

Ретроанализ менеджмента эксплуатации систем электросвязи

А. И. Ициксон

Исследование посвящено определению выбора стратегий эксплуатации систем и средств электросвязи с происшедшими изменениями технологии изготовления оборудования. Существующие исследования не увязаны со старением изделий в зависимости от технологий изготовления радиоэлектронной аппаратуры. Предложена модель корреляции стратегии эксплуатации электросвязи с совершенствованием технологии. На базе методики Госстандарта выделены основные стратегии эксплуатации; на математико-экономических моделях стратегий выполнено сопоставление по критерию минимума расходов/максимума доходов. Определено изменение скорости старения. Проведен эволюционный анализ совершенствования технологии с 1960-х гг. Проведены натурные исследования скорости дрейфа (старения) параметров, определяющих работоспособность устройств и систем электросвязи для разных элементных компонентов: на базе ламповой техники, полупроводников, интегральных микросхем, работавших в 1970–1990-х годах. Выполнено сравнение стратегий эксплуатации на нынешнем уровне развития техники. Доказано, что дальнейшего изменения стратегий эксплуатации не будет. Дальнейшее совершенствование технологии изготовления будет сопровождаться количественными изменениями.

Ключевые слова: электросвязь, менеджмент эксплуатации, стратегии эксплуатации, скорости изменения параметров, критерий минимума расходов на эксплуатацию.

1. Введение

Технология эксплуатации оборудования электросвязи меняется в течение последних 60 лет. Ее изменения вызваны появлением техники принципиально нового назначения с изменением элементной базы, а также повышением надежности изделий на меняющейся элементной базе. Эффективность применения систем по назначению определяется уровнем надежности и применяемой стратегией эксплуатации (СЭ). Актуальность и значимость проблемы во всех сферах деятельности определили исследования и публикации, начиная с теоретического описания возможных вариантов математических методов в теории надежности более полувека назад в середине 1960-х [1, 2, 3] и решения широкого диапазона прикладных задач надежности для эксплуатации автоматики и автоматизированных систем управления [4], для судовой радиоэлектронной аппаратуры [5], в военном деле [6] и для ракетной техники [7]. Теоретически авторы рассматривают различные физические модели старения [8–12]. Общий подход учета старения технических изделий учтен в методике [13]. Большинство исследований являются специфичными, носят сугубо теоретический характер исходя из частных случаев оптимизации. Другой класс исследований увязывает вопросы надежности и экономики, прогнозирования изменений параметров для разной элементной базы оборудования и его эксплуатации в конкретных условиях эксплуатации изделий различного назначения [14–23]. Цель данной работы – определить тенденции изменения стратегии эксплуатации в соответствии с изменениями технологии изготовления и старения средств электросвязи.

2. Основные этапы развития технологии изготовления

В СССР радиолампы массово использовались в XX веке как активные элементы электронной аппаратуры для электросвязи (усилители, генераторы, детекторы, переключатели). «Золотая эра» ламповой схемотехники пришлась на 1935–1950 годы. Министерство промышленности средств связи выпускало устройства на радиолампах и в 1960-е годы. Первая отечественная микросхема была создана в 1961 году, серийное производство гибридных толстоплёночных интегральных микросхем – с 1965 года, заводское производство интегральных микросхем – с 1967 г. Большой ассортимент аналоговых интегральных микросхем был получен к концу 1970-х годов. Их применение позволило увеличить надёжность устройств, упростить наладку оборудования, часто даже исключить необходимость технического обслуживания в процессе эксплуатации. В 1970–1980-х годах минимальный контролируемый размер серийно производимых микросхем был уменьшен в четыре раза.

Развитие систем передачи данных на большие расстояния упиралось в фундаментальные ограничения: для электрических систем это явление затухания сигнала на определённом расстоянии, для сверхвысококачественных систем – несущая частота. Во второй половине XX века решение было найдено – оказалось, что передача сигнала с помощью света гораздо эффективнее как электрического, так и СВЧ-сигнала. Существовало две глобальных проблемы при разработке оптических систем передачи данных: источник света и носитель сигнала. Первая решилась с изобретением лазеров в 1960 году, вторая – с появлением высококачественных оптических кабелей в 1970 году. Первый в мире практически применимый светодиод разработан в 1962 году, полупроводниковый диод Ганна для генерации и преобразования колебаний в диапазоне СВЧ – в 1963 г., первый в мире жёлтый светодиод с улучшением яркости в 10 раз – в 1972 году. Светодиоды оставались чрезвычайно дорогими, их практическое применение было ограничено до 1971 г., когда было организовано массовое производство светодиодов, применимых в индикаторах. В 1976 году создан первый в мире высокоэффективный светодиод высокой яркости для передачи данных по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). В 1980-х изобретен дешёвый синий светодиод, к 1993 г. компании «Nichia» удалось начать промышленный выпуск синих светодиодов нового типа. После интенсивных исследований в период с 1975 по 1980 год появилась первая коммерческая ВОЛС, использовавшая полупроводниковый лазер на основе арсенида галлия. Скорость передачи систем первого поколения составлял 45 Мбит/с, расстояние между повторителями – 10 км. Второе поколение волоконно-оптических систем было разработано для коммерческого использования в начале 1980-х гг.; уже в 1987 году эти системы работали на скорости до 1.7 Гбит/с при расстоянии между повторителями 50 км. Прокладка первой в мире трансокеанской волоконно-оптической линии связи была завершена в 1988 году (между Японией и США), её длина составила около 10 тысяч километров; к 2003 году при применении технологии спектрального уплотнения была достигнута скорость передачи 10.92 Тбит/с. В 2013 году ученые из компании «Bell» протестировали технологию шумоподавления с передачей 400 Гбит/с по оптоволокну на 12 800 км без повторителей сигнала. В среднем внедрение лидерами индустрии новых технологий происходило примерно каждые два года.

В данной статье рассмотрены этапы с условными временными границами: первый этап: 1960–1970-е гг. – электронные лампы; второй этап: 1970–1980-е гг. – дискретные транзисторы и полупроводниковые диоды; третий этап: 1980–1990-е гг. – интегральные схемы (микросхемы) и волоконно-оптические линии связи. К 1980-м годам интегральные микросхемы благодаря своей миниатюрности, экономичности, устойчивости к механическим воздействиям и невысокой стоимости практически полностью вытеснили радиолампы из малосигнальной электроники; ВОЛС массово вытеснили медножильные линии с магистральных направлений, затем из распределительных сетей и абонентских линий связи. Последующие годы характеризовались увеличением ресурса изделий, но качественных скачков технологии изготовления или появления новых принципов, новых физических явлений для работы изделий электро-

связи не было. Краткий экскурс в историю совершенствования технологии производства показывает, что электросвязь, компьютерная техника и радиоэлектроника развивались в основном в последние 50 лет, многие виды систем связи и оборудование массового потребления появились в последние десятилетия.

3. Методология

Уровень эффективности использования изделий по назначению в значительной степени определяется уровнем надежности (поддержания заданных параметров функционирования во времени) [24] и выбранной стратегией эксплуатации. Стратегия эксплуатации – это система правил, по которым осуществляется управление их техническим состоянием, принимается решение о моменте начала и объеме операций обслуживания и ремонта всех видов, в том числе затратами на техническое обслуживание и ремонт (ТО и Р) [25]. За прошедшие годы интенсивно велись исследования по проблеме надежности, выделился ряд научных направлений. Появилось значительное количество монографий по надежности, авторы которых основное внимание уделяли углубленному рассмотрению сравнительно узкого круга задач, тогда как проблема надежности является комплексной, системотехнической. Рост значения проблемы надежности связан с особенностями развития современной техники. Во-первых, существует стремление к подробному планированию хода производственных процессов, которые становятся все более сложными. Во-вторых, все больше распространяется автоматизация различных процессов. В-третьих, автоматизированные системы выполняют все более ответственные задачи. Кроме того, современные конструкции создаются в очень короткий срок и быстро морально стареют, что затрудняет накопление навыков их проектирования, изготовления и эксплуатации. Обычно более заметны непосредственные результаты недостаточной надежности, связанные с полным или частичным невыполнением требуемых от технического объекта функций. Все это обуславливает необходимость общего подхода к снижению расходов и повышению надежности всех систем независимо от их устройства и назначения. Установилась традиция проводить инженерное исследование надежности технических объектов по данным об отказах. Постепенные отказы (параметрические, плавные) связаны с износом деталей, старением материалов и разрегулированием устройств. Параметры объекта могут достигнуть критических значений, при которых его состояние считается неработоспособным, т.е. происходит отказ. В настоящее время нет однозначного физического толкования происхождения применяемых распределений наработки до отказа. Вместе с тем во многих случаях за время эксплуатации или испытаний на надежность успевает отказать лишь незначительная часть первоначально имевшихся объектов. Поэтому значения числовых характеристик, найденные в результате обработки опытных данных, сильно зависят от типа предполагаемого распределения наработки до отказа. Выбранному теоретическому распределению наработки до отказа должна соответствовать определенная модель приближения объекта к отказу. Желательно, чтобы эта модель обобщала основные особенности физических процессов приближения к отказам. Одной из основных трудностей при исследовании вопросов надежности является ограниченность статистической информации о процессе эксплуатации объектов. Эти сведения могут быть получены путем наблюдения за работой объектов либо в условиях реальной эксплуатации, либо при испытаниях. Данные испытаний не могут полностью заменить эксплуатационные данные, а реальная эксплуатация представляет собой недостижимый по своим масштабам в лабораторных условиях эксперимент. До проведения испытаний проводятся аппроксимация имеющихся экспериментальных данных каким-либо теоретическим распределением и проверка статистической гипотезы о том, что принятое теоретическое распределение не противоречит экспериментальному распределению. При различных предположениях о виде распределения наработки до отказа значения средней наработки до отказа объектов, вычисленные по одним и тем же опытным данным, могут отличаться в сотни раз. Изложенные причины определяют целесообразность применения во многих случаях для описания процессов изна-

шивания линейных случайных процессов, все реализации которых являются прямыми линиями. При линеаризации процесса изнашивания каждая реализация этого процесса заменяется секущей прямой, т.е. рассматриваются лишь главные, линейные части монотонных случайных процессов изменения параметра. Линейные случайные процессы являются очень удобной моделью процессов изнашивания во многих задачах. Эти процессы близки к встречающимся в действительности процессам, очень просто описывают основные особенности процессов изменения параметра, требуют минимального количества экспериментальных данных для вычисления характеристик случайного процесса и дают возможность наиболее просто исследовать надежность элементов при изменении их свойств. На основании представленных критериев применительно к законам изменения параметров и показателей затрат на эксплуатацию возможно выполнить технико-экономическое сравнение стратегий. Экономическая эффективность системы зависит от соотношения прибыли и расходов на ее эксплуатацию. С прикладной точки зрения данный факт влияет на выбор оптимальной стратегии эксплуатации.

Систематизации и оптимизации моделей СЭ более полвека продолжают посвящать множество работ. Разработки стратегий восстанавливаемых изделий методически обобщены ВНИИ стандартизации описанием математико-экономических моделей в [19]. На основании представленных критериев применительно к законам изменения параметров и показателей затрат на ТО и Р возможно выполнить экономическое сравнение стратегий. Методика распространяется на «...устройства, эффект от эксплуатации которых пропорционален наработке, а обслуживание сводится к предупредительным заменам, заменам вследствие отказа и периодическим проверкам работоспособности с последующим проведением технического обслуживания, ремонта и диагностирования». Выбранный в методике критерий оптимизации – максимум эффекта на единицу затрат, необходимых для его достижения, является общим для следующих критериев оптимизации: минимум суммарных затрат и удельных затрат на эксплуатацию устройства, максимум коэффициента технического использования, максимум коэффициента готовности. В методике формализованы шесть стратегий СЭ.

Критерии оптимизации K_i стратегий эксплуатации основываются на базовых технико-экономических показателях с учетом: средних затрат на единицу времени при проведении работ по обслуживанию (предупредительной замены β_1 , технической диагностики β_2 , замены вследствие отказа β_3); средней продолжительности проведения этих работ (предупредительной замены t_1 , технической диагностики t_2 и замены вследствие отказа t_3); среднего ущерба ε_1 за единицу времени простоя (или невыполнения устройством единицы работы) и среднего ущерба ε_2 от отказа устройства; периодичности проведения предупредительных замен T_1 и проверок работоспособности устройства T_2 ; функции восстановления Ω , описываемой интегральным уравнением Вольтерра второго рода с разностным ядром [1]; t_x – средняя наработка на отказ; $\omega_{вн}$ – параметр потока внезапных отказов; ω_n – параметр потока постепенных отказов; β – относительный ресурс; α – относительная скорость изменения параметров, которая обратно пропорциональна коэффициенту вариации скорости изменения параметров (коэффициент вариации – это отношение среднеквадратического отклонения к среднему значению), $P(t)$ – вероятность безотказной работы за время t . Сравнение СЭ выполнено в [20].

1. Стратегия эксплуатации СЭ1 по мере возникновения отказов.

Критерий $K_1 = (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2) / t$.

Описание. Замены вследствие отказа, который обнаруживается мгновенно. Обслуживание при отказе – это когда ремонтные работы будут выполняться только в случае достижения критического состояния оборудования, при котором оно уже не может выполнять заданные функции, то есть теряет работоспособность. Стратегия применима для устройств, где можно допускать потерю работоспособности, аварийные ситуации, серьезные поломки с длительным устранением, в результате – излишние расходы на ликвидацию последствий и потери от останова производства. Требуется формирование завышенного резерва материальных ресурсов.

2. Стратегия предупредительных замен СЭ2 вследствие отказа без перенесения времени проведения очередной предупредительной замены. Иные наименования стратегии: по ресурсу, планово-предупредительных ремонтов (ППР).

$$\text{Критерий } K_2 = [\beta_1 + \varepsilon_1 \cdot t_1 + (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2) \cdot \Omega] / T_1.$$

Описание. Техническое обслуживание, предусмотренное в нормативно-технической или эксплуатационной документации. Выполняется с периодичностью и в объеме, независимо от технического состояния изделия в момент начала технического обслуживания. Это технология предупредительного технического обслуживания и ремонтов исходя из статистических сведений о сроках службы оборудования. Наибольшее распространение стратегия ППР получила при плановой экономике. Стратегией ППР и сегодня пользуются на многих предприятиях, прежде всего для обслуживания ключевых стратегических объектов, остановка которых может причинить вред окружающей среде, жизни и здоровью людей или стоимость отказа очень велика. Благодаря систематическому проведению техобслуживания и ремонта и своевременной замене достигается более качественная и длительная эксплуатация оборудования. Недостаток ППР – нередко ремонтируются фактически исправные объекты, а также производится обязательная замена деталей независимо от их оставшегося ресурса. В результате этого эксплуатационные затраты становятся неоправданно высоки. Сопоставление стратегий позволяет определить предельное значение периода обслуживания, когда оно экономически не выгодно, но необходимо по условиям безопасности: $K_2 = K_1$ или $T_1 = (C_{ТО} + \Omega) \cdot t$, где $C_{ТО} = (\beta_1 + \varepsilon_1 \cdot t_1) / (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2)$ – коэффициент целесообразности ППР. Граничные условия при $\alpha \rightarrow 0$ зависят от параметра потока внезапных отказов. Для экспериментально определенного диапазона $\beta \cdot \omega_{вн} \in (0..2.5)$ при $C_{ТО} \geq (0.1 \dots 0.3)$ эффективна СЭ1. Соответственно, чем меньше $C_{ТО}$, тем выгоднее стратегия СЭ2. То есть при незначительных затратах $C_{ТО}$, при уменьшении α , при уменьшении параметра потока внезапных отказов $\omega_{вн}$ экономически эффективно ТО с периодичность T_1 . При больших $C_{ТО}$, α , $\omega_{вн}$ более эффективна СЭ1 по мере возникновения отказов. При поступлении изделий в эксплуатацию существует период «приработки», в течение которого параметр потока внезапных отказов может превышать значение в период «нормальной эксплуатации» в несколько раз. Поэтому часто эффективной является СЭ по мере возникновения отказов с последующим переходом на СЭ предупредительных замен. Для выявленного диапазона $\alpha \in (0.01 \dots 1.0)$ автором описан запатентованный алгоритм нахождения периода T_1 [11].

3. Стратегия СЭ3 – частный случай стратегии СЭ2, когда выполняется перенос времени очередной предупредительной замены.

$$\text{Критерий } K_3 = (\beta_1 + \varepsilon_1 \cdot t_1) \cdot P(T_1) + (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2) \cdot [1 - P(T_1)] \cdot \int_0^{T_1} P(t) dt.$$

Описание. Стратегия характеризуется оцениванием вероятности отказов. Степень «важности» оборудования и вероятность его отказа определяют уровень риска при эксплуатации оборудования. Исходя из уровня риска, назначаются сроки и объёмы ТО и Р, расставляются приоритеты выполнения ремонтных работ. В результате повышается надёжность и безопасность, понижаются сопутствующие затраты. Стратегия направлена на минимизацию потерь от: непродуктивной работы оборудования, простоев, ненужных перемещений обслуживающего персонала, недостатков обеспечения ресурсами, повторных переделок ремонтных работ, нерационального использования ресурсов, неэффективного управления информацией. Для данной стратегии определяются наиболее эффективные мероприятия, обеспечивающие безопасность и надёжность оборудования (снижение рисков) с минимизацией сопутствующих затрат. Требование $K_2 > K_3$ практически всегда выполняется, то есть перенос времени замены всегда экономически эффективен.

4. Стратегия СЭ4 проверки и замены вследствие отказа при проверке работоспособности устройства. Иное наименование: с техническим диагностированием (ТД).

$$\text{Критерий } K_4 = [\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2 + (\beta_2 + \varepsilon_1 \cdot t_2 + \varepsilon_1 \cdot T_2) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} P(n \cdot T_2)] / (t_x - \varepsilon_1).$$

Описание. Периодическая проверка работоспособности устройства. При обнаружении отказа – замена устройства. Контроль технического состояния выполняется с установленными периодичностью и объемом, а объем остальных операций определяется техническим состоянием изделия. Техническое диагностирование всегда экономически эффективно, позволяя уточнять объем ТО и Р, но, исходя из минимума затрат, это должна быть встроенная система функционального диагностирования. При выполнении данного требования именно данная стратегия будет оптимальна для устройств и систем, обеспечивающих безопасность. При отсутствии встроенной, сравнительно дешевой, диагностики оптимальна стратегия эксплуатации по ресурсу СЭ2: $K_2 \geq K_4$ при $T_1 \gg T_2$: $\sum_{n=0}^{\infty} P(n \cdot T_2)/t_x \approx 1/T_2$, тогда $(C_{\text{ТО}} + \Omega) / T_1 - 1/t_x \geq C_{\text{ТД}} / T_2$, где $C_{\text{ТД}} = (\beta_2 + \varepsilon_1 \cdot t_2) / (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2)$ – коэффициент целесообразности ТД. Данное выражение определяет величину допустимых удельных затрат на систему технического диагностирования в зависимости от показателей надежности оборудования и уровня затрат на его плановое обслуживание. Тогда для оптимального значения периодичности ТД имеем $T_2 = C_{\text{ТД}} / (\omega_n + \omega_{\text{вн}} - 1/t_x)$.

5. Прогнозная, или проактивная, стратегия СЭ5 как усовершенствованный вариант СЭ6.
Критерий

$$K_5 = [(\beta_1 + \varepsilon_1 \cdot t_1) \cdot P(T_1) + (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_3 + \varepsilon_2) \cdot [1 - P(T_1)] + (\beta_2 + \varepsilon_1 \cdot t_2 + \varepsilon_1 \cdot T_2) \sum_{n=0}^{\infty} P(n \cdot T_2)] / \int_0^{T_1} P(t) dt - \varepsilon_1.$$

Описание. Проверки и предупредительные замены вследствие отказа. Периодическая проверка работоспособности устройства; вместе с плановой проверкой выполнять предупредительную замену, если до этого не был обнаружен отказ. При обнаружении отказа заменить устройство с перенесением времени очередной предупредительной замены. Отсчет количества проверок производится от последней предупредительной замены. Это более продвинутый подход, совмещающий преимущества планирования по текущему состоянию с преимуществами ППР. Суть проактивной стратегии – снижение скорости развития или устранение неисправности, выявленной при мониторинге технического состояния оборудования. В проактивной стратегии ключевым моментом является диагностика состояния оборудования, которая может выполняться путем: визуального осмотра, мониторинга технических параметров, акустической и вибрационной диагностики. Решение о ремонте принимается, если неудовлетворительное состояние одного элемента оборудования начинает негативно влиять на состояние других элементов. Применение проактивной стратегии увеличивает срок службы, исключает вторичные повреждения в связи с первичной поломкой путем немедленной реакции на первичную поломку, сокращает общие затраты на эксплуатацию, снижает риск аварийного отказа оборудования, повышает коэффициент исправности оборудования.

6. Стратегия по техническому состоянию СЭ6.

$$\text{Критерий } K_6 = [(\beta_1 + \varepsilon_1 \cdot t_1) \cdot P(T_1) + (\beta_3 + \varepsilon_1 \cdot t_1 + \varepsilon_2) \cdot [1 - P(T_1)] + \varepsilon_1 \cdot T_1] / \int_0^{T_1} P(t) dt - \varepsilon_1.$$

Описание. Предупредительные замены и замены вследствие отказа, замены периодически по календарному принципу. Техническое обслуживание, предусмотренное в нормативно-технической или эксплуатационной документации и выполняемое по результатам непрерывного контроля технического состояния изделия с применением диагностической аппаратуры для мониторинга оборудования в режиме реального времени. Область применения стратегии эксплуатации целесообразно отнести к объектам: отказы которых не влияют непосредственно на безопасность; надежность которых позволяет обеспечить выполнение требований по экономической эффективности; обладающим высокой эксплуатационной технологичностью; затраты на эксплуатацию которых до отказа при обслуживании с контролем уровня надежности не превышают затрат на ППР; имеющим индикацию отказов средствами контроля с минимальными трудовыми затратами в заданное время. При использовании этой стратегии благо-

даря постоянному мониторингу риск аварийного отказа или серьезного ухудшения работоспособности оборудования минимизируется. Такой подход уменьшает расходы, сводит к минимуму число непредвиденных отказов. СЭ6 по техническому состоянию эффективнее СЭ2 по ресурсу при выполнении неравенства $f(T_1) - (1/t_x - \omega_{вн}) \geq C_{гд} / T_2$.

Стратегия СЭ6 для объектов, отказы которых не влияют непосредственно на безопасность, всегда экономически уступает стратегии СЭ2, когда вместо календарного принципа планирования учитывается фактический ресурс объекта. Стратегия СЭ3 всегда эффективнее стратегии СЭ2, поскольку происходит экономия в связи с переносом времени очередного планового ТО после возникновения отказа. Таким образом, из трех стратегий СЭ6, СЭ2 и СЭ3, связанных с плановым ТО, всегда экономически эффективна стратегия СЭ3.

Возможность сопоставления СЭ согласно описанным критериям появляется для конкретной модели, описывающей изменение параметров. Эксплуатация системы описывается функцией восстановления $\Omega(t)$ или ее дифференциальной характеристикой – параметром потока отказов $\omega(t)$. Эти функции удовлетворяют интегральному уравнению Вольтерра второго порядка с разностным ядром. Для его решения необходимо конкретизировать, каким распределением описывать функцию восстановления. Расчет показателей надежности по постепенным отказам производится по данным дрейфа определяющих параметров изделия, что позволяет интегрально учитывать изменение физико-химических свойств элементарных компонентов и, соответственно, влияние функциональной структуры исследуемого изделия на показатели надежности с точки зрения физического старения элементов (постепенных отказов) при описании изменения в рамках допусков изменения параметров, определяющих работоспособность изделия.

В 1960–1970-е годы на практике для радиоэлектронной и электромеханической аппаратуры рассматривалось распределение с $\alpha > 2.5$. Теоретически для диапазона значений $\alpha \in (2...15)$ было предложено приближенное решение интегрального уравнения Вольтерра второго рода с разностным ядром [11, 12]. При этом выдвинута гипотеза распределения скорости изменения параметра по нормальному закону. Нормальный закон (закон Гаусса) широко используется при оценке надежности изделий, на надежность которых воздействует ряд случайных факторов, каждый из которых незначительно влияет на результирующий эффект (нет доминирующих факторов). В этом случае распределение скорости изменения параметров подчинено нормальному закону, а плотность характеризуется альфа-распределением. При описании параметра потока отказов альфа-распределением статистически показано, что при совершенствовании технологии производства происходит уменьшение показателя α , наиболее полно описывающего изменение параметров в условиях эксплуатации.

4. Натурные исследования старения средств и систем электросвязи

Предложена и подтверждена статистически следующая гипотеза (подтвержденная на изделиях машиностроения [11] и автоматики [12]): средняя скорость изменения параметров, определяющих работоспособность изделий, является квазипостоянной. Распределение скоростей однотипных изделий подчинено нормальному закону. Функция распределения тогда описывается альфа-распределением. Распределение характеризуется показателем α – относительной скоростью изменения параметров, который обратно пропорционален коэффициенту вариации скорости изменения параметров, и показателем β – относительным запасом долговечности – ресурсом, равным отношению значения среднего ресурса к коэффициенту вариации скорости дрейфа (изменения) параметров.

Исторически менялась элементная база, на которой построены системы электросвязи. Анализ процессов старения показал, что переход от ламповых элементов к полупроводникам, затем к микросборкам и дальнейшее совершенствование микросхем, так же как и изменение технологии производства волоконно-оптических кабелей сопровождалось снижением средней величины при увеличении дисперсии скорости старения [26]. Проверка гипотезы нормального

распределения скорости дрейфа параметров, определение средней скорости и оценка среднеквадратического отклонения осуществлялись в результате обработки данных для отдельных параметров по стандартной методике, значения полей допуска – допустимых изменений параметров взяты из стандарта [27] и технических условий на соответствующие изделия. В качестве прогнозируемых выбирались параметры, проверка и регулировка которых выполняется в соответствии с инструкциями по эксплуатации заводов-изготовителей. Методология расчета основывается на формализованном подходе [13]. Репрезентативность выборки определялась в соответствии с [28]. В результате многолетних исследований (натурного эксперимента) на репрезентативных выборках в условиях эксплуатации подтверждено, что скорость дрейфа параметров аппаратуры электросвязи квазипостоянна, ее распределение подчинено нормальному закону с большими коэффициентами вариации (малыми значениями α) [20, 26]. Для изделий электросвязи на радиолампах получено $\alpha = 0.7$ (разброс по отдельным параметрам, определяющим работоспособность изделия в целом, – от 0.3 до 1.4); переход на полупроводниковые микросхемы сопровождался снижением $\alpha \in (0.25 \dots 0.40)$ (разброс для определяющих параметров – от 0.2 до 1.0), схемная модификация оборудования – переход на аналоговые интегральные микросхемы определила дальнейшее снижение до $\alpha \in (0.01 \dots 0.06)$. Экспериментально подтверждено [26], что каждое качественное изменение технологии сопровождалось и увеличением (более трехкратного) нормированной наработки на отказ β (максимум функции восстановления уменьшается вдвое при уменьшении α от 1 до 0; время наступления максимума увеличивается с $0.5/\beta$ до $0.707/\beta$). При $\alpha \leq 1$ функция параметра потока постепенных отказов после достижения модального значения является монотонно убывающей, тогда как ранее при больших α это был апериодический затухающий процесс с приближением к квазистационарному значению потока равному α/β , причем до достижения модального значения параметр потока отказов соответствует функции плотности распределения [26].

С точки зрения теоретического описания процессов старения произошло замедление индивидуального старения; прежние подходы с эксплуатацией по ресурсу (назначение периода технического обслуживания), эксплуатацией по техническому состоянию (техническое диагностирование свободных каналов) экономически стали неэффективны. Данное утверждение относится и к собственно волоконно-оптическим линиям связи, поскольку старение оптических волокон по показателю изменения затухания показало $\alpha = 0.05$. Соответственно, экономически не обоснованы, не нужны внешние системы контроля и диагностики, необходима встроенная в сеть передачи данных система диагностики [29].

Граничное условие должно рассчитываться для систем, обеспечивающих жизнеобеспечение, или стоимость отказа которых очень велика (например, отдельные категории военной техники). При $\alpha \in (0.01 \dots 1.0)$ для существующего диапазона имеем $\beta_1, \varepsilon_1, t_1, \beta_3, t_3, \varepsilon_2$ имеем всегда выполнение условий экономического преимущества стратегии по мере возникновения отказов для устройств и систем электросвязи сетей общего пользования, не отвечающих за обеспечение безопасности стратегических объектов, остановка которых может причинить вред окружающей среде, жизни и здоровью людей. Особо отметим, что для стратегических объектов может быть определено критическое значение периодичности планового ТО для применения соответствующей стратегии [29]. Стратегии более высокого ранга – с плановым ТО и/или диагностированием – являются, естественно, экономически оправданными для объектов, которые обеспечивают дополнительный эффект, необходимый для компенсации дополнительных затрат на проведение плановых предупредительных замен и/или диагностирование.

Отметим, что внезапные отказы принципиально отличаются от постепенных по причине отсутствия контроля исходных параметров. Параметр потока внезапных отказов для неконтролируемых, непредсказуемых параметров во времени описывается, как и параметр потока постепенных отказов, альфа-распределением. При этом $\omega_{вн}$ в 15–20 раз больше ω_n для полупроводников и всего в три раза – для ламповых изделий. Физически это понятно. Ламповая

техника тем и отличалась – повторяемостью, малым разбросом параметров, переход к полупроводникам, потом – к большим интегральным схемам характеризовался большим разбросом, индивидуальным путем старения каждого изделия.

В конце 1970-х годов еще применялась ламповая техника связи, а во второй половине 1980-х уже применялось оборудование электросвязи на интегральных микросхемах. Сводные результаты исследований [26]: первый этап: 1960–1970-е гг. – электронные лампы с $\alpha \in (2 \dots 15)$; второй этап: 1970–1980-е гг. – дискретные транзисторы и полупроводниковые диоды с $\alpha \in (0.2 \dots 1.0)$, при этом относительный ресурс β увеличился втрое при переходе с ламповой на полупроводниковую основу; третий этап: 1980–1990-е гг. – интегральные схемы (микросхемы), оптические волокна волоконно-оптических линий связи с $\alpha \in (0.01 \dots 0.06)$, при этом относительный ресурс β увеличился еще втрое при переходе на интегральные микросхемы. Фактически качественная смена дважды произошла в течение 30 лет, причем изменение параметра α происходило сравнительно плавно, по мере совершенствования технологии производства РЭА различного назначения и разными изготовителями.

5. Выводы

4.1. Совершенствование технологии изготовления привело не только к существенному увеличению наработки на отказ (ресурса срока службы), но и к необходимости учета индивидуальности изделий. Это стало известно еще в период перехода от ламп к полупроводниковым приборам в 1970-е годы. Фактически это относится и к старению оптических волокон волоконно-оптических линий связи. Нельзя по контролю за одним волокном делать вывод о состоянии прочих волокон в этом же кабеле, нельзя прогнозировать состояние, старение аналогов. Поэтому нужен индивидуальный контроль, а экономически он оправдан исключительно для встроенных систем технической диагностики. Система массового технического обслуживания второй половины XX века трансформировалась в начале XXI века в систему индивидуального встроенного контроля.

4.2. Повышение надежности изделий рассматривается в комплексе с расходами на эксплуатацию. Все многообразие стратегий эксплуатации может быть формализовано и описывается в соответствующих математико-экономических моделях, сопоставимых по критерию минимума расходов/максимума доходов:

4.2.1. С точки зрения формализованного описания (модели, стратегии) для современного оборудования, систем электросвязи практически всегда экономически выигрышной является стратегия по уровню надежности по мере возникновения отказов (СЭ1 по классификации [19]).

4.2.2. Совершенствование, минимизация стоимости встроенной технической диагностики контроля параметров определило большую эффективность стратегии по техническому состоянию (без планового технического обслуживания, СЭ6 по классификации [19]) – для сложных, дорогостоящих систем электросвязи. Отдельно устанавливаемые системы технической диагностики, как правило, не окупаются, экономически не эффективны.

4.2.3. Для систем, обеспечивающих жизнеобеспечение, или особо важных систем электросвязи с очень большой стоимостью отказа (отдельные категории военной техники) существует расчетное предельное значение периодичности планового технического обслуживания. Проведение планового обслуживания экономически оправдано только в этих случаях. При плановом техническом обслуживании всегда эффективно переносить срок обслуживания в случае возникновения внезапного отказа.

4.3. При модернизации технологии производства систем электросвязи произошло два качественных скачка, приведших к увеличению ресурса изделий и увеличению индивидуального разброса скорости изменения параметров, определяющих работоспособность изделия в целом. С точки зрения теории последующие качественные изменения технологии производства не приведут к смене стратегий эксплуатации, так как показатель $\alpha \rightarrow 0$.

Литература

1. *Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д.* Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 100 с.
2. *Герцбах И. Б., Кордонский Х. Б.* Модели отказов. М.: Советское радио, 1966. 166 с.
3. *Кокс Д. Р., Смит В. А.* Теория восстановления. М.: Советское радио, 1967. 300 с.
4. *Шишонок Н. А.* Основные задачи и особенности эксплуатационно-технического обеспечения проектируемых автоматизированных систем управления // Проблемы надежности систем и средств автоматики. Киев: Техника, 1976. С. 62–68.
5. *Смирнов Ю. Г.* Прогнозирование эксплуатационно-надежностных показателей судовой радиоэлектронной аппаратуры. Л.: Судостроение, 1987. 58 с.
6. *Чуев Ю. В., Михайлов Ю. Б.* Прогнозирование в военном деле. М.: Воениздат, 1975. 179 с.
7. *Зубрилов А. П.* Техническая эксплуатация авиационного и радиоэлектронного оборудования. Рига: РКИИГА, 1978. 61 с.
8. *Белова Г. Ф., Попов В. Д., Чжо Ко Вин.* Сравнение радиационного и термического старения МОП интегральных микросхем // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2012. Вып. 2. С. 29–32.
9. *Шульгин Е. И.* Физико-математическое описание некоторых технических процессов развития постепенных отказов изделия // Надежность и контроль качества. 1981. № 12. С. 9–15.
10. *Алексян И. Т., Кривошапко В. М.* Моделирование параметрических отказов и изучение надежности интегральных схем // Электронная техника. Сер. 8. 1981. № 4. С. 52–58.
11. *Проников А. С.* Параметрическая надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
12. *Дружинин Г. В.* Надежность систем автоматики. М.: Энергия, 1967. 528 с.
13. Методика расчета надежности изделий с учетом постепенных отказов. М.: Издательство стандартов, 1976. 100 с.
14. *Левин Б. Л.* Систематизация моделей и стратегий обслуживания технических устройств // Надежность и контроль качества. 1971. № 5. С. 12–65.
15. *Барзилович Е. Ю.* Модели технического обслуживания сложных систем. М.: Высшая школа, 1982. 231 с.
16. *Вайнштейн И. И., Михальченко Г. Е., Вайнштейн Ю. В., Сафонов К. В.* О выборе стратегий эксплуатации технических систем // Вестник СибГАУ. 2015. Т. 16, № 3. С. 645–650.
17. *Ланецкий Б. Н., Лукьянчук В. В., Фоменко Д. В.* Обоснование оптимальных стратегий технического обслуживания и ремонта сложных технических систем // Системы обработки информации. Харьковский университет Воздушных сил им. И. Кожедуба. 2009. Вып. 6 (80). С. 72–74.
18. *Володарский В. А.* Принципы выбора стратегий обслуживания технических устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 2 (34). С. 110–114.
19. Методика оптимизации периодичности проведения замен технических устройств. М.: Издательство стандартов, 1975. 31 с.
20. *Ицксон А. И.* Стратегии эксплуатации устройств управления железнодорожными технологическими процессами // Устройства и системы механизации и автоматизации железных дорог. Сб. науч. тр. ВНИИЖТ / под ред. Г. И. Кравченко, А. И. Ицксона. М.: Транспорт. 1988. С. 4–12.
21. *Смирнов К. А., Ицкович А. А.* Обслуживание и ремонт авиационной техники по состоянию. М.: Транспорт, 1980. 232 с.
22. *Шехватов Д. Б.* Обслуживание по состоянию. Концепция RCM // Автоматизация в промышленности. 2012. № 9. С. 25–27.
23. *Абрамов О. В., Розенбаум А. Н., Климченко В. В.* Прогнозирование состояния и планирование эксплуатации систем ответственного назначения // Вестник ДВО РАН. 1996. № 4. С. 65–75.

24. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1990. 32 с.
25. ГОСТ 18322-78. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартиформ, 2007. 7 с.
26. *Ициксон А. И.* Исследование и оптимизация методов технического обслуживания железнодорожных радиостанций [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.22.08: защищена 26.09.89, утв. 21.03.90. Ленинград, 1989. 179 с.
27. ГОСТ 12252-86. Радиостанции с угловой модуляцией сухопутной подвижной службы. Типы, основные параметры, технические требования и методы измерений. М.: Издательство стандартов, 1986. 37 с.
28. ГОСТ 8.207-76. Государственная система обеспечения единства измерений. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения // Приложение 1. Проверка нормальности распределения результатов наблюдений группы / (составной критерий)- согласие опытного (натурного) распределения скорости дрейфа параметров с нормальным. М.: Стандартиформ. 2008. 7 с.
29. *Ициксон А. И.* Экономическая эффективность технического обслуживания радиоаппаратуры оперативного управления перевозочным процессом/ Автоматика, телемеханика и связь. 1986. № 5. С. 6–8.

*Статья поступила в редакцию 31.01.2019;
переработанный вариант – 21.03.2019.*

Ициксон Александр Исаакович

к.т.н., директор по развитию бизнеса ООО «Компания «Эрланг» (620144, Екатеринбург, ул. Народной воли, д.19а), тел. +7 912 216 7115, e-mail: alex.itsixon@erlang.ru.

Retro analysis of the management operation telecommunication system

Itsixon A.I., Ph.D., Company “Erlang” Ltd

The study focuses on the determination of the strategies of exploitation of systems and telecommunication of the changes of manufacturing technology equipment. Existing research is not linked to the aging of products depending on the technology of manufacture of electronic equipment. The proposed model of correlation maintenance strategy of telecommunication with the improvement of technology. On the basis of the Methodology of the state Committee for standardization identified the main strategy of operation; for mathematics-for-economic models, strategies mapped by the criterion of minimum cost/maximum revenue. Conducted an evolutionary analysis to improve the technology since the 1960's. Conducted field studies of the drift rate (aging) parameters determining the efficiency of devices and telecommunication systems for different elemental components: on the basis of lighting technology, semiconductors, integrated circuits, worked in the 1970s-1990s. The change in the rate of aging was determined. The comparison of operation strategies at the current level of technology development is made. It is proved that there will be no further change in operating strategies. Further improvement of manufacturing technology will be accompanied by quantitative changes.

Keywords: telecommunications, management of maintenance, maintenance strategy, the rate of change of parameters, the criterion of minimum costs of operation.