

Апарина Татьяна Федоровна

*магистрант, Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск*

Караваев Илья Алексеевич

*магистрант, Национальный исследовательский Мордовский государственный
университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск*

Соболев Николай Сергеевич

*старший преподаватель, Национальный исследовательский Мордовский
государственный университет имени Н. П. Огарёва, г. Саранск*

ОЦЕНКА НАДЁЖНОСТИ ОБОРУДОВАНИЯ INDOOR БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ С УЧЁТОМ УСЛОВИЙ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ

Аннотация. В работе предлагается методика коррекции заводских значений средней наработки между отказами Mean Time Between Failures (MTBF) путём введения поправочных средовых коэффициентов. На основе скорректированных показателей выполнено сопоставление оборудования с классами герметичности IP20 и IP65 применительно к различным функциональным зонам в пределах одного строения. Полученные результаты позволяют аргументированно подходить к выбору типа внутренней базовой станции, обеспечивая минимизацию риска внеплановых остановов.

Abstract. The paper proposes a method for correcting the factory-set Mean Time Between Failures (MTBF) values by introducing environmental correction factors. Based on the adjusted values, the paper compares equipment with IP20 and IP65 sealing classes for different functional zones within the same building. The results obtained allow for a well-reasoned approach to choosing the type of internal base station, minimizing the risk of unscheduled shutdowns.

Ключевые слова: indoor базовая станция, надёжность, MTBF, степень защиты IP, вибрация, запылённость, температурный режим, многокритериальный выбор.

Keywords: indoor base station, reliability, MTBF, IP protection rating, vibration, dustiness, temperature conditions, and multi-criteria selection.

Обеспечение полноценного абонентского покрытия внутри зданий является одной из ключевых задач в улучшении качества соединения внутри строений. По оценкам аналитических структур, до 80 процентов трафика в системах подвижной связи генерируется пользователями, находящимися в помещениях. Для решения этой проблемы операторы внедряют специализированные indoor-решения, к числу которых относятся распределённые антенные системы Distributed Antenna System (DAS), маломощные пико- и фемтосоты, а также активные антенные комплексы с использованием удалённых радиочастотных блоков.

Специфика рассматриваемого класса устройств состоит в том, что они физически располагаются внутри строительных конструкций, однако условия в различных частях одного и того же объекта могут принципиально отличаться.

Технические помещения зачастую характеризуются нерегулируемым тепловым режимом из-за отсутствия круглосуточной системы кондиционирования. Зоны, прилегающие к лифтовым шахтам и эскалаторам, подвержены длительным низкочастотным вибрациям. Производственные площади отличаются повышенной концентрацией взвешенных частиц, а подземные паркинги сопряжены с опасностью проникновения воды. Заводские паспортные показатели надёжности, предоставляемые изготовителями (как правило, MTBF в лабораторных условиях при +25°C без учёта внешних возмущений), не отражают реальной долговечности аппаратуры в перечисленных средах.

Основной целью настоящей работы является разработка способа корректировки количественных метрик надёжности внутренних базовых станций, учитывающего специфику среды эксплуатации внутри помещений, и

формулирование на этой основе практических рекомендаций по выбору оборудования с различными степенями корпусной защиты.

Для решения поставленной задачи выделено пять категорий функциональных зон в границах одного строения, различающихся характером и интенсивностью внешних воздействий.

Первая категория – административные помещения с регулируемыми климатическими параметрами. Здесь поддерживается температура в интервале 20–26°C, относительная влажность 30–60%, запылённость сведена к минимуму, вибрации отсутствуют, вероятность затопления крайне низка. Данная среда является наиболее благоприятной и приближена к эталонным лабораторным условиям.

Вторая категория – технические этажи и серверные комнаты без постоянного отопления. Температура может изменяться от минус 10°C в холодный период до плюс 40°C в летнее время при отключённой вентиляции. Влажность воздуха в межсезонье достигает 80%. Оборудование в таких помещениях функционирует без регулярного присутствия обслуживающего персонала, вследствие чего начальные отказы могут оставаться незафиксированными продолжительное время.

Третья категория – пространства, расположенные вблизи лифтовых установок, эскалаторов и вентиляционного оборудования. Для них характерны постоянные вибрации с частотным диапазоном 10–100 Гц и амплитудой колебаний до 0,5 мм. Вибрационные нагрузки ускоряют процессы разрушения паяных соединений, разъёмных контактов и кварцевых резонаторов.

Четвёртая категория – производственные цеха. Наряду с возможной вибрацией здесь наблюдается высокая концентрация взвешенных частиц и аэрозолей. Запылённость приводит к ухудшению условий теплоотвода, закупориванию вентиляционных решёток и коррозионному поражению токоведущих поверхностей.

Пятая категория – подземные паркинги, цокольные этажи, тоннельные переходы. Основной дестабилизирующий фактор – периодическое подтопление,

возникающее из-за разрушения трубопроводов, таяния снежных масс или повышения уровня грунтовых вод. Даже непродолжительный контакт с влагой вызывает электрохимическое разрушение металлических элементов, короткие замыкания и полный выход из строя источников питания. Метод модификации показателей надёжности.

MTBF – это стандартизованный показатель безотказности восстанавливаемых технических систем, определяющий усреднённую длительность работы между соседними событиями отказа. Он применяется для количественного анализа стабильности функционирования аппаратуры, прогнозирования периодичности отказов, планирования профилактических мероприятий и общей оценки надёжности комплекса.

Заводское паспортное значения $MTBF_0$ обычно задаётся производителем для нормальных климатических условий (25°C, отсутствие вибрации, чистая среда). Для учёта реальной обстановки вводится модифицированная величина, рассчитываемая по формуле (1):

$$MTBF_{\text{реал}} = \frac{MTBF_0}{K_{\text{тем}} \cdot K_{\text{вибр}} \cdot K_{\text{пыль}} \cdot K_{\text{влага}}} \quad (1)$$

где каждый коэффициент K_i отражает ускорение деградации под действием конкретного фактора. Значения коэффициентов определяются на основе справочных данных по надёжности электронных компонентов и адаптируются для телекоммуникационного оборудования.

Рассмотрим каждый из входящих коэффициентов подробнее.

Температурный коэффициент $K_{\text{тем}}$. Зависимость интенсивности отказов от температуры описывается моделью Аррениуса. Для полупроводниковых компонентов коэффициент ускорения при отклонении температуры от номинала вычисляется по формуле (2):

$$K_{\text{тем}} = \exp\left(\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{\text{ном}}} - \frac{1}{T_{\text{реал}}} \right)\right) \quad (2)$$

Где: E_a – энергия активации отказа,

k – постоянная Больцмана,

$T_{ном}$ и $T_{реал}$ – абсолютные температуры в Кельвинах.

Вибрационный коэффициент $K_{вибр}$. Влияние вибрационных воздействий на отказы паяных соединений и механических интерфейсов аппроксимируется степенной функцией от уровня виброускорения. Для оборудования, размещённого поблизости от лифтов и эскалаторов, значение $K_{вибр}$ принимается в диапазоне 1,5–2,0. При установке на вибрирующих ограждающих конструкциях или вентиляционных коробах коэффициент может возрасти до 3,0.

Коэффициент запылённости $K_{пыль}$. Запылённость воздействует на безотказность по двум направлениям: ухудшение эффективности рассеивания тепла и загрязнение контактных соединений. Для производственных помещений без системы фильтрации воздуха $K_{пыль}$ полагается равным 2,0. Для офисов с регулярной уборкой – 1,0. Для особо неблагоприятных сред (цементные заводы, угольные склады) коэффициент может достигать 4,0.

Коэффициент влажностного воздействия $K_{влага}$. Риск затопления либо конденсации влаги признаётся наиболее деструктивным фактором. Для сухих зон без вероятности протечек $K_{влага}=1,0$. Для помещений с повышенной влажностью (неотапливаемые подвалы) – 2,0. Для зон с прямым риском затопления (паркинги, цокольные этажи) – не менее 5,0. При реальном затоплении аппаратура, как правило, выходит из строя полностью, и модификация МТBF теряет физический смысл.

Сравнение оборудования IP20 и IP65. Степень герметичности Ingress Protection (IP) кодируется двумя цифрами: первая определяет уровень защиты от проникновения твёрдых частиц (в том числе пыли), вторая – от проникновения воды. Изделия класса IP20 защищены от попадания объектов диаметром более 12,5 мм (пальцы, стандартные инструменты), однако не имеют защиты от пыли

и влаги. Такое оборудование предназначено исключительно для сухих чистых помещений с контролируемыми климатическими условиями.

Изделия класса IP65 характеризуются полной пыленепроницаемостью (первая цифра 6) и защитой от водяных струй любого направления под давлением (вторая цифра 5). Конструкция корпуса IP65 допускает размещение аппаратуры в запылённых цехах, под открытыми водостоками и в паркингах с периодическими протечками.

Проведём сопоставление рассматриваемых типов помещений на основе скорректированного MTBF. Для оборудования внутренних базовых станций производители обычно декларируют базовую наработку на отказ $MTBF_0$ в интервале 150 000–300 000 часов. Для численных расчётов примем среднюю величину $MTBF_0 = 200\,000$ часов. Значения средовых коэффициентов по категориям помещений сведены в таблицу 1.

Таблица 1.

Значения коэффициентов K_i для различных категорий помещений

Категория помещения	Характерные факторы среды	Коэффициенты
Офисное помещение (Категория 1)	Контролируемый климат, температура 20–26°C, отсутствие пыли, вибрации и влаги	$K_{тем} = 1,0$ $K_{вибр} = 1,0$ $K_{пыль} = 1,0$ $K_{влага} = 1,0$
Неотапливаемая серверная (Категория 2)	Температура от 0 до 40°C, отсутствие пыли и воды, возможны скачки влажности	$K_{тем} = 2,5$ $K_{вибр} = 1,0$ $K_{пыль} = 1,0$ $K_{влага} = 1,0$
Помещение у лифтовой шахты (Категория 3)	Постоянная вибрация 10–100 Гц, амплитуда до 0,5 мм; температура комнатная	$K_{тем} = 1,0$ $K_{вибр} = 2,0$ $K_{пыль} = 1,0$ $K_{влага} = 1,0$

Категория помещения	Характерные факторы среды	Коэффициенты
Производственный цех (Категория 4)	Высокая запылённость (цементная, угольная, металлическая пыль); температура 30–35°C	$K_{тем} = 1,5$ $K_{вибр} = 1,0$ $K_{пыль} = 2,0$ $K_{влага} = 1,0$
Подземный паркинг (Категория 5)	Риск периодического затопления, конденсат, возможные протечки	$K_{тем} = 1,0$ $K_{вибр} = 1,0$ $K_{пыль} = 1,0$ $K_{влага} = 5,0$

Категория 1 (административное помещение). В данном случае среда максимально приближена к лабораторной. Все коэффициенты равны единице, следовательно, по формуле (1) получаем $MTBF_{реал} = 200\ 000$ часов. Применение IP65 в аналогичных условиях не обеспечивает прироста безотказности, однако стоимость изделия возрастает на 40–60%. Вывод: для административных и переговорных зон достаточно степени защиты IP20.

Категория 2 (неотапливаемая серверная). Подстановка значений из таблицы даёт $MTBF_{реал} = 80\ 000$ часов. Для IP20 отсутствие дополнительной защиты не является недостатком, поскольку пыль и влага отсутствуют. Интуитивно может показаться, что IP65 с пыленепроницаемым корпусом создаёт преимущество благодаря герметизации, однако герметичный корпус без активного отвода тепла способен ухудшить тепловой режим. Вследствие этого $K_{тем}K_{тем}$ для IP65 может возрасти до 3,0 (против 2,5), что даст $MTBF_{реал} = 66\ 700$ часов. Таким образом, IP20 оказывается предпочтительнее. Рекомендуется применять IP20 с дополнительным контролем температуры и принудительным воздушным охлаждением.

Категория 3 (зона у лифтовой шахты). Для IP20 расчёт даёт $MTBF_{реал} = 100\ 000$ часов. В классе защиты IP65 отсутствуют специальные виброизоляционные свойства (стандарт IP не регламентирует устойчивость к вибрации), поэтому преимущество проявляется лишь при наличии пыли или влаги, которых здесь

нет. Однако корпус IP65 часто имеет большую массу и усиленные крепления, что косвенно снижает воздействие вибраций. Для вибронегруженных зон рекомендовано оборудование с усиленной виброизоляцией; степень защиты IP65 желательна, но не критична.

Категория 4 (производственный цех). Для IP20 проникновение пыли внутрь корпуса приведёт к забиванию радиаторов и возникновению коротких замыканий. Формально в модели это можно отразить дополнительным множителем, но практически IP20 в таких условиях неработоспособен – реальная наработка на отказ падает практически до нуля в течение нескольких месяцев. Для IP65 пыль внутрь не попадает, влияние оказывает только температура: $MTBF_{real} = 133\ 000$ часов. Таким образом, для запылённых производственных зон обязательным является использование IP65 или выше.

Категория 5 (подземный паркинг). Риск затопления выступает доминирующим фактором. Для IP20 даже непродолжительный контакт с водой ведёт к немедленному отказу. Для IP65 защита от водяных струй позволяет переживать периодические протечки при условии, что уровень воды не превышает высоты корпуса и сохраняется герметичность разъёмов. При полном погружении IP65 также недостаточен – требуется IP67 или IP68. В данном сценарии IP65 обеспечивает $MTBF_{real} = 40\ 000$ часов, тогда как IP20 эксплуатировать нельзя. Следовательно, для подземных паркингов и цокольных этажей минимально допустимая степень защиты – IP65; при регулярных подтоплениях следует рассматривать IP67.

Разработанная методика коррекции паспортных значений средней наработки на отказ с помощью средовых коэффициентов позволяет количественно прогнозировать ожидаемую безотказность внутренних базовых станций в различных функциональных зонах в пределах одного здания. Учёт тепловых режимов, вибрационного воздействия, запылённости и риска подтопления даёт значительно более реалистичные оценки по сравнению с использованием только заводских данных. Предложенные рекомендации по выбору между классами защиты IP20 и IP65 для пяти типов помещений могут

быть использованы проектными организациями и эксплуатационными подразделениями при планировании развёртывания indoor-сетей.

Список литературы

1. Приказ Минкомсвязи России от 29.10.2018 № 572, Правила применения базовых станций сетей подвижной радиотелефонной связи стандарта LTE. Часть VI. Приложение № 2: Требования к параметрам устойчивости к воздействию климатических и механических факторов.
2. РД 45.162-2001. Оборудование стационарных комплексов подвижной связи. Требования к электропитанию, заземлению и молниезащите. – М., 2001.
3. Бычков А.В., Смирнов К.А. Надёжность телекоммуникационного оборудования при воздействии вибрации и температурных перепадов. – Электросвязь, №4, 2022.