

УДК 621.31

А.В. ХАРЫБИН, О.Н. ОДАРУЩЕНКО

*Полтавский военный институт связи, Украина***МЕТОДИКА СИНТЕЗА КОМПЛЕКСНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ**

Рассмотрены подходы к решению задачи синтеза комплексного метода оценки надежности волоконно-оптической линии передачи и реализующая их методика, позволяющие значительно повысить точность результатов (показателей надежности) за счет более полного учета множества условий эксплуатации, факторов и причин нарушения работоспособности, а также способов прокладки (подвеса, задува) и конструктивных особенностей волоконно-оптических кабелей и систем передачи.

волоконно-оптическая линия передачи, волоконно-оптический кабель, надежность, методы и модели оценки, критерии профилирования

Постановка проблемы в общем виде и обзор публикаций

В составе телекоммуникационных сетей (ТКС) большинства распределенных информационно-управляющих систем (ИУС) критического применения (КрПр) используются высокоскоростные волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП). К таким ИУС предъявляются требования по надежности их функционирования в нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) соответствующие системам с высокой ($K_r = 0,999999$) и очень высокой ($K_r = 0,9999999$) готовностью [1, 2], для выполнения которых ТКС, входящие в их состав, должны иметь такую же надежность. Максимально-допустимое совокупное время неработоспособности этих сетей по различным причинам за год непрерывной работы ($T_{\Sigma \text{нераб}}$) должно составлять не более 31,5 и 3,1 секунд соответственно.

Следовательно, к ВОЛП предъявляются те же требования. Современные протяженные на десятки – тысячи километров ВОЛП достигли лишь уровня отказоустойчивых систем ($K_r = 0,9999$, $T_{\Sigma \text{нераб}} \leq 52,55$ мин), что порождает противоречие между требуемым и реальным уровнем надежности. Для обеспечения требуемого уровня надежности ВОЛП на всех этапах жизненного цикла (ЖЦ) необходимо контролировать и проводить оценку данного

свойства для прогнозирования момента и объемов технического обслуживания, что позволит уменьшить $T_{\Sigma \text{нераб}}$ и повысить готовность.

Анализ публикаций [3 – 10], посвященных вопросу оценки надежности ВОЛП и входящих в их состав элементов – волоконно-оптических систем передачи и кабелей (ВОСП и ВОК) различной конструкции, позволяет сделать следующие выводы:

– существует и продолжает развиваться множество специальных и универсальных методов (моделей) оценки надежности данных объектов, предусматривающих её поэлементное проведение, однако не учитывающих неоднородность состава и соответствующих показателей кабельных участков ВОЛП;

– отсутствует сколько-нибудь полная информация по анализу существующих методов (моделей) оценки надежности ВОЛП и их элементов;

– отсутствуют или труднодоступны международные (государственные, военные, отраслевые) стандарты и руководящие документы, регламентирующие периодичность и порядок оценки надежности ВОЛП систем КрПр (далее – ВОЛП);

– отсутствует единая методика синтеза

(выбора) методов (модели) оценки надежности конкретной ВОЛП.

Целью статьи является выработка и обоснование принципиальных подходов к оценке надежности конкретной ВОЛП КрПр и рассмотрение реализующей их методики синтеза комплексного метода оценки этого свойства, основанной на профилировании множества известных частных методов оценки надежности ВОЛП (ВОСП, ВОК).

1. Анализ существующих подходов к оценке надежности ВОЛП

Опубликованные методы (модели) оценки надежности ВОЛП [3 – 10] предполагают проведение следующих этапов (рис. 1):

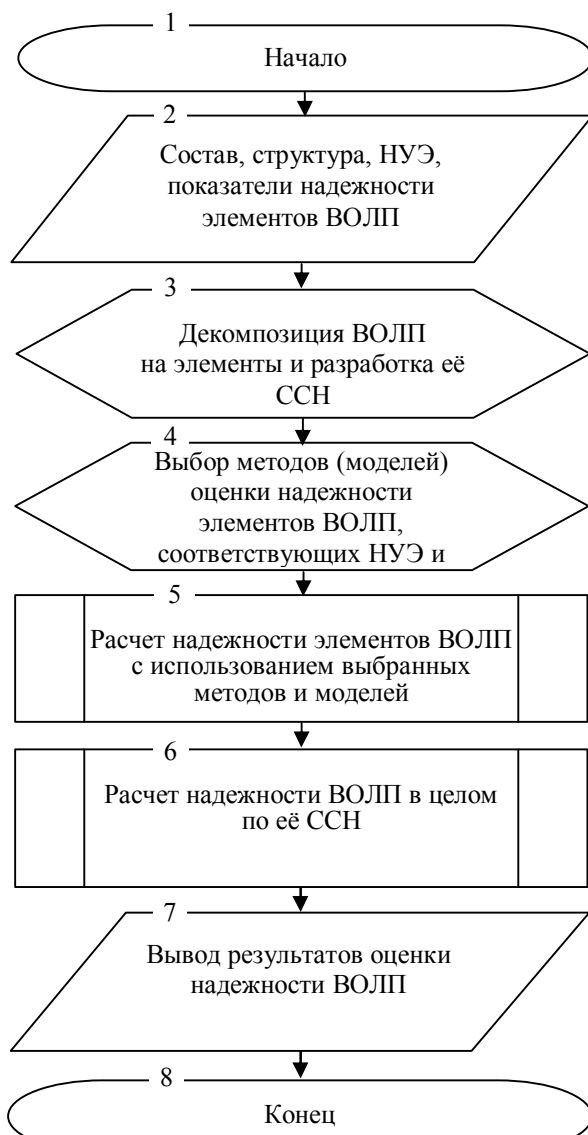


Рис. 1. Блок-схема обобщенного алгоритма оценки надежности ВОЛП существующими методами

– декомпозиция ВОЛП на элементы по структурным и функционально-аппаратным особенностям;

– разработка последовательной структурной схемы надежности (ССН) ВОЛП в целом;

– выбор из множества существующих методов (моделей) оценки надежности элементов ВОЛП тех, которые соответствуют НУЭ и требованиям к точности оценки (с учетом моделей воздействий и деградации эксплуатационных характеристик узлов с аппаратурой ВОСП и кабельных участков между ними в целом либо усредненно);

– расчет показателей надежности (ПН) элементов;

– оценка надежности ВОЛП в целом.

2. Подходы к синтезу комплексного метода оценки надежности ВОЛП

При разработке методики синтеза более точного и адекватного комплексного метода оценки надежности ВОЛП необходим учёт не только функционально-аппаратных признаков их элементов, но и неоднородности характеристик надежности отдельных участков данных элементов (прежде всего ВОК). Учитывать эти особенности предлагается на этапах декомпозиции, составления ССН, выбора методов (моделей) оценки и расчета показателей надежности ВОЛП и её элементов – ВОСП и ВОК.

Надежность ВОСП, определяется показателями надежности (ПН) функционирования её элементов – приёмо-передающей аппаратуры (ППА), коммутационно-преобразующей аппаратуры (КПА) и регенерационно-усилительной аппаратуры (РУА).

Для разработки методики синтеза нового комплексного метода оценки надежности ВОЛП необходимо решить следующие частные задачи:

– провести классификацию способов развертывания (прокладки, задува, подвеса) ВОК, выделив соответствующие конструктивные особенности, влияющие на различия в характеристиках надежности различных кабельных

участков, расширив таким образом набор категорий профилирования методов (моделей) оценки надежности ВОЛП (ВОК) и повысив полноту (адекватность) оценки;

- разработать (модифицировать) порядок профилирования методов (моделей) оценки надежности ВОЛП (ВОК) с учетом ранее известных и введенных в результате решения первой задачи категорий;

- провести алгоритмизацию процедуры синтеза комплексного метода оценки надежности ВОЛП КрПр на основе предложенной процедуры профилирования математических методов (моделей) оценки надежности ВОЛП в целом.

3. Классификация ВОК по способам прокладки и конструктивным типам

Кабели являются определяющими с точки зрения готовности любой кабельной линии передачи (в том числе и ВОЛП) в силу своей протяженности и труднодоступности для восстановления работоспособности. Способность ВОК в НУЭ противостоять факторам, приводящим к нарушению его работоспособности, характеризуется их надежностью. Качественные характеристики ВОК, в первую очередь, зависят от их конструктивного исполнения, неразрывно связанного со способами прокладки [3, 5 – 11]. Поэтому при профилировании методов (моделей) оценки надежности и проведении декомпозиции оцениваемой ВОЛП на элементы и участки необходимо учитывать указанную группу особенностей (критериев).

В результате анализа публикаций [3, 5 – 10] можно сделать вывод о применении способов прокладки (подвеса, задува) ВОК, представленных на рис. 2.

В соответствии с указанными способами прокладки разные ВОК имеют существенные конструктивные особенности выполнения, определяющие значения их показателей надежности (безотказности, долговечности, ремонтпригодности). Классификация ВОК по

конструктивным особенностям приведена на рис. 3.

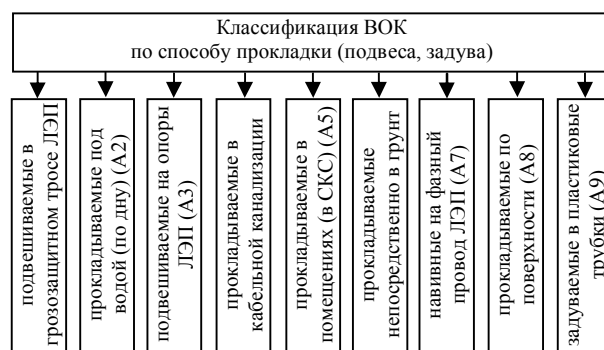


Рис. 2. Классификация ВОК по способу прокладки

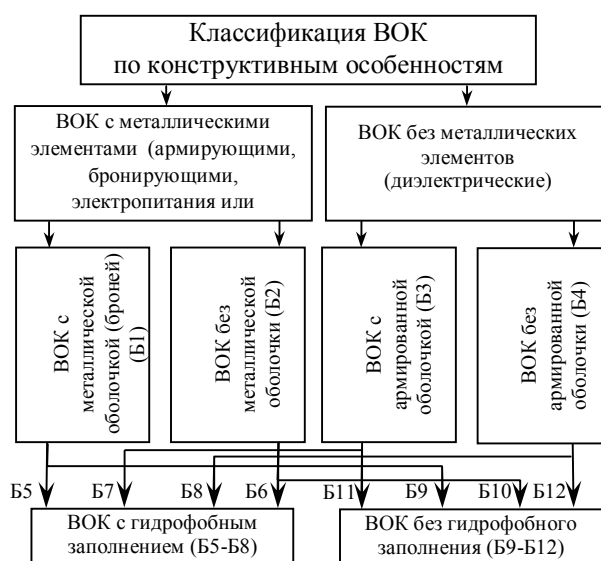


Рис. 3. Классификация волоконно-оптических кабелей по конструктивному исполнению

В соответствии с указанной классификацией наиболее высоким уровнем надежности при равных характеристиках оптического волокна (ОВ) и оболочки обладают ВОК типа Б7 – полностью диэлектрические, армированные кевларовыми нитями и гидрофобным заполнением оболочки.

Перечисленные особенности (А1-А9 и Б1-Б12) ВОК необходимо учитывать в качестве признаков декомпозиции элементов ВОЛП (кабельных участков) на последовательно включенные «элементарные части».

Это приведет к повышению точности за счет введения дополнительных этапов оценки - построения набора ССН этих «частей» и расчета их показателей надежности.

4. Классификация причин нарушения работоспособности ВОК

К основным факторам нарушения работоспособности ВОК, а следовательно, и ВОЛП в целом, относят следующие [2, 5 – 24]:

– появление первичных микротрещин ОВ с последующим их ростом до полного разрушения (В1);

– поворот плоскости поляризации распространяющейся по ОВ световой волны (на неоднородностях или под воздействием электромагнитных полей (ЭМП) – эффекты Керра и Фарадея) (В2);

– увеличение коэффициента затухания ОВ (окисление кварцевого стекла или обжиг его поверхностных слоёв) (В3);

– уменьшение гибкости и расширяемости ОВ (испарение пластифицирующих веществ из состава ОВ и оболочки ВОК) (В4);

– плавление ОВ (В5).

Основные причины возникновения указанных факторов следующие:

Г1. Изменения в заданных технических условиях эксплуатации пределах температуры окружающей среды (воздуха, воды, грунта).

Г2. Электрические токи разрядов молний.

Г3. Механические растягивающие нагрузки в результате воздействия на кабель сил гравитации, ветра, течений, сдвига грунтов.

Г4. Дефекты ОВ при его изготовлении.

Г5. Механические нагрузки на ОВ и ошибки при сваривании (центровке) волокон на этапах прокладки (задувания, подвешивания) ВОК.

Г6. Электрические пробой оболочки под воздействием токов, наведенных ЭМП в металлических элементах ВОК, находящегося вблизи высоковольтных ЛЭП ($U \geq 110$ кВ).

Г7. Реакции механически стимулированного гидролиза при проникновении влаги внутрь ВОК.

Г8. Электрические пробой токов высоких напряжений в цепях дистанционного питания (ДП)

РУА (дуговые разряды между металлическими элементами, конструктивно расположенными внутри ВОК).

Взаимосвязь факторов и причин нарушения работоспособности ВОК отображает рис. 4.

Перечисленные особенности прокладки (А1 – А9), конструктивного исполнения (Б1 – Б12), факторы (В1 – В5) и причины нарушения работоспособности (Г1 – Г8) ВОК могут выступать критериями профилирования методов (моделей) оценки надежности на этапе выбора адекватных оцениваемым элементам ССН ВОЛП и их отдельным участкам.

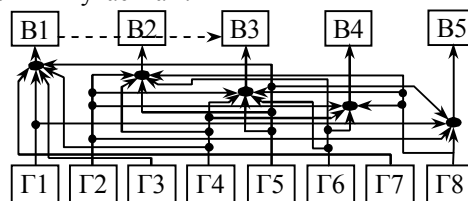


Рис. 4. Взаимосвязь факторов и причин нарушения работоспособности ВОК

5. Классификация методов и моделей оценки надежности ВОЛП и ВОК

В результате анализа множества существующих методов (моделей) оценки надежности ВОЛП и их элементов (ВОК, ВОСП) [5, 8, 10, 11, 13, 14, 16 – 21] можно условно разделить их на следующие группы:

1. Аналитические, которые учитывают:

1.1 Температурные режимы работы.

1.2 Воздействие токовых разрядов и ЭМП на ВОК с металлическими элементами, а по ним – на линейную аппаратуру ВОСП.

1.3 Механические нагрузки на ВОК.

1.4 Дефекты производства аппаратуры ВОСП и ВОК, а также ошибки при развертывании ВОК и настройке ВОСП.

1.5 Надежность систем электропитания аппаратуры.

1.6 Комбинированные.

2. Статистические, которые учитывают:

2.1 Только стационарные режимы работы ВОЛП.

2.2 Нестационарность режимов работы ВОЛП.

2.3 Изменения надежности элементов ВОЛП

при модернизации, ТО и восстановлении.

2.4 Комбинированные.

3. Имитационные, которые моделируют:

3.1 Условия внешней среды.

3.2 Ошибки обслуживающего персонала.

3.3 Внутренние процессы деградации элементов в результате их старения (исчерпания невозстанавливаемого ресурса).

3.4 Ошибки при производстве (проектировании) элементов (аппаратуры ВОСП и ВОК).

3.5 Комбинированные.

4. Комплексные:

4.1 Аналитико-статистические.

4.2 Имитационно-статистические.

4.3 Аналитико-имитационные.

4.4 Комбинированные (интеллектуальные).

6. Выбор критериев профилирования методов (моделей) оценки надежности ВОЛП (ВОСП и ВОК)

Рассмотрим основные группы критериев профилирования методов (моделей) оценки надежности ВОЛП.

Д. Этапы ЖЦ ВОЛП, на которых применяются:

Д1. Начало работ по проектированию и организации технической эксплуатации, построенной с использованием новых элементов (стратегии технического обслуживания и восстановления) с неизвестными показателями надежности (ПН) элементов или ВОЛП в целом.

Д2. Проектирование ВОЛП с полной статистической информацией по надежности их функционирования её элементов в подобных условиях.

Д3. Проектирование ВОЛП с использованием элементов, имеющих статистическую информацией о ПН функционирования в других условиях.

Д4. При уточнении (внесении изменений) проекта и тестовой эксплуатации ВОЛП.

Д5. На этапе активной эксплуатации ВОЛП.

Д6. На этапе полной либо частичной модернизации оборудования функционирующей ВОЛП.

Е. Используемые исходные данные о ВОЛП:

Е1. Структурный состав ВОЛП (ВОСП, ВОК).

Е2. Аналитически обоснованные значения показателей надежности (ПН) элементов ВОЛП (реальная статистика отсутствует).

Е3. Реальные статистические ПН элементов и участков ВОЛП либо ВОЛП в целом.

Е4. Имитационно-статистические данные о ПН элементов и участков либо ВОЛП в целом.

Ж. Используемый математический аппарат:

Ж1. Положения математической статистики (обработка данных и вычисление исходных ПН).

Ж2. Положения теории графов (создание ССН ВОЛП, отдельных элементов и участков, а также графов переходов между состояниями работоспособности и неработоспособности).

Ж3. Аппарат процессов Маркова (определение зависимостей интенсивностей отказов и восстановлений).

Ж4. Структурный анализ (аналитическое обоснование ПН элементов ВОЛП).

Ж5. Положения теории матриц (анализ графовых моделей различных процессов и автоматизация расчета ПН).

Ж6. Положения теории вероятностей (формализованное описание зависимостей ПН ВОЛП от ПН элементов ССН).

З. Уровень детализации ВОЛП и её элементов:

З1. До кабельных участков и узлов ВОСП.

З2. До однородного по составу кабельного участка (по конструктивному типу ВОК).

З3. До типа аппаратуры (ППА, КПА, РУА).

З4. До блока аппаратуры ВОСП и строительной длины ВОК.

И. Вычислительная сложность метода (модели):

И1. Низкая.

И2. Средняя.

И3. Высокая.

К. Конечные ПН ВОЛП (ВОК):

- K1. Среднее время безотказной работы – $T_{БР}$.
- K2. Среднее время восстановления работоспособности – $T_{В}$.
- K3. Коэффициент готовности – K_g .
- K4. Вероятность исправного состояния – $P_{ИС}$.

7. Профилирование существующих методов (моделей) оценки надежности ВОЛП КрПр по принятым критериям

Как показывает практика, схемное представление множественных взаимосвязей различных критериев и объектов профилирования усложняет их восприятие (пример – рис. 4). Поэтому для упрощения визуального представления (последующей формализации) процесса профилирования применяются так называемые классификационно-профилирующие таблицы (матрицы), в первом столбце которых указываются критерии профилирования, а в первой строке – множество профилируемых методов (моделей) оценки надежности. При этом, если i -й метод (модель) удовлетворяет j -у критерию профилирования, то ячейка, находящаяся на пересечении соответствующих им j -й строки и i -го столбца, помечается соответствующим символом (штрихованием, закрашиванием), а в противном случае – ячейка оставляется пустой.

В результате проведенного анализа (разделы 3 – 6 данной статьи) была сформирована классификационно-профилирующая таблица методов (моделей) оценки надежности ВОЛП (ВОК) (табл. 1).

8. Методика синтеза комплексного метода оценки надежности ВОЛП

Рассмотрим поэтапно предлагаемую методику синтеза комплексного метода оценки надежности ВОЛП КрПр, указывая отличительные особенности получаемой таким образом процедуры оценки с уже существующими, рассмотренными в разделе 1.

1. Декомпозиция ВОЛП. Введен предварительный этап выделения участков ВОЛП,

имеющих резервные элементы (комплекты ППА, РУА и ВОК между ними). Далее проводится обычная декомпозиция ВОЛП и полученных в результате проведения предварительной декомпозиции резервируемых участков на отдельные, последовательно соединенные между собой, элементы (полукомплекты ППА, комплекты РУА и КПА, участки ВОК между ними) по функционально-аппаратным признакам. Далее введен этап декомпозиции участков ВОК по конструктивным особенностям кабелей, применение конкретных типов которых зависит от способов их прокладки.

Введенные этапы проводятся лишь при наличии соответствующих признаков структурной либо типовой неоднородности ВОЛП и её участков.

2. Создание обобщенной ССН ВОЛП в целом с полным учетом уровней проведенной декомпозиции. Для этого проводится разработка множества последовательных и/или последовательно-параллельных ССН отдельных элементов и участков ВОЛП (в т.ч. кабельных).

3. Профилирование максимально полного множества известных методов и моделей оценки для каждого из элементов полученной ССН с точки зрения их адекватности особенностям оцениваемых объектов, условиям функционирования и общим требованиям к оценке надежности ВОЛП.

4. Расчет (уточнение) показателей надежности всех элементарных (однородных) участков и элементов, входящих в множество ССН отдельных элементов и участков ВОЛП, с учетом методов (моделей) оценки применимых к ним по результатам профилирования.

5. Оценка надежности ВОЛП в целом по её обобщенной ССН (согласно теории вероятностей).

Алгоритмизация данной методики и реализация в виде программного инструментария (части информационной технологии) выходит за рамки данной статьи. Предусмотрена возможность учета иных особенностей ВОЛП и их элементов, влияющих на уровень надежности данных объектов,

Выводы

1. Надежность ВОЛП во многом определяется соответствующими свойствами ППА, КПА и РУА ВОЛП, а также ВОК, используемых в них. Вопросы надежности ВОК остаются наименее изученными ввиду относительно непродолжительного периода их эксплуатации (не превышающего 15 – 18 лет) и отсутствия возможности описания всех процессов протекающих в них с течением времени и под влиянием множества различных внешних факторов.

2. Результаты проведенного анализа существующих и предлагаемых методологических подходов к оценке надежности ВОЛП представлены в виде классификационно-профилирующей таблицы соответствующих методов (моделей) (1.1 – 4.4), которая позволяет обоснованно определить их взаимосвязь с критериями профилирования (А.1 – К.4).

Данная классификационно-профилирующая таблица не является абсолютно полной и законченной, с точки зрения критериев профилирования, а также перечня методов (моделей) оценки надежности ВОЛП и их отдельных элементов. Для неучтенных методов оценки указанных свойств, а также особенностей той или иной ВОЛП (ВОСП, ВОК) целесообразно производить подобное профилирование, расширяя и уточняя классификационно-профилирующую таблицу.

3. Предложена методика синтеза комплексного метода оценки надежности ВОЛП, основанная на обоснованном выборе методов (моделей) оценки надежности ВОЛП по созданному перечню критериев профилирования (расширяемому). Данная методика может быть использована при создании информационной технологии поддержки принятия решения по обеспечению заданного уровня надежности ВОЛП и/или ИУС (ТКС) КрПр в целом.

4. В дальнейшей работе целесообразно провести оценку эффективности предложенной методики синтеза, а также получаемых с её помощью

комплексных методов оценки надежности ВОЛП КрПр.

Литература

1. Economics of High Availability for Telecommunications Systems. – Washington: Intel, 2001. – 16 p.

2. MIL-STD-790F. Established reliability and high reliability qualified products list (QPL) systems for electrical, electronic, and fiber optic parts specifications. Revision F. – US: DoD, 2001. – 17 p.

3. Li L., Somani A.K. A new analytical model for multi-fiber WDM networks // Proceedings of IEEE Globecom'99. – Rio de Janeiro-NY: IEEE Press, 1999.

4. Mitsubishi semiconductor reliability handbook – Tokyo: Mitsubishi electronics, 1999. – 154 p.

5. Хволес Е.А., Ходатай В.Г., Шмалько А.В. Волоконно-оптические линии связи и проблемы их надежности // “ВКСС. Connect!” – 2001. – № 3. – С. 49-58.

6. Ксенофонов С.Н. Методика оценки надежности оптических кабелей различных конструкций // Электросвязь. – 1995. – № 11. – С. 26-27.

7. Здоровцов И.А. Математические модели надежности волоконно-оптических линий передачи // Электросвязь. – 2004. – № 3. – С. 27-32.

8. Соколов С.А., Никольский К.К. Влияние электромагнитных полей и коррозии на оптические кабели связи // Электросвязь. – 2004. – № 3. – С. 33-34.

9. Семенова И.А., Рязанов И.Б. Защита оптических кабелей от воздействия влаги // Электросвязь. – 1999. – № 2. – С. 15-18.

10. Цым А.Ю. Оценка долговечности оптических кабелей в процессе производства и остаточного срока службы при эксплуатации // Электросвязь. – 2000. – № 8. – С. 21-24.

11. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення: [Чинний від 01.01.1996]. – К.: Держстандарт України, 1995 – 92 с.

Поступила в редакцію 3.03.2006

Рецензент: канд. техн. наук, доцент А.Ю. Стрюк, Полтавский военный институт связи, Полтава.