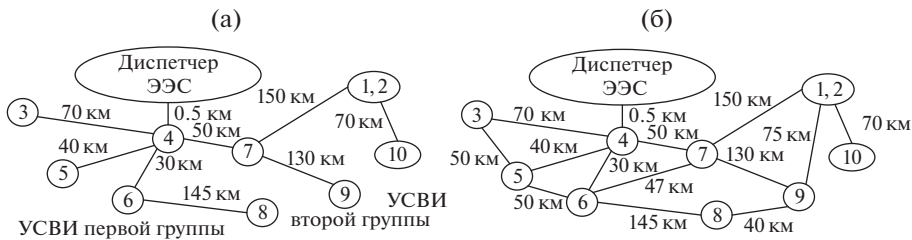


Рис. 4. Маршруты обмена информацией: (а) без резервирования; (б) с резервированием.

связи без резервирования, а на 4б – с резервированием. Для линий связи на оптоволоконне удельные показатели по табл. 12.4 из [14] и данным из [15, 16]  $\lambda_l = 0.01752$  отказ/(км год);  $r_l = 0.2088$  ч/(км восст.). Показатели надежности электронных устройств с их дублированием следующие:  $\lambda_{УСВИ} = 1.539 \times 10^{-3}$  отказ/год,  $\mu_{УСВИ} = 5.922$  восст./год,  $A_{УСВИ} = 0.999740$  [2],  $\lambda_{КДВИ} = 2.673 \times 10^{-6}$  отказ/год и  $\mu_{КДВИ} = 740$  восст./год,  $A_{КДВИ} = 0.999999996$  [14].

Таблица 4. Маршруты основных и резервных каналов обмена информацией

Узел-источ.	Основной канал	Резервный канал
1	1-7-4	1-9-8-6-4
2	2-7-4	2-9-7-4
3	3-4	3-5-4
5	5-4	5-6-4
6	6-4	6-5-4
7	7-4	7-6-4
8	8-6-4	8-9-7-4
9	9-7-4	9-8-6-4
10	10-2-7-4	—

**Таблица 5.** Готовность звеньев маршрута обмена информацией на оптоволоконне

Связь	$l$ , км	$\lambda_{\text{св}}^*$ , отк./год	$r_{\text{св}}^*$ , ч/восст.	$A_{\text{звена связи}}$	Связь	$l$ , км	$\lambda_{\text{св}}^*$ , отк./год	$r_{\text{св}}^*$ , ч/восст.	$A_{\text{звена связи}}$
1–7	150.0	2.628	31.32	0.990433883	4–6	30.0	0.5256	6.264	0.999364399
1–9	75.0	1.314	15.66	0.997397114	4–7	50.0	0.876	10.44	0.99869736
2–7	150.0	2.628	31.32	0.990433883	5–6	50.0	0.876	10.44	0.99869736
2–9	75.0	1.314	15.66	0.997397114	6–7	47.0	0.82344	9.8136	0.998818611
2–10	70.0	1.2264	14.616	0.997698469	6–8	145.0	2.5404	30.276	0.991038641
3–4	70.0	1.2264	14.616	0.997698469	7–9	130.0	2.2776	27.144	0.99273384
3–5	50.0	0.876	10.44	0.99869736	8–9	40.0	0.7008	8.352	0.99907246
4–5	40.0	0.7008	8.352	0.99907246					

**Таблица 6.** Готовность маршрутов обмена информацией на оптоволоконне

№ узла	$A_{\text{основного канала}}$	$A_{\text{резервн. канала}}$	$A_{\text{канала с резервированием}}$	№ узла	$A_{\text{основн. канала}}$	$A_{\text{резервн. канала}}$	$A_{\text{канала с резервированием}}$
1	0.989400945	0.987684744	0.99986947	7	0.990433883	0.998443352	0.999985109
2	0.989400945	0.989374459	0.999887379	8	0.990666305	0.991036328	0.999916336
3	0.997698469	0.998030512	0.999995467	9	0.991698503	0.99000482	0.999917025
5	0.99907246	0.998322147	0.999998444	10	0.987380523	0	0.987380523
6	0.999364399	0.998030512	0.999998748				

## 6. ТЕХНИЧЕСКАЯ ГОТОВНОСТЬ ЛИС

В таблице 5 определены готовности звеньев канала обмена информацией, в каждое из которых входит источник информации (УСВИ или КДВИ) и собственно волоконно-оптическая связь, с учетом того, что  $\mu_{\text{св}} = \frac{8760}{r_{\text{св}}}$  восст./год. Тогда готовность отдельных каналов передачи информации определится как произведение готовностей последовательных звеньев, что соответствует нерезервируемому каналу, а готовность  $i$ -го канала с резервированием определится как

$$A_{\text{к.р.}i} = 1 - (1 - A_{i,\text{осн. кан.}}) \times (1 - A_{i,\text{рез. кан.}}), \quad (11)$$

где  $A_{i,\text{осн. кан.}}$  – готовность  $i$ -го основного канала,  $A_{i,\text{рез. кан.}}$  – готовность  $i$ -го резервного канала. В таблице 6 приведены готовности отдельных каналов по схеме маршрутов (табл. 4) и готовности каналов с резервированием.

Условимся называть отдельную информационную линию “связью”, связь двух ближайших соседних узлов – “звенном”, а набор звеньев от узла-источника до диспетчерского сервера – “маршрутом”.

Из таблицы 6 видно, что при использовании единственного маршрута связи разброс его готовности лежит в диапазоне от одной до трех девяток после десятичной точки. При резервировании готовность связи поддерживается на уровне не менее трех девяток после точки даже при достаточно удаленном от диспетчерского пункта источнике, как например узлы 1 и 2. Готовность маршрута 10 составляет значение готовности основного маршрута, поскольку этот маршрут резервирования не имеет.

Для линий связи с помощью высокочастотного сигнала по линиям электропередачи (ЛЭП) удельные показатели из табл. 12.3 [14]  $\lambda_l = 0.0196$  отказ/км год;  $r_l = 0.19$  ч/км восст.

**Таблица 7.** Готовность звеньев маршрута обмена информацией по ЛЭП

Связь	$l$ , км	$\lambda_{\text{св.}}^*$ отк./год	$r_{\text{св.}}^*$ ч/восст.	$A_{\text{звена связи}}$	Связь	$l$ , км	$\lambda_{\text{св.}}^*$ отк./год	$r_{\text{св.}}^*$ ч/восст.	$A_{\text{звена связи}}$
1–7	150.0	2.94	28.5	0.990268019	4–6	30.0	0.588	5.7	0.999357643
1–9	75.0	1.47	14.25	0.997355058	4–7	50.0	0.98	9.5	0.998678619
2–7	150.0	2.94	28.5	0.990268019	5–6	50.0	0.98	9.5	0.998678619
2–9	75.0	1.47	14.25	0.997355058	6–7	47.0	0.9212	8.93	0.998802048
2–10	70.0	1.372	13.3	0.997661811	6–8	145.0	2.842	27.55	0.990883459
3–4	70.0	1.372	13.3	0.997661811	7–9	130.0	2.548	24.7	0.992608673
3–5	50.0	0.98	9.5	0.998678619	8–9	40.0	0.784	7.6	0.999060456
4–5	40.0	0.784	7.6	0.999060456					

**Таблица 8.** Готовность маршрутов обмена информацией по ЛЭП

№ узла	$A_{\text{основного канала}}$	$A_{\text{резервн. канала}}$	$A_{\text{канала с резервированием}}$	№ узла	$A_{\text{основн. канала}}$	$A_{\text{резервн. канала}}$	$A_{\text{канала с резервированием}}$
1	0.98921669	0.987469907	0.999864884	7	0.99026802	0.998420046	0.999984624
2	0.98921669	0.989189439	0.999883426	8	0.99050449	0.990880875	0.999913409
3	0.99766181	0.997999793	0.999995323	9	0.99155486	0.989831215	0.999914123
5	0.99906046	0.998296664	0.9999984	10	0.98716037	0	0.98716037
6	0.99935764	0.997999793	0.999998715				

Остальные данные те же. Тогда готовности звеньев маршрута и маршрутов обмена информацией даны в табл. 7 и 8 соответственно.

Как показывает сравнение табл. 5, 6 и 7, 8, различие в готовности между оптоволоконном и высокочастотной передачей незначительно. В последней таблице, как и для оптоволокна, готовность узла 10 определяется только основным маршрутом.

Учитывая последовательное включение звеньев основного либо резервного маршрута информации, а также параллельную работу этих маршрутов на сервер, определим интенсивность отказов –  $\lambda_{\Sigma}$  и интенсивность восстановления –  $\mu_{\Sigma}$  маршрутов обмена информацией для случая с оптоволоконном. Тогда  $\lambda_{i,\Sigma} = \sum_j \lambda_{i,j}$ , где  $i$  – основной либо резервный маршрут информации,  $j$  – элемент звеньев этого маршрута. Затем из соотношения  $A = \frac{\mu}{\mu + \lambda}$  определяем  $\mu_{i,\Sigma} = \frac{\lambda_{i,\Sigma} A_i}{1 - A_i}$  и находим  $\mu_{\Sigma} = \sum_i \mu_{i,\Sigma}$ . Далее

$\lambda_{\Sigma} = \frac{\mu_{\Sigma}(1 - A_{\text{кои}})}{A_{\text{кои}}}$ . Результирующие  $\lambda_{\Sigma}$  и  $\mu_{\Sigma}$  для оптоволокна и ЛЭП сведены в табл. 9.

При сложной сети информационных связей можно найти резервную связь от узла сервера до узла с отказавшей связью, исключая последнюю. Для этого используем алгоритм поиска сначала вглубь, а затем вширь, как предложено в работе [17]. Он позволяет с учетом отказавших связей найти резервный путь, если такой существует, либо предупредить об его отсутствии. При поиске строится колонка “Резервный канал” табл. 4, и затем производится оценка аппаратной надежности найденного пути. Эти резервные пути записываются в табл. 4 в порядке снижения надежности. Подобная операция выполняется в процессе построения сети. В реальном режиме при необходимости используется резервный канал с рабочими связями и наивысшей готовностью.

**Таблица 9.** Результирующие значения  $\lambda_{\Sigma}$  и  $\mu_{\Sigma}$  маршрутов обмена информацией

Узел-источ.	Канал оптоволокна		Канал ЛЭП	
	$\lambda_{\Sigma}$	$\mu_{\Sigma}$	$\lambda_{\Sigma}$	$\mu_{\Sigma}$
1	0.09589628	734.572164	0.109127394	807.5486398
2	0.083695895	743.08248	0.095243883	816.9324165
3	0.006031754	1330.67373	0.006854215	1465.551612
5	0.002472612	1588.79738	0.00280486	1752.642178
6	0.00203475	1625.44545	0.002306221	1794.935514
7	0.016936974	1137.37422	0.019264457	1252.864972
8	0.062884682	751.569245	0.071559069	826.33357
9	0.062221822	749.824533	0.070804518	824.418488
10	0.077536602	642.210362	0.088232547	706.0262268

### 7. УЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ТРАФИКА

Оценим информационные каналы СМПР для электроэнергетической системы рис. 2. Схема информационных связей с масштабом расстояний представлена выше на рис. 3. Определим условия и характеристики сети. Все информационные связи выполнены оптоволокном с задержкой распространения  $T_{pc} = 5$  нс. Задержка электроники  $T_{эл} = 5$  мкс. Скорость передачи  $v_{п} = 1$  Мбит/с = 1048576 бит/с [16]. Частота передачи измерений 10 Гц или  $T_{изм} = 0.1$  с. Поскольку диспетчерский центр определен в узле 4 ЭЭС, то маршруты информации в нормальном и режиме отказа одной из линий передачи информации даны в табл. 4, причем последняя графа показывает связь узла-источника с узлом 4 при отказе одной из составляющих связей обходными путями. Отметим, что отказ связи 10-2 приводит к полной потере обмена информацией с узлом 10. Исходные данные для расчетов сведены в табл. 10. Здесь в третьем и четвертом столбце  $b_{и}$  и  $b_{к}$ , значения байт, связанных непосредственно с соответствующим звеном линии, а  $\Sigma b^H$  и  $\Sigma b^a$  – группы байт, включая промежуточные пакеты, сквозные для рассматриваемой связи, как в нормальном, так и в аварийном режиме, вызванном отказом одной из линий.  $N$  определено по максимуму кадров в нормальном режиме и равно 5.

Результаты моделирования приведены в табл. 11 и 12, из которых видно, что при вычисленных нагрузках вероятность потери информации очень низкая. Зависимость вероятности потери информации от интенсивности нагрузки  $\rho$  рассмотрим на примере связи 7-4 при остальных тех же условиях. На этом же примере рассмотрим влияние числа секций накопителя  $N$ , табл. 13.

Понятно, что при  $N = 0$  вероятность потери информации равна 1, поскольку ее просто некуда принимать. С ростом  $N$  значение  $q$  довольно круто падает, обращаясь практически в ноль уже при  $N = 10$ . Также очевидно, что чем больше интенсивность нагрузки  $\rho$ , тем больше вероятность потери информации  $q$ , причем возрастание идет довольно быстро, требуя увеличения числа секций накопителя приемника  $N$ .

### 8. ОЦЕНКА ВКЛАДА СОСТАВЛЯЮЩИХ В СУММАРНУЮ НАДЕЖНОСТЬ ЛИС

Выше были определены составляющие надежности функционирования информационной сети СМПР. Здесь мы хотим определить суммарную надежность и вклад каждой из составляющих в эту сумму. Изначально возник вопрос, какой должна быть модель вклада составляющих надежности? Пусть  $R_{i, 1a}$  – аппаратная надежность основно-

Таблица 10. Исходные данные по информационной сети

Связь	$l$ , км	$b_{и}$	$b_{к}$	$\Sigma b_{и}^H$	$\Sigma b_{к}^H$	$\Sigma b_{и}^a$	$\Sigma b_{к}^a$
1–7	150	2	1	2	1	5	3
2–9	75	2	1	3	2	5	3
10–2	70	1	1	1	1	1	1
3–4	70	6	2	6	2	6	2
3–5	50	0	0	0	0	6	2
9–7	130	1	1	4	3	6	4
9–8	40	0	0	0	0	6	4
8–6	145	1	1	1	1	7	5
7–4	50	1	1	7	5	7	5
6–5	50	1	1	0	0	7	3
6–4	30	6	2	7	3	13	7
5–4	40	1	1	1	1	8	4
7–6	50	6	2	0	0	7	5
2–7	150	0	0	0	0	5	3
1–9	75	0	0	0	0	5	3

Таблица 11. Нагрузки  $\rho_{ij}$  и вероятности  $q_{ij}$  потери информации отдельной связи

Связь	$\rho_{ij}^H$	$q_{ij}^H$	$\rho_{ij}^a$	$q_{ij}^a$
1–7	0.01593	1.008E-09	0.04065	1.0643E-07
2–9	0.02477	9.099E-09	0.04064	1.0638E-07
10–2	0.00890	5.545E-11	0.00890	5.5455E-11
3–4	0.04583	1.929E-07	0.04580	1.9296E-07
3–5	–	–	0.04583	1.9289E-07
9–7	0.03363	4.154E-08	0.04949	2.8233E-07
9–8	–	–	0.04949	2.8221E-07
8–6	0.00891	5.557E-11	0.05835	6.3671E-07
7–4	0.05834	6.364E-07	0.05834	6.3645E-07
6–5	–	–	0.05468	4.6204E-07
6–4	0.05468	4.619E-07	0.10412	1.0961E-05
5–4	0.00890	5.541E-11	0.06353	9.6904E-07
7–6	–	–	0.05834	6.3644E-07
2–7	–	–	0.04065	1.0649E-07
1–9	–	–	0.04064	1.0638E-07

го  $i$ -го маршрута,  $R_{i, 2a}$  – аппаратная надежность резервного  $i$ -го маршрута,  $R_{i, 3m}$  – надежность трафика основного  $i$ -го маршрута,  $R_{i, 4m}$  – надежность трафика резервного  $i$ -го маршрута. Модель вклада может иметь одну из следующих схем (рис. 5). В схеме (а) сначала объединяются аппаратная и составляющая трафика, а затем основной и резервный маршруты. В схеме (б) – сначала аппаратная составляющая основного и резервного маршрутов, затем составляющие трафика этих же маршрутов,

Таблица 12. Вероятности потери информации маршрута

Маршрут	$Q_{\Sigma M}^H$	Маршрут	$Q_{\Sigma M}^H$
1-7-4	6.37E-07	1-9-8-6-4	1.199E-05
2-9-7-4	6.87E-07	2-7-4	7.429E-07
3-4	1.93E-07	3-5-4	1.162E-06
5-4	5.54E-11	5-6-4	1.142E-05
6-4	4.62E-07	6-5-4	1.431E-06
7-4	6.36E-07	7-6-4	1.16E-05
8-6-4	4.62E-07	8-9-7-4	1.201E-06
9-7-4	6.78E-07	9-8-6-4	1.188E-05
10-2-7-4	6.37E-07	—	—

Таблица 13. Влияние интенсивности нагрузки  $\rho$  и числа секций  $N$  на вероятность потери информации  $q$  и безошибочной работы  $p$  связи 7-4

№	$\rho$	$N$	$p$	$q$	№	$\rho$	$N$	$p$	$q$
1	0.01	0	0	1	5	0.3	7	0.9998469	0.0001531
2		1	0.99009901	0.00990099	6		10	0.999995867	4.13344E-06
3		3	0.99999901	9.9E-07	7		100	1	0
4		5	1	9.9E-11	1	0.5	0	0	1
5		7	1	9.88098E-15	2		1	0.666666667	0.333333333
6		10	1	0	3		3	0.933333333	0.066666667
7		100	1	0	4		5	0.984126984	0.015873016
1	0.058341	0	0	1	5		7	0.996078431	0.003921569
2		1	0.944874979	0.055125021	6		10	0.99951148	0.00048852
3		3	0.999813008	0.000186992	7		100	1	0
4		5	0.999999364	6.36452E-07	1	0	0	1	
5		7	0.999999998	2.16628E-09	2	0.7	1	0.588235294	0.411764706
6		10	1	4.30211E-13	3		3	0.864587446	0.135412554
7		100	1	0	4		5	0.942856074	0.057143926
1	0.1	0	0.000000000	1.000000000	5		7	0.973782312	0.026217688
2		1	0.909090909	0.090909090	6		10	0.991354799	0.008645201
3		3	0.999099909	0.000900090	7	100	1	1.11022E-16	
4		5	0.999990999	0.000009000	1	0.9999999	0	0	1
5		7	0.999999909	0.000000090	2		1	0.500000025	0.499999975
6		10	0.999999999	9.000007E-11	3		3	0.750000038	0.249999962
7		100	1.000000000	0.000000000	4		5	0.833333375	0.166666625
1	0.3	0	0	1	5		7	0.875000044	0.124999956
2		1	0.769230769	0.230769231	6		10	0.909090955	0.090909045
3		3	0.98094566	0.01905434	7		100	0.990099059	0.009900941
4		5	0.998297759	0.001702241					

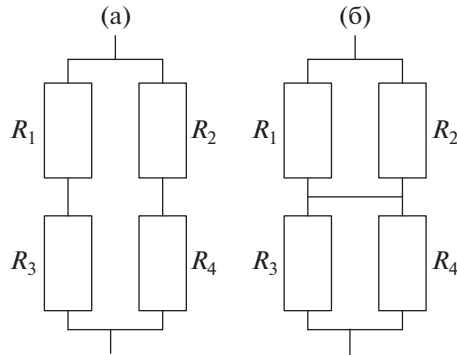


Рис. 5. Модели вклада составляющих надежности маршрута в суммарную надежность.

после чего полученные эквиваленты включаются последовательно. Эквивалентные значения определяются как

$$R_a = 1 - (1 - R_1 R_3)(1 - R_2 R_4), \tag{12}$$

$$R_b = [1 - (1 - R_1)(1 - R_2)][1 - (1 - R_3)(1 - R_4)]. \tag{13}$$

При большом отличии в значениях  $R_i$  относительная разность между эквивалентными значениями  $Q_i = 1 - R_i$  может достигать десятка процентов. Так, например, при отличии между  $R_i$  в 0.1 такая разность лежит между 39 и 49% (табл. 14).

Рассмотрим такую зависимость (табл. 15) между значениями готовностей маршрутов канала обмена информацией на оптоволокне ( $A_{\text{осн}}$  и  $A_{\text{рез}}$  из табл. 6) и вероятностей отсутствия потери информации маршрутом из-за нагрузки на трафик ( $Q_{\text{норм}}$  и  $Q_{\text{авар}}$  из табл. 12). Из таблицы 15 видно, что для тестовой схемы такая разность лежит в пределах 0.01–0.85%, т.е. менее 1%, следовательно, при оценке составляющих можно использовать любую из рассмотренных схем замещения.

Далее оценим вклад составляющих надежности в работу ЛИС. Такой вклад удобнее оценивать по неготовностям составляющих, т.е.

$$\begin{aligned} Con_{A,i} &= \frac{1 - A_{\text{канала с резерв.}i}}{Con_{\Sigma,i}} \times 100\%; \quad Con_{Q,i} = \frac{Q_{\Sigma,i}^a}{Con_{\Sigma,i}} \times 100\%; \\ Con_{\text{ПО},i} &= \frac{1}{t_{\text{ПО}} n Con_{\Sigma,i}} \times 100\%; \quad Con_{\Sigma,i} = (Con_{A,i} + Con_{Q,i} + Con_{\text{ПО},i}) \times 100\%, \end{aligned} \tag{14}$$

Таблица 14. Пример различия величин двух схем вклада составляющих надежности

$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_4$	$Q_a$	$Q_b$	$\frac{Q_b - Q_a}{Q_a} \times 100\%$
0.9	0.9	0.9	0.9	0.0199	0.0361	44.87534626
0.9	0.8	0.8	0.9	0.0396	0.0784	49.48979592
0.8	0.9	0.8	0.9	0.0396	0.0684	42.10526316
0.8	0.8	0.8	0.8	0.0784	0.1296	39.50617284

**Таблица 15.** Различие величин вклада составляющих надежности двух схем замещения

$A_{\text{осн.}}$	$A_{\text{рез.}}$	$P_{\text{норм.}}$	$P_{\text{авар.}}$	$Q_{\text{парал.}}$	$Q_{\text{посл.}}$	$\frac{Q_{\text{пс.}} - Q_{\text{пр.}}}{Q_{\text{пр.}}} \times 100\%$
0.989400945	0.987684744	0.999999363	0.99998801	0.00013053	0.000130663	0.102001899
0.989400945	0.989374459	0.999999313	0.9999992571	0.000112621	0.000112636	0.013328578
0.997698469	0.998030512	0.999999807	0.999998838	4.53284E-06	4.53589E-06	0.067205108
0.99907246	0.998322147	0.999999999	0.99998569	1.55628E-06	1.56953E-06	0.844266885
0.999364399	0.998030512	0.999999538	0.99998569	1.25181E-06	1.25363E-06	0.144945673
0.990433883	0.998443352	0.999999364	0.9999884	1.48911E-05	1.50029E-05	0.745022642
0.990666305	0.991036328	0.999999538	0.999998799	8.36642E-05	8.36794E-05	0.018178718
0.991698503	0.99000482	0.999999322	0.99998812	8.2975E-05	8.30793E-05	0.125610524
0.987380523	0	0.999999363	0	0.012620106	0.012620106	0

**Таблица 16.** Данные к расчету вклада составляющих

Узел-источ.	$A_{\text{канала с резерв. } i}$	$Q_{\Sigma, i}^a$	$\frac{1}{t_{\text{ПО}} n}$
1	0.99986947	1.199E-05	1/285/10 = 3.5087719E-04
2	0.999887379	7.429E-07	
3	0.999995467	1.162E-06	
5	0.999998444	1.142E-05	
6	0.999998748	1.431E-06	
7	0.990433883	1.16E-05	
8	0.990666305	1.201E-06	
9	0.991698503	1.188E-05	
10	0.987380523	6.37E-07	

где  $Con_{A, i}$  – доля технической неготовности,  $Con_{Q, i}$  – доля неготовности из-за трафика. Здесь используется  $Q_{\Sigma, i}^a$  как для неблагоприятного события.  $Con_{\text{ПО}, i}$  – доля неготовности по программному обеспечению,  $n$  – число узлов-источников информации. Здесь мы исходим из предположения, что программное обеспечение разделено поровну между устройствами узлов, т.е. в нашем случае  $n = 10$ .  $Con_{\Sigma, i}$  – сумма долей составляющих неготовности. Суммарную готовность маршрута ЛИС можно определить, как

$$A_{\Sigma, i} = A_{\text{канала с резерв. } i} \left(1 - Q_{\Sigma, i}^a\right) \left(1 - \frac{1}{t_{\text{ПО}} n}\right), \quad (15)$$

Для рассматриваемой схемы исходные данные по сети на оптоволокне сведены в табл. 16. Результаты расчетов приведены в табл. 17.

Из последней таблицы видно, что чем дальше узел-источник расположен от диспетчерского узла, тем больший вес имеет составляющая аппаратной надежности. С другой стороны, чем ближе источник к диспетчерскому центру, тем тяжелее трафик, что приводит к выравниванию суммарной готовности маршрута.



Таблица 17. Результаты расчета вклада составляющих

Узел-источ.	$Con_{A,i}$ , %	$Con_{Q,i}$ , %	$Con_{ПО,i}$ , %	$Con_{\Sigma,i}$ , %	$A_{\Sigma,i}$
1	73.49342727	6.750832704	19.75574003	0.01776077	0.999822399
2	75.86377335	0.500432399	23.63579425	0.01484516	0.999851552
3	11.11500184	2.849246004	86.03575216	0.00407827	0.999959217
5	3.237369106	23.76012545	73.00250545	0.00480637	0.999951937
6	3.31473698	3.788649056	92.89661396	0.00377707	0.999962229
7	24.18205538	18.83767661	56.98026802	0.00615787	0.999938422
8	69.74748092	1.001227823	29.25129126	0.01199527	0.99988005
9	63.85505894	9.14248991	27.00245115	0.01299427	0.999870062
10	99.71770723	0.005033503	0.277259265	1.26552017	0.987345249

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Правильность функционирования локальной информационной сети СМНР обеспечивается четырьмя составляющими надежности ее работы: аппаратной или технической надежностью, связанной с отказом элементов канала передачи, или целостностью линий передачи информации, программной надежностью из-за ошибок при разработке программ исполнения обмена, надежностью трафика, определяемой временной потерей или искажением данных без отказа элементов канала передачи, и противостоянием внешнему целенаправленному воздействию на передаваемую информацию. Влияние последней составляющей посвящен целый ряд работ, например, [11, 12], и здесь не рассматривалось.

Удобная алгоритмизация выполнения оценки составляющих надежности функционирования локальной информационной сети упрощает реализацию компьютерных приложений оценки.

Аппаратная надежность такой сети во многом зависит от надежности носителей информации (оптоволокно, радиоволны и т.п.) и устройств, обеспечивающих их работу, — концентраторов данных векторных измерений (КДВИ). В работе предложен подход к определению параметров такой надежности на примере 10-узловой ЭЭС. Так, при правильной организации резервирования аппаратная готовность сети, включая источники информации (УСВИ), превышает три девятки после десятичной точки для оптоволокна и незначительно меньше при обмене по ЛЭП. Рассмотрены пути повышения аппаратной надежности информационной сети.

Составляющая надежности по трафику определяется интенсивностью нагрузки каждой связи и возможностями приема информации, связанными с объемом накопителя приемника. Здесь следует отметить достаточно сильную зависимость вероятности потерь информации от числа секций накопителя приемника, увеличение которых позволяет компенсировать в некотором диапазоне рост этой вероятности с ростом интенсивности нагрузки. Готовность тестовой сети по трафику также превысила три девятки.

В плане ПО отмечено влияние объема строк кода на величину этого параметра и показана его оценка в зависимости от числа команд. Важное свойство этого показателя — его улучшение с ростом времени эксплуатации. Однако, оно может быть скорректировано из-за внесения новых ошибок при исправлении выявленных в эксплуатации. Так, для примера, программы СМНР в 10 млн строк кода среднее время работы на отказ должно составить 285 лет.

Выявлено, что несмотря на различные результаты отличающихся схем эквивалентирования, погрешность их расчетов для диапазона требований к их значениям лежит в допустимых пределах.

Для тестовой схемы оценен вклад рассматриваемых составляющих в суммарную надежность. Показано, что чем дальше узел-источник расположен от диспетчерского узла, тем больший вес имеет составляющая аппаратной надежности. С другой стороны, чем ближе источник к диспетчерскому центру, тем тяжелее трафик, что приводит к выравниванию суммарной готовности различных маршрутов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Phadke A.G., Thorp J.S.* Synchronized Phasor Measurements and Their Applications, Springer, New York, NY, 2008. 260 p.
2. *Успенский М.И.* Оценка надежности функционирования устройства синхронизированных векторных измерений // Релейная защита и автоматизация. 2017. № 3. С. 39–44.
3. Real-Time Application of Synchrophasors for Improving Reliability 10/18/2010. Доступно в [www.naspi.org](http://www.naspi.org)
4. *Чуканов В.Н., Яковлев М.Я.* Волоконно-оптическая техника. Практическое руководство. М.: Инфра-Инженерия, 2014. 304 с.
5. *Давыдов А.Е., Смирнов П.И., Парамонов А.И.* Проектирование телекоммуникационных систем и сетей. Расчет параметров сетей связи и анализ трафика. СПб: Университет ИТМО, 2016. 47 с.
6. *Асанов М.О., Баранский В.А., Расин В.В.* Дискретная математика: графы, матроиды, алгоритмы. М. “РХД”, 2001. 288 с.
7. *Зелигер Н.Б., Чугреев О.С., Яновский Г.Г.* Проектирование сетей и систем передачи дискретных сообщений. М.: “Радио и связь”, 1984. С. 177.
8. *Морозов Ю.М.* Надежность аппаратно-программных комплексов. СПб, 2011. 136 с.
9. *Шкляр В.Н.* Надежность систем управления. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 126 с.
10. *Чуканов В.О., Гуров В.В., Прокопьева Е.В.* Методы обеспечения программно-аппаратной надежности вычислительных систем // Презентация доклада на семинаре. 44 с. Доступно в [www.mcst.ru/files/5357ec/dd0cd8/50af39/000000/seminar\\_metody\\_obespecheniya\\_apparatno-pro-rammnoy\\_nadezhnosti\\_vychislitelnyh\\_sistem.pdf](http://www.mcst.ru/files/5357ec/dd0cd8/50af39/000000/seminar_metody_obespecheniya_apparatno-pro-rammnoy_nadezhnosti_vychislitelnyh_sistem.pdf)
11. *Zhang Y. et al.* Cyber Physical Security Analytics for Transactive Energy Systems / *Y. Zhang, V.V.G. Krishnan, J. Pi, K. Kaur, A. Srivastava, A. Hahn, S. Suresh* // IEEE Trans. on Smart Grid. 2020. V. 11. № 2. P. 931–941.
12. *Martel E., Kariger R., Graf P.-A.* Cyber Resilience in the Electricity Ecosystem: Principles and Guidance for Boards. Geneva, Centre for Cybersecurity and Electricity Industry Community. 2019. 29 p. Доступно в [www3.weforum.org](http://www3.weforum.org)
13. *Успенский М.И., Зарубин Ю.В.* Моделирование восстановления ЭЭС после погашения с использованием искусственных нейронных сетей // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 4. С. 50–58.
14. *Li W.* Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications. Wiley-IEEE Press. New York, NY, 2005. 325 p.
15. Оценка надежности проектируемой ВОЛС (*волоконно-оптической линии связи*) // Доступно в [www.icete.ru/pegibs-567-1.html](http://www.icete.ru/pegibs-567-1.html)
16. *Гордиенко В.Н. и др.* Оптические телекоммуникационные системы. Учебник для вузов / В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев, А.Д. Моченов, Р.М. Шарафудинов. М.: Горячая линия—Телеком, 2011. 368 с.
17. *Успенский М.И., Кызродев И.В.* Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях. Сыктывкар, 2010. 122 с. (Коми научный центр УрО РАН).

## Contribution of Components to Reliability Functioning of the WAMS Information Network

M. I. Uspensky\*

ISE&EPN KSC UD RAS, Syktyvkar, Russia

\*e-mail: [uspensky@energy.komisc.ru](mailto:uspensky@energy.komisc.ru)

With the aim of controlling the power system modes can currently be carried out by a wide-area monitoring and control system (WAMS), which performs continuous measurement and registration of mode vector values and is synchronized by signals from the uniform time sys-

---

tem. One of the parts in such a system is a local information network, the reliability of which largely determines the correct operation of the WAMS. To assess the specified reliability, it is convenient to divide it into components: hardware or technical reliability associated with failure (destruction) of transmission channel elements or the integrity of communication lines, traffic reliability, determined by time loss or data distortion without failure of a transmission channel element, software reliability due to errors in the development of exchange execution programs, and opposition to external purposeful impact on the transmitted information. In this paper, the main attention is paid to the assessment of the first three reliability components of the information network, its total value is shown, and the contribution of each component is estimated. The last component (opposition to external purposeful influence), to which a huge number of works are currently devoted, was not considered here.

*Keywords:* wide-area monitoring and control system, local information network, the hardware and software reliability and availability, traffic availability