

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОГОНА
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ**

Ю. О. СЕРЕБРЯКОВА, С. Н. ПОЛЕССКИЙ*, П. С. КОРОЛЕВ

*Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, Москва, Россия
spolessky@hse.ru

Аннотация. Показано, что не все математические модели, используемые для оценки времени проведения технологического прогона телекоммуникационного оборудования, учитывают конструктивно-технологические особенности последнего. Приведена статистика отказов телекоммуникационного оборудования, доказывающая необходимость учета этих особенностей. Показано, что одновременное воздействие таких факторов, как температура окружающей среды, цикличность включения/выключения, относительная влажность, напряжение питания или ток, приводит к ускорению технологического прогона в тысячи раз. Разработана методика, позволяющая значительно сократить время технологического прогона и подтверждения срока службы электронного модуля первого уровня телекоммуникационного оборудования. Преимуществами методики являются применение многофакторного форсированного режима для оценки необходимого коэффициента ускорения, а также учет факторов, значительно влияющих на состояние телекоммуникационного оборудования. Достоинство методики заключается в дифференциальном прогнозировании показателей надежности телекоммуникационного оборудования и в возможности сокращения количества отказов в период его нормальной эксплуатации, что доказано результатами экспериментального исследования.

Ключевые слова: безотказность, долговечность, технологический прогон, отказ, ускоренные испытания, методика, математическая модель

Ссылка для цитирования: Серебрякова Ю. О., Полесский С. Н., Королев П. С. Методика оценки продолжительности технологического прогона телекоммуникационного оборудования // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 8. С. 597—611. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-597-611.

**METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE DURATION
OF THE TECHNOLOGICAL RUN OF TELECOMMUNICATION EQUIPMENT**

Yu. O. Serebryakova, S. N. Polesskiy*, P. S. Korolev

*HSE University, Moscow, Russia
spolessky@hse.ru

Abstract. It is shown that not all mathematical models used to estimate the time of the technological run of telecommunication equipment take into account the design and technological features of the hardware. The statistics of failures of telecommunication equipment are given, proving the need to take into account these features. It is shown that the simultaneous influence of factors such as ambient temperature, on/off cycling, relative humidity, supply voltage or current leads to an acceleration of the technological run by thousands of times. A technique has been developed that allows to significantly reduce the time of technological run-through and confirmation of the service life of the electronic module of the first level of telecommunication equipment. The advantages of the technique are the use of a multifactorial forced mode to assess the required acceleration coefficient, as well as taking into account factors that significantly affect the state of telecommunications equipment. The advantage of the technique lies in the differential prediction of reliability indicators of telecommunication equipment and in the possibility of reducing the number of failures during its normal operation, which is proved by the results of experimental research carried out.

Keywords: reliability, technological run, failure, accelerated testing, methodology, mathematical model

For citation: Serebryakova Yu. O., Polesskiy S. N., Korolev P. S. Methodology for estimating the duration of the technological run of telecommunication equipment. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 8. P. 597—611 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-8-597-611.

Введение. Развитие отрасли телекоммуникационного оборудования (ТО) обуславливает усложнение конструкции разрабатываемых изделий, что может вызвать снижение надежности ТО [1]. Стоит отметить, что методы входного контроля и методы испытаний на предприятии значительно влияют на показатели надежности [1, 2], поскольку в большей степени отказы ТО обусловлены несовершенством методов контроля производства, недостатками в системе управления качеством проектирования, некачественными комплектующими элементами [3].

Чтобы минимизировать количество ранних отказов в период приработки изделий на предприятии, в качестве завершающего этапа технологического процесса применяется технологический прогон (ТП), который положительно влияет на показатели надежности (безотказность, сохраняемость, долговечность) выпускаемых партий ТО в целом [1, 2]. Это объясняется тем, что порядка 2 % изделий отказывают именно на этапе приработки [4].

Технологический прогон — это метод тестирования и анализа, заблаговременно определяющий возможные отказы изделия [2, 4]. Применительно к телекоммуникационному оборудованию в классическом виде он представляет собой ускоренное испытание при достижении предельных параметров окружающей среды. Однако результаты исследования, приведенные в [4], свидетельствуют, что ключевое влияние на ранние отказы оказывают скачки напряжения (тока).

В настоящее время не решен вопрос о длительности проведения технологического прогона ТО. При выявлении малого количества ненадежных образцов существует вероятность недостаточного по времени технологического прогона, а также при выявлении большого количества ненадежных образцов есть вероятность того, что он проводился излишне долго. На текущий момент над решением аналогичных проблем работают организации ВНИИР, ЦКБ „Дейтон“ и РНИИ „Электронстандарт“, которые регулярно выпускают справочники по характеристикам надежности электронной компонентной базы, в том числе по полупроводниковым приборам. Следовательно, цель настоящего исследования — повышение надежности ТО.

Постановка задачи. Цель настоящей статьи — разработка методики оценки длительности технологического прогона ТО, которая учитывает факторы, оказывающие влияние на время выполнения прогона. Методика должна задействовать действующую нормативно-техническую документацию (НТД).

В качестве примера ТО выбран сервер. Структура сервера: электрорадиоэлемент (конденсаторы, полупроводниковые приборы и др.) — модуль электронный нулевого уровня; функциональный узел (системный контроллер и др.) — модуль электронный первого уровня; радиоэлектронное устройство (материнская плата и др.) — модуль электронный второго уровня; составляющая сервера (система серверная) — модуль электронный третьего уровня и т.д. Для детального исследования выбран функциональный узел (модуль электронный первого уровня) ТО.

В ходе исследования должны быть выполнены: обзор актуальной статистики распределения отказов ТО; анализ периодов эксплуатации ТО; обзор и анализ типов и методов форсированных испытаний ТО, действующих подходов и математических моделей для оценки продолжительности проведения ТП; оценка времени технологического прогона для объекта исследования; разработка методики оценки продолжительности технологического прогона; экспериментальное исследование актуальности применения полученных результатов для выбранного объекта.

Распределение отказов. Согласно актуальной статистике [3], третье место (15 %) в распределении отказов занимают производственные отказы (рис. 1): нарушение работоспособности в результате инцидентов, возникающих во время производственного процесса (дефекты в местах пайки, например, трещины).



Рис. 1

Причины подобного рода отказов — применение низкокачественных материалов и комплектующих (недостаточный уровень показателя безотказности полупроводниковых приборов [5]), неисполнение обязательных требований НТД, недостаточный контроль производства [6], некорректная работа технологического оборудования и многое другое. Стоит привести в качестве примера данные производителя компании Cisco [7]: в коммутаторах зачастую выявляются поломки разъемов различных печатных узлов, отказы электронных модулей.

Не выявленные своевременно по результатам технологического прогона на предприятии отказы трансформируются в эксплуатационные (12 % от общего количества отказов). На текущий момент эффективность технологического прогона низкая, поскольку на производстве некорректно оценивают длительность его проведения.

Периоды эксплуатации. Различают три периода эксплуатации ТО: приработка; нормальная эксплуатация; интенсивный износ и старение [8]. Указанные периоды на кривой интенсивности отказов (λ) имеют явную закономерность (рис. 2; $t_{\text{ср.д}}$ — средняя долговечность, $t_{\text{ср}}$ — средняя наработка до первого отказа, $t_{\text{ср}} > t_{\text{ср.д}}$. Обычно $t_{\text{ср.д}}$ соответствует начальному участку периода старения и износа).

Приработка — эта начальная стадия работы ТО, которая обладает характерно высоким значением числа отказов. Согласно [1, 9], в этот период выявляются будущие неминуемые дефекты производства при сборке и монтаже ТО. Дело в том, что отказы, которые возникают при приработке, недопустимы для клиентов [10].

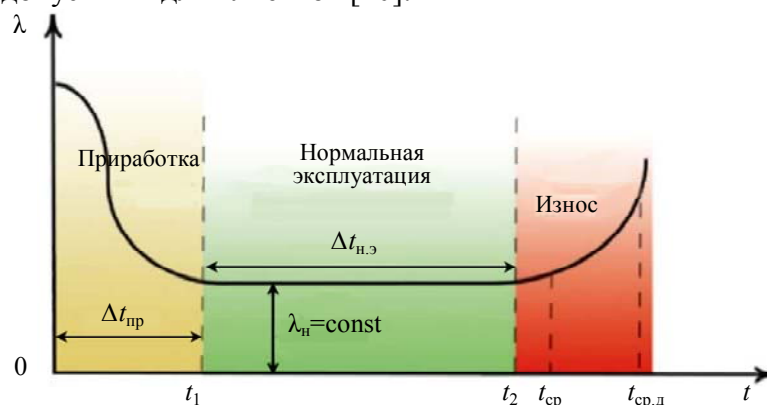


Рис. 2

Вследствие этого получается, что для идеального случая длительность приработки $\Delta t_{\text{пр}} \rightarrow 0$, а длительность нормальной работы ТО $\Delta t_{\text{н.э}} \rightarrow \infty$.

Ресурсные ускоренные испытания — это не только классические HALT (Highly Accelerated Life Testing) [10], но и термоиспытания при предельных температурах окружающей среды, энергоиспытания при предельных напряжениях питания и другие типы воздействия форсированного режима [1, 10]. Процесс HALT-испытаний приведен на рис. 3.

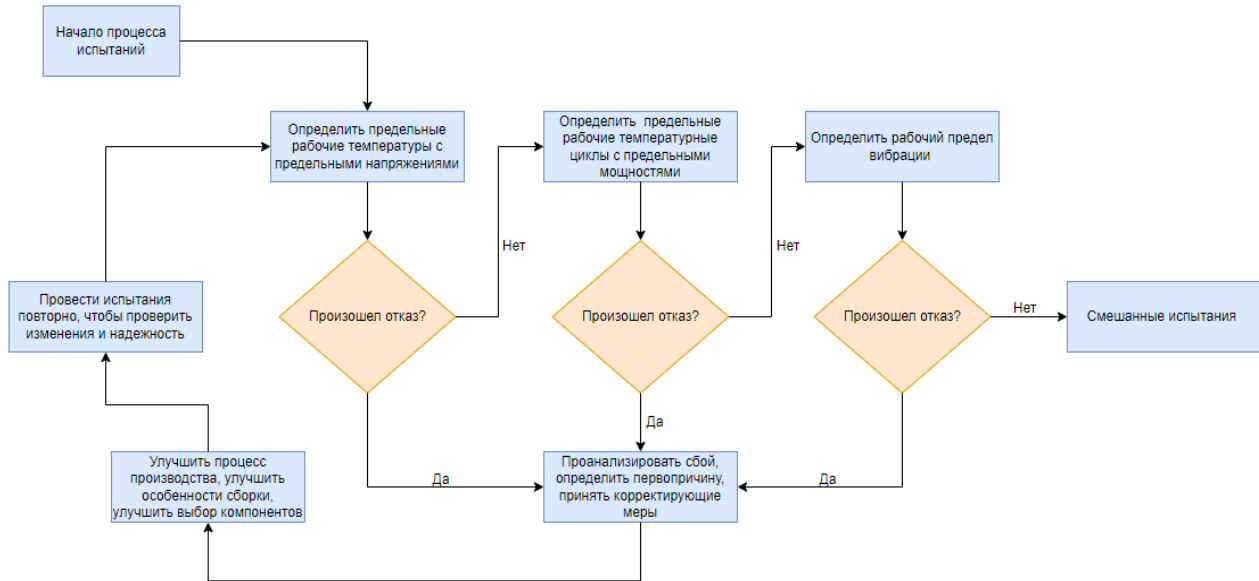


Рис. 3

Методология HALT заключается в том, чтобы ускорить отказ, выявить и смягчить недостатки ТО для повышения надежности во время эксплуатации в рабочих условиях. Этот тип ускоренного испытания предназначен не для измерения надежности оборудования, а для ее повышения за счет устранения режимов отказа с наименьшей разницей между нагрузкой самого изделия. Цель HALT состоит в том, чтобы идентифицировать эти несколько компонентов или деталей и сделать их такими же надежными, как и остальная часть изделия.

Методы ускорения испытаний. Быстрое обнаружение отказов изделий возможно с помощью различных методов, которые применяются в соответствии с тестируемым оборудованием или материалом [1, 10]:

- повышение истощения технического ресурса. Метод используется с изделиями, не находящимися в регулярной эксплуатации (увеличение нормы использования изделия по назначению приводит к снижению срока службы);

- ускорение старения — условия окружающей среды изменяются для увеличения скорости химической реакции разложения материалов за счет повышения, например, температуры;

- ускорение деградации. Метод требует увеличения электрической нагрузки. Это, как правило, приводит к раннему отказу изделия.

Подходы к оценке длительности ТП. Согласно работе [11], действующая НТД*, где регламентируются требования к оценке и обеспечению надежности, а также методам контроля, базируется, в частности, на международных стандартах с использованием классических подходов, синхронизирующихся с ними. Актуализация отмеченных стандартов проведена в 2021 г. В ГОСТ РВ 0020–39.411–2020 приведены принципы оценки показателей надежности изделий на этапах серийного производства; ГОСТ РВ 0020–39.413–2020 регламентирует кратковременные или длительные испытания на безотказность. Согласно ему, продолжительность квалификационных испытаний $t_{к.и}$ должна быть меньше продолжительности испытаний $t_{исп}$.

* ГОСТ РВ 0020–39.411–2020. Комплексные системы общих технических требований и контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Общие положения. [Дата введения 2021-03-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 17 с.; ГОСТ РВ 0020–39.413–2020. Комплексные системы общих технических требований и контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические военного назначения. Требования к надежности. [Дата введения 2021-03-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 40 с.

Математические модели для оценки длительности ТП. Первая математическая модель длительности ТП t_{ϕ} приведена в работе [12]:

$$t_{\phi} = \frac{t_p}{K_n}, \quad (1)$$

где t_p — наработка изделий, полученная в реальных условиях (задается в виде промежутка); K_n — коэффициент подобия ускоренных испытаний.

Вторая модель продолжительности ТП $t_{\text{исп}}$ представлена в стандарте* и имеет следующий вид:

$$t_{\text{исп}} = \frac{|\ln\beta| \cdot T_{\beta}}{K_y}, \quad (2)$$

где β — оценка величины риска поставщика и заказчика; T_{β} — уровень брака согласно техническому заданию (ТЗ) T_0 ; зачастую $T_{\beta} = T_0$; K_y — коэффициент форсированных испытаний по всем возможным ускоряющим факторам. Одновременное влияние факторов для K_y в математическом виде будет иметь следующий вид:

$$K_y = K_p K_T K_{\mu} N, \quad (3)$$

где K_p — коэффициент ускорения испытания изделий с любым известным видом резервирования; K_T — коэффициент ускорения испытаний, зависящий от температуры окружающей среды; K_{μ} — коэффициент ускорения испытаний, зависящий от циклического режима работы (к примеру, частота включения/отключения питания); N — число испытываемых изделий (одновременно), в частности, ТО. Необходимо отметить, что детальное описание подхода к определению процессов, приводящих к ускорению деградации при циклическом режиме K_{μ} , приводится в ГОСТ**.

Третье по важности выражение для оценки времени ТП указано в ГОСТ*** и представлено в виде:

$$t_{\text{исп}} = \frac{t_3}{K_y}, \quad (4)$$

где t_3 — диапазон времени воздействия на изделие агрессивной среды (в частности, условия среды указываются в документации на ТО); K_y — коэффициент ускорения.

Для T_3 также используют срок сохраняемости в эксплуатации для подверженных нагреву изделий; срок службы — для не нагреваемых изделий и ресурс — для тех покрытий материала изделий, которые защищены от воздействия таких сред.

* Курочкин В. Ф., Кубарев А. И., Бурдасов Е. И. и др. РД 50-424-83. Методические указания. Надежность в технике. Ускоренные испытания. Основные положения. [Дата введения 1985-01-01]. М.: Изд-во стандартов, 1985. 12 с. (Руководящий документ).

** ГОСТ РВ 0020-39.302-2019. Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию специальных факторов. [Дата введения 2021-01-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 22 с.

*** ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий материалов и систем материалов. [Дата введения 2000-07-01]. М.: Издательство стандартов, 2001. 59 с.

Четвертая модель приведена в ГОСТ*:

$$t_{\text{пр}} = \frac{1}{\alpha} \ln \left[\frac{b_1 (S_{\text{ср}} - S_2 - S_4)}{S_1 + S_3 + b_0 (S_2 + S_4)} \right], \quad (5)$$

где $S_{\text{ср}}$ — финансовый показатель, учитывающий средние расходы организации (валюта — рубли) на ликвидацию последствий отказа образца в период гарантийного срока; S_1 — финансовый показатель для учета вознаграждения (валюта — рубли) персонала, принимающего участие в операциях ТП по обслуживанию экземпляра изделия за 1 ч; S_2 — средние затраты на заработную плату (валюта — рубли) сотрудников организации, проводящих ремонтные работы, отнесенные к отказу экземпляра изделия; S_3 — финансовый показатель, необходимый для учета средних расходов на энергию (валюта — рубли), отнесенный к одному изделию в течение 1 ч ТП; S_4 — финансовый показатель, служащий для учета средней стоимости комплектующих деталей и материалов (валюта — рубли), необходимых для восстановления отказавшего экземпляра изделия, или цены невозстанавливаемого экземпляра (в случае его отказа);

$$b_0 = \frac{\omega_1 \omega_n - \omega_{\text{ср}}^2}{\omega_1 + \omega_n - 2\omega_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

где ω_1 — ордината экспериментальной функции, абсцисса которой, t_1 , подбирается равной одному из первых значений t_j ; ω_n — ордината экспериментальной функции, для которой абсциссу t_n определяют так, чтобы была равна одному из конечных вариантов значений t_j ; $\omega_{\text{ср}}$ — ордината экспериментальной функции, для которой абсциссу $t_{\text{ср}}$ оценивают по выражению:

$$t_{\text{ср}} = \frac{t_1 + t_n}{2}. \quad (7)$$

Коэффициент b_1 должен быть определен с помощью математической модели:

$$\ln b_1 = \frac{\sum_{j=1}^k x_j^2 \cdot \sum_{j=1}^k y_j - \sum_{j=1}^k x_j y_j \cdot \sum_{j=1}^k x_j}{k \sum_{j=1}^k x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^k x_j \right)^2}. \quad (8)$$

Оценка коэффициента α происходит по математической модели:

$$\alpha = \left| \frac{k \sum_{j=1}^k x_j y_j - \sum_{j=1}^k x_j \cdot \sum_{j=1}^k y_j}{k \sum_{j=1}^k x_j^2 - \left(\sum_{j=1}^k x_j \right)^2} \right|, \quad (9)$$

* ГОСТ 23502-79. Обеспечение надежности на этапе производства. Технологический прогон изделий бытового назначения. М.: Изд-во стандартов, 1979.

где k — общее количество скачков экспериментальной функции; x_j — временной диапазон от начала координат до середины интервала (t_{j-1}, t_j) ; численные значения y_j оцениваются с помощью следующего выражения:

$$y_j = \ln(\omega_j - b_0), \quad (10)$$

Пятая математическая модель, представленная в НТД*, позволяет оценить коэффициент ускорения при HALT-испытаниях A_f , а именно:

$$A_f = \left(\frac{RH_t}{RH_u} \right)^3 \exp \left[\frac{E_a}{k_B} \left(\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_t} \right) \right], \quad (3)$$

где RH_t — коэффициент, принимающий численное значение влажности, достигнутое при использовании образцов ТО; RH_u — коэффициент, принимающий численное значение влажности, достигнутое при испытаниях образцов ТО; k_B — постоянная Больцмана; E_a — энергия активации; T_t — коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды при использовании образцов ТО (единицы измерения – градусы Цельсия); T_u — коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды при испытаниях образцов ТО (единицы измерения — градусы Цельсия).

Коэффициент ускорения по циклам включения/выключения (циклический режим работы) образцов ТО K_{BB} определяется по математической модели, приведенной в ГОСТ Р 57394-2017:

$$K_{BB} = Z\gamma, \quad (12)$$

где Z — суммарное число циклов за 1 ч непрерывной работы образцов; γ — отношение параметра потока отказов в циклическом режиме к параметру потока отказов в непрерывном режиме.

В итоге кумулятивный коэффициент ускорения K_y должен определяться как сумма составных частей ТО с учетом различных механизмов отказа:

$$K_y = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{I_i} q_{ij}^0 K_{ij}, \quad (13)$$

где K_{ij} — коэффициент ускорения по i -му фактору; весовой коэффициент q_{ij} для каждого компонента ТО оценивается в следующем виде:

$$q_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_i \sum_j \lambda_{ij}}, \quad (14)$$

где λ_{ij} — интенсивность отказов i -го механизма отказов j -й группы компонентов ТО, см. ГОСТ Р 57394-2017.

Проведенный анализ показал, что модели (1), (2), (4) и (11) учитывают конструктивно-технологические особенности ТО, а формула (5) — нет. Отсюда следует, что она не подходит для оценивания длительности технологического прогона ТО.

Оценка длительности ТП. Объектом исследования для оценки длительности ТП выступает управляемый эквивалент электрической нагрузки (УЭЭН), являющийся составной частью ТО, электрическая принципиальная схема (СЭП) которого представлена на рис 4. УЭЭН может эксплуатироваться в широком диапазоне рабочих температур окружающей среды: от -40 до $+80$ °С.

* ГОСТ Р 57394-2017 Микросхемы интегральные и приборы полупроводниковые // Методы ускоренных испытаний на безотказность. [Дата введения 2018-01-01]. М.: Стандартинформ, 2017. 42 с.

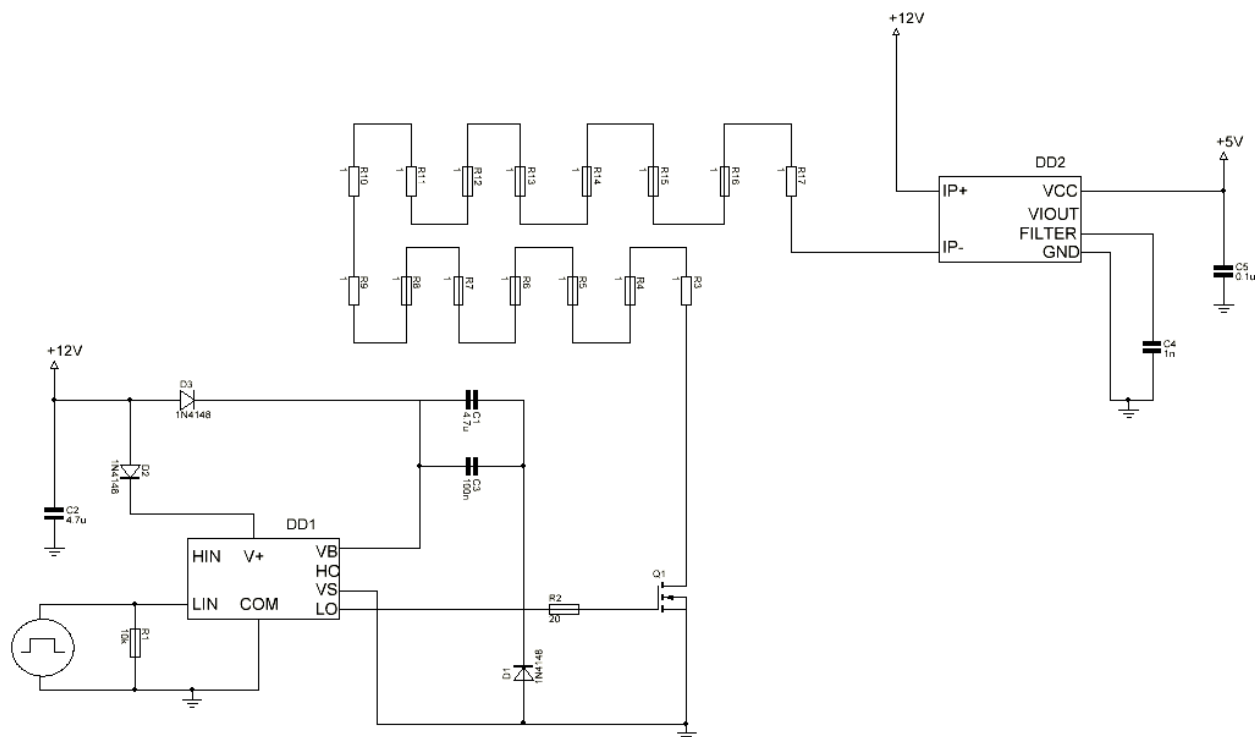


Рис. 4

Срок службы СЭП УЭЭН — 43 800 ч. Состав компонентов УЭЭН представлен в табл. 1.

Таблица 1

Комплекующие УЭЭН

Компонент	Количество	Рабочие температуры, °С
Конденсатор	5	– 40 ... + 125
Резистор	17	– 55 ... + 155
Диод	3	– 50 ... + 80
Транзистор	1	– 55 ... + 175

Для УЭЭН в качестве примера по методике, описанной в НТД (ГОСТ Р 57394-2017), выполнена оценка длительности эксперимента при максимальной нижней температуре окружающей среды, равной – 40 °С. Табл. 2 сформирована благодаря информации о параметрах и характеристиках комплектующих рассматриваемого изделия и данным, указанным в справочнике [13].

Таблица 2

Параметры температуры и относительной влажности элементов УЭЭН

Наименование элемента	E_A	$k, 10^{-5}$	T_T	T_U	RH_T	RH_U	Эксплуатационная интенсивность отказов, $10^{-6}, 1/ч$	A_F
Конденсатор	0,35	8,6	+45	–40	0,1	0,95	0,0095	8,115235148
Резистор	0,16	8,6	+25	–40	0,1	0,95	0,1503	101,8528616
Диод	0,7	8,6	+25	–40	0,1	0,95	0,0701	0,076812412
Транзистор	0,7	8,6	+45	–40	0,1	0,95	0,0701	0,076812412

Число циклов включения/выключения питания УЭЭН $\gamma=1,5$, частота — $Z=10$. Результирующее значение коэффициента ускорения $K_{BB} = 15$. Итоговый коэффициент ускорения K_y УЭЭН — 1390, а средневзвешенный поправочный коэффициент эксплуатации $K_3 = 5,64$.

Длительность ТП с учетом предыдущих рассчитанных данных должна оцениваться по выражению (4). Время испытаний: без отказов — 86 ч, 1 отказ — 186 ч, 2 отказа — 288 ч, 3 отказа — 390 ч. Важно отметить, что константы в моделях коэффициентов ускорения для i -го фактора оценивались при установленных неизменных значениях других.

Проведены похожие расчеты продолжительности испытаний (рис. 5), но с последовательным учетом рассмотренных ранее влияющих факторов.

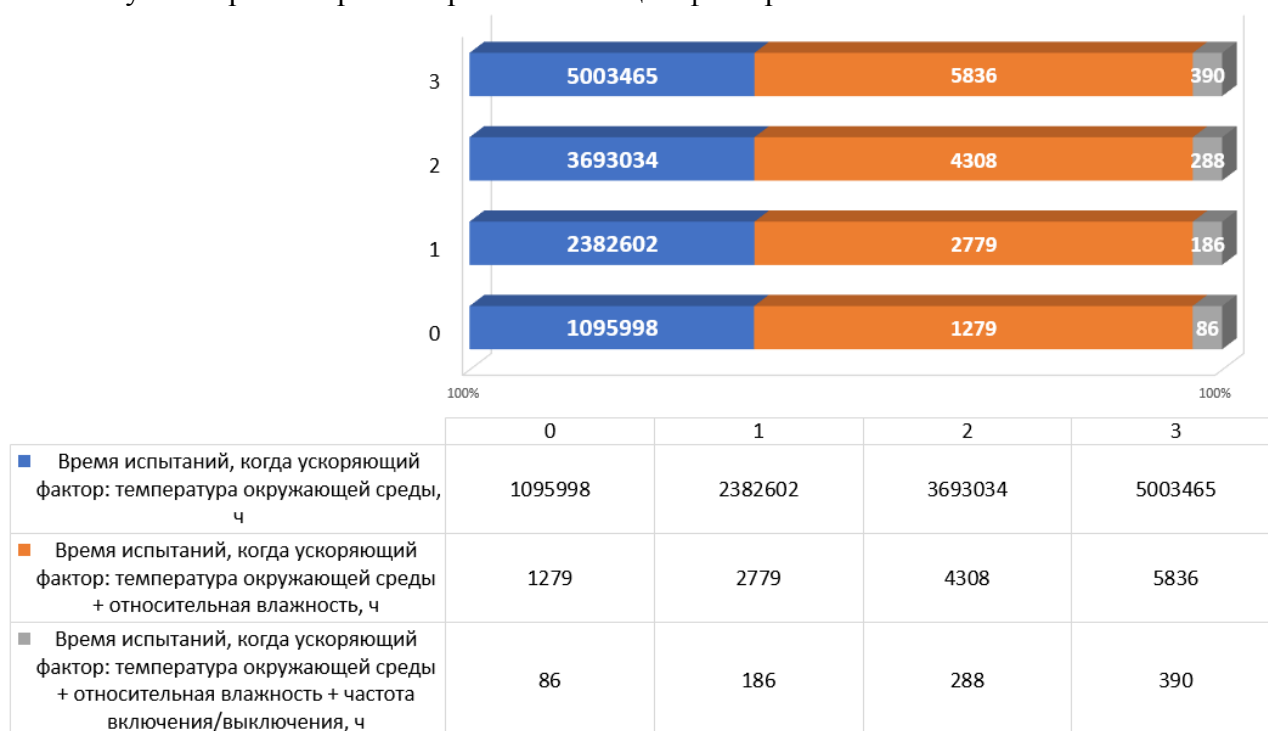


Рис. 5

Рис. 5 наглядно отображает тот факт, что значительное влияние на длительность ТП оказывают: повышенная цикличность режима работы, относительная влажность и температура окружающей среды. Если применить указанные факторы в виде воздействия на изделие одновременно, тогда длительность ТП сократится в тысячи раз и более.

Расчеты показали, что для идентификации хотя бы единственного отказа составной части ТО при коэффициенте ускорения $K_y = 1390$ необходимо проводить испытания в течение 186 ч. Однако основной задачей настоящего исследования является определение оптимальной длительности ТП изделия $t_{исп}$. В связи с этим необходимо определить оптимальный коэффициент ускорения, позволяющий сократить время испытаний, например, до трех суток (72 ч).

Согласно действующей НТД (ГОСТ Р 57394-2017), наработку ТО t_p можно оценивать с помощью следующей математической модели:

$$t_p = K_y t_{исп} \cdot \quad (15)$$

Определение срока службы t_{cc} возможно также по выражению, приведенному в ГОСТ Р 57394-2017:

$$t_{cc} = \frac{t_p}{K_{ин} \cdot 8760}, \quad (16)$$

где $K_{ин}$ — коэффициент интенсивности эксплуатации.

Воспользовавшись указанными выше формулами, получим ресурс выбранного объекта ТО УЭЭН, равный 259 000 ч. Однако примем, что для выявления одного отказа экземпляра изделия будет требоваться не 186 ч, а в 2,6 раз меньше, т.е. 72 ч. В таком случае $K_y = 3576$. Поэтому время, отведенное на проведение испытаний, значительно изменится (табл. 3).

Таблица 3

Результаты расчета времени проведения технологического прогона УЭЭН $K_v = 3576$

Число отказов	Без отказов	1 отказ	2 отказа	3 отказа
Время испытаний, ч	33	72	112	151
Наработка, ч	118479	258480	402080	542090
Срок службы, ч	43789	43633	43478	43691

Графический вид результирующей оценки длительности проведения ТП для выбранного объекта исследования УЭЭН коэффициенте ускорения 3576 приведен на рис. 6.

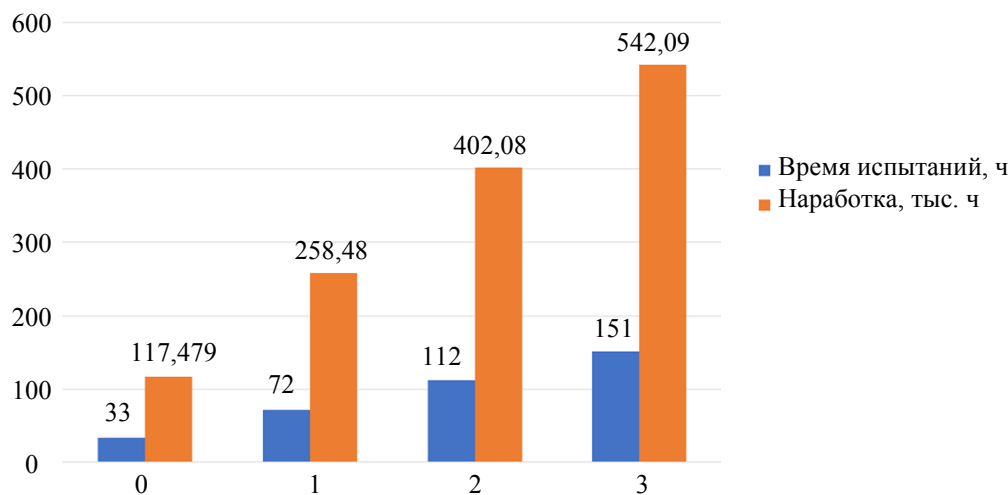


Рис. 6

Информация, приведенная на рис. 7 (представлены не округленные рассчитанные численные значения), демонстрирует, что необходимое время для проведения ТП стало меньше в 2,6 раз.

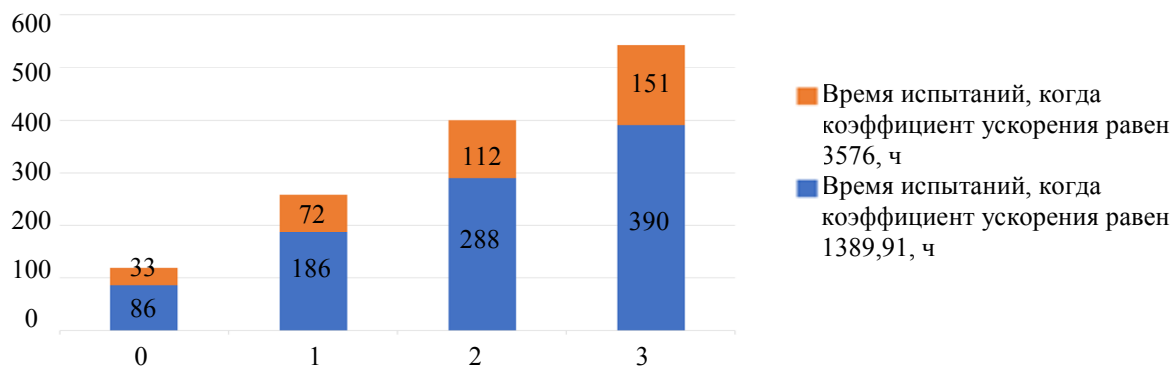


Рис. 7

В этой связи для УЭЭН как составной части ТО: 1) подтвержден срок службы, а именно 43 800 ч; 2) значительно сократилось время, необходимое для технологического прогона.

Методика оценки продолжительности технологического прогона. Проведенное исследование математических моделей, использующихся для оценки длительности ТП, позволяет заключить, что не во всех них используются коэффициенты, учитывающие влияние на показатели надежности телекоммуникационного оборудования. Следовательно, в настоящей работе рекомендуется для применения новая разработанная методика для проведения ТП (рис. 8). Она позволяет учитывать все ранее перечисленные важные ускоряющие факторы, оказывающие существенное влияние на вероятность проявления отказов и суммарной длительности работы составных частей ТО.

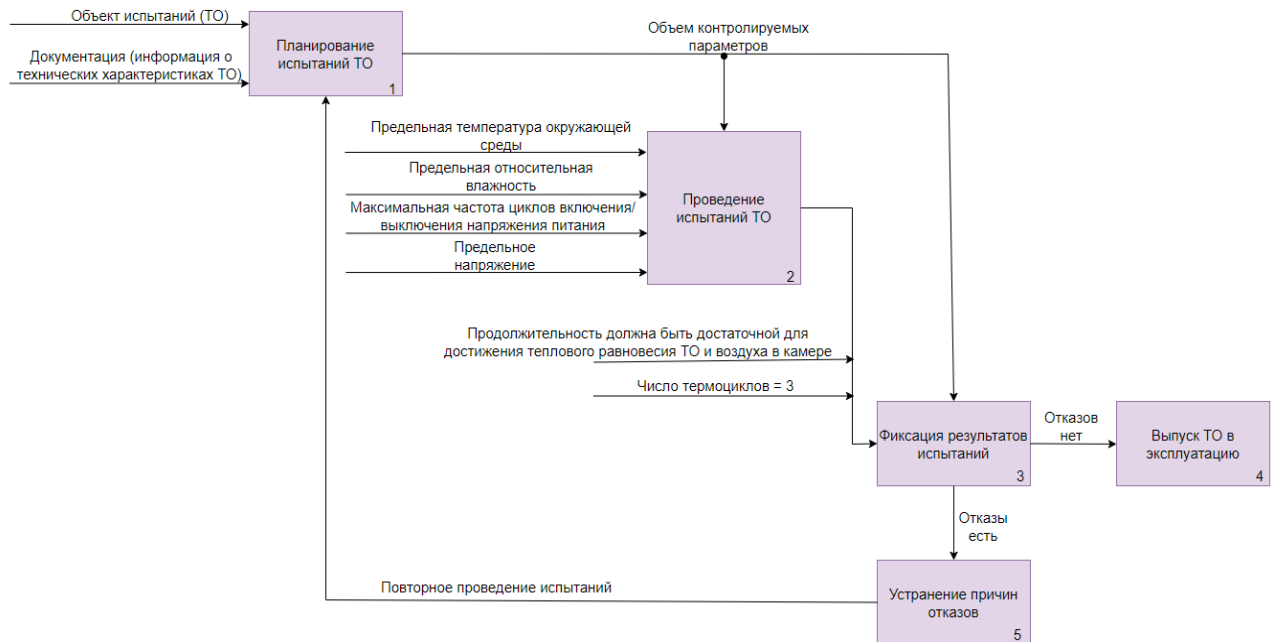


Рис. 8

Согласно действующей НТД, условия проведения испытаний, реализуемые для температуры окружающей среды $T_{\text{окр}}$ в диапазоне от $+15$ до $+35$ °C и для относительной влажности в диапазоне от 45 до 75 % относятся к нормальным климатическим условиям (НКУ). Для условий эксплуатации изделий ТО характерны следующие параметры: относительная влажность; повышенная и пониженная предельные температуры окружающей среды T_{max} и T_{min} ; рабочая температура окружающей среды $T_{\text{раб}}$; а средняя наработка до отказа и средний срок службы изделий устанавливаются согласно их техническим характеристикам.

Ускорение испытаний изделий ТО необходимо выполнять с помощью увеличения и уменьшения температуры окружающей среды относительно установленной рабочей $T_{\text{раб}}$; а также с помощью увеличения частоты циклов включения/выключения напряжения питания. Ускоренные испытания следует осуществлять последовательно за несколько этапов (рис. 9; U_{min} — пониженное напряжение питания, U_{max} — повышенное напряжение питания, *** — повышенная влажность, ^ — повышенная частота циклов включения/выключения питания).

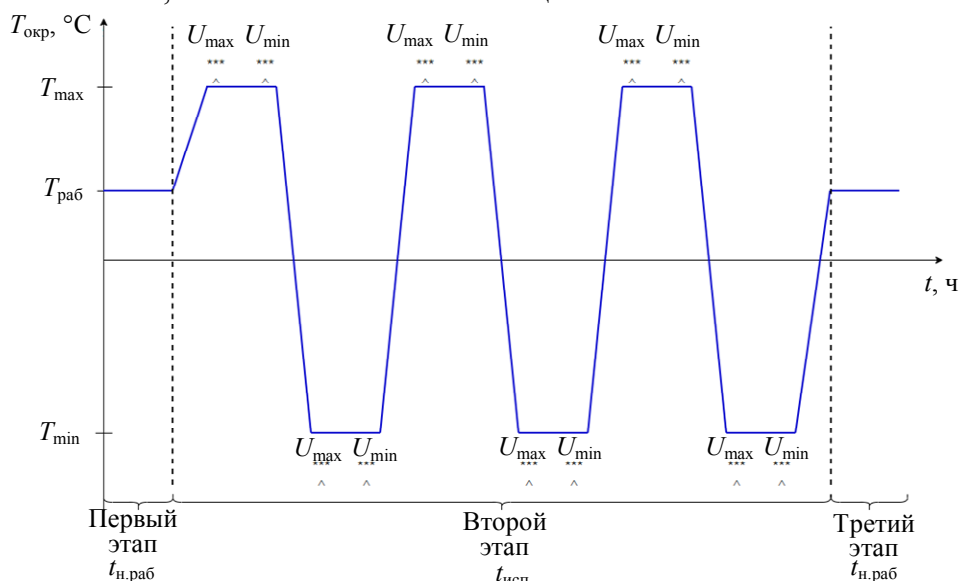


Рис. 9

Этап первый. Контроль параметров изделий ТО при установленных НКУ — для этого необходимо включить климатическую камеру и расположить внутри нее испытываемое

изделие. После прохождения испытаний изделие считается успешным, если его параметры и характеристики соответствует заявленным в паспорте или технических условиях.

Этап второй. Воздействие на изделие ТО термоциклирования и повышенной влажности. На данном этапе проводятся испытания при достижении предельных значений температуры окружающей среды и относительной влажности в режиме повышенной частоты переключения (изменения) напряжения питания. Согласно исследованию [14], рекомендуется применение трех термоциклов, которые должны соответствовать оптимальной длительности и эффективности. Для этого нужно включить климатическую камеру и расположить внутри нее испытываемое изделие. Важно соблюдать условия испытаний, а именно: установить согласно НКУ температуру внутри климатической камеры и проконтролировать ее; термоциклы необходимо проводить в пределах минимальной и максимальной рабочих температур изделия ТО; задать повышенную относительную влажность. После прохождения изделиям испытаний необходима проверка. Испытания успешны, если параметры и характеристики изделия ТО соответствует заявленным в паспорте или технических условиях, а также данным, полученным на первом этапе.

Этап третий. Дополнительный контроль параметров и характеристик изделий ТО при НКУ. Этап необходим для сравнения полученных значений с параметрами первого этапа. Для этого необходимо включить климатическую камеру и расположить внутри нее испытываемое изделие. Испытания успешны, параметры и характеристики изделия соответствует заявленным в паспорте или технических условиях, а также данным, получившимся на первом этапе.

Следует отметить, что коэффициент ускорения при форсированных испытаниях (повышенная и пониженная температура испытаний, повышенная относительная влажность, увеличенная частота циклов напряжения питания) определяется согласно математической модели (15) для получения наименьшего времени проведения испытаний (длительность испытаний для первого и третьего этапов определяется согласно ГОСТ*).

Таким образом, становится возможным детальней оценить показатели надежности изделий ТО, в частности, срок службы и среднюю наработку до отказа на втором этапе. Благодаря применению методики при проведении технологического прогона снижается число отказов изделий ТО.

Экспериментальное исследование. Для проведения эксперимента выполнена сборка выбранного ранее объекта УЭЭН (рис. 10).

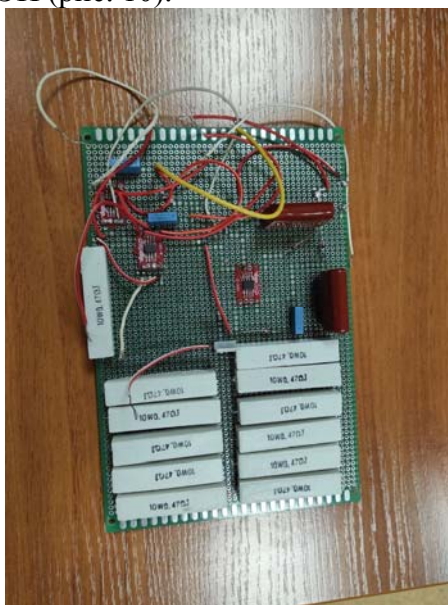


Рис. 10

* ГОСТ РВ 0020–57.306–2019. Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Методы испытаний на воздействие климатических факторов. [Дата введения 2021-01-01]. М.: Стандартинформ, 2021. 46 с.

Далее для УЭЭН адаптирована циклограмма испытаний, согласно представленной на рис. 9. На рис. 11 приведена упрощенная циклограмма для проведения экспериментального технологического прогона над УЭЭН: $T_{\max} = +80\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{раб}} = +45\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t_{\text{н.раб}} = 2\text{ ч}$ [13], $t_{\text{исп}} = 72\text{ ч}$.

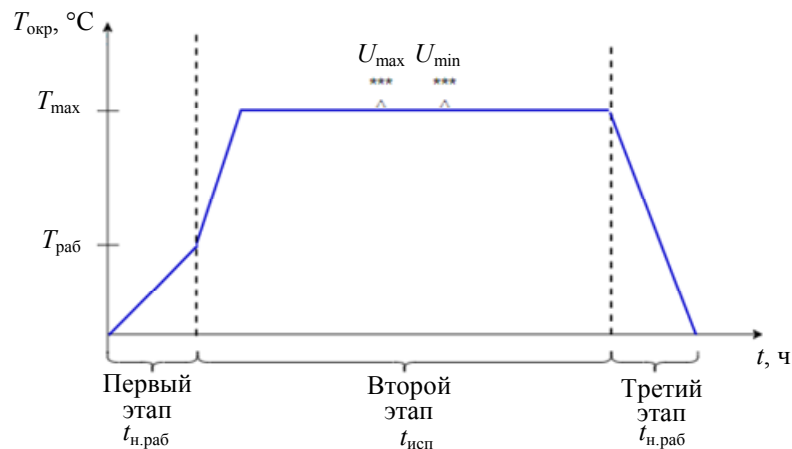


Рис. 11

Стенд для проведения эксперимента подготовлен согласно структурной схеме, приведенной на рис. 12 (КТХ — климатическая камера, БП — блок электропитания, ЦППД — цифровой прибор приема и передачи данных, АРМ — автоматизированное рабочее место).

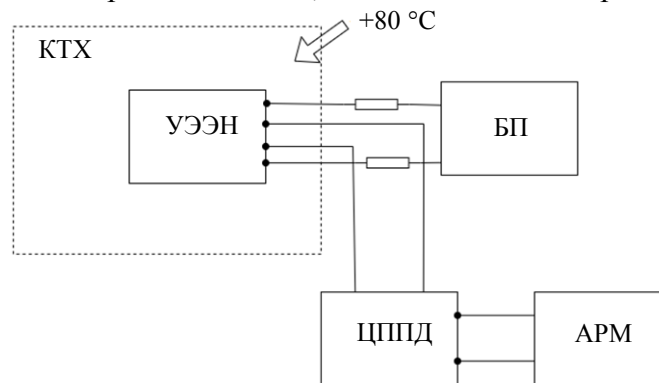


Рис. 12

На первом этапе испытаний объект УЭЭН был включен, и в течение 2 ч работал непрерывно, в это время снимались показания напряжения с изделия: в конце этапа, когда устройство достигло своей рабочей температуры $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$, напряжение питания составляло $+5\text{ В}$. На втором этапе испытаний была включена климатическая камера, в результате чего объект УЭЭН был нагрет до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ с коэффициентом ускорения, равным 3576. Когда температура достигла максимума, процесс нагрева был остановлен, и начался процесс включения/выключения устройства. На 68 ч произошел отказ драйвера полевого транзистора DD1, который позволяет управлять напряжением на затворе транзистора. Отказ драйвера полевого транзистора DD1 привел к отказу функционального узла УЭЭН. Более подробно экспериментальное исследование представлено в [15].

Таким образом, подтверждено, что предложенная в настоящей работе методика может использоваться для оценки продолжительности технологического прогона ТО.

Заключение. Работа показала важность правильного выбора длительности технологического прогона изделий телекоммуникационного оборудования. Теоретическое и экспериментальное исследование доказало, что значительное влияние на продолжительность ТП оказывает совокупность следующих факторов: увеличенная частота циклов включения/выключения изделия, повышенная относительная влажность и повышенная (или пониженная) температура окружающей среды (эксплуатации). В частности, показано, что одновременное влияние указанных факторов

при проведении ТП телекоммуникационного оборудования позволяет ускорить ТП в тысячи и более раз (в зависимости от предельных режимов работы и условий применения) по сравнению с последовательным применением единичного фактора.

Определен приемлемый уровень коэффициента ускорения для оценки оптимальной длительности технологического прогона — это позволило снизить время ТП с семи до трех дней, при этом без существенного увеличения периода износа и старения. В то же время подтверждено, что срок службы не подвергся изменению.

Предложена методика технологического прогона функционального узла ТО. Согласно ей, испытания должны проводиться в три этапа: испытания при НКУ, ускоренные испытания с одновременным ускорением по четырем факторам (температура окружающей среды, относительная влажность, частота циклов включения/выключения, напряжение питания) и повторные испытания в НКУ. Преимущество методики заключается в том, что она, благодаря использованию многофакторного форсированного режима, позволяет существенно сократить продолжительность испытаний, а также получить прогноз по показателям безотказности, долговечности и уменьшить число отказов при эксплуатации. Проведено экспериментальное исследование, по результатам которого можно сделать вывод, что методика применима для электронных модулей 1-го уровня (функционального узла ТО), входящих в состав ТО, так как рассчитанное время и коэффициент ускорения достаточны для определения времени наступления отказа. Подтверждено, что приборы полупроводниковые наиболее уязвимы к отказам за счет внешних воздействующих факторов на них.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеевский В. С., Северцев Н. А., Кузнецов В. И. и др. Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 тт. М.: Машиностроение, 1986—1990.
2. Артёмов И. И., Симонов А. С., Денисова Н. Е. Прогнозирование надежности и длительности приработки технологического оборудования по функции параметра потока отказов // Надежность и качество: тр. междунар. симп. Пенза: Изд-во ПГУ, 2010. Т. 2. С. 3—7.
3. Denson W. Handbook of 217plus reliability prediction models. RIAC. 2006.
4. Горлов М., Адамян А., Ануфриев Л. и др. Тренировка изделий электронной техники и электронных блоков // ChipNews. 2001. № 10.
5. РМ 11 0004-84. Контроль неразрушающий. Методы диагностики состояния полупроводниковых приборов по производным вольт-амперных характеристик. М.: ВНИИ „Электростандарт“, 1984. 43 с.
6. Королев П. С. Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // Изв. вузов. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 4. С. 316—328.
7. Trouble shooting Hardware and Common Issues on Catalyst 6500/6000 Series Switches Running Cisco IOS System Software [Электронный ресурс]: <<https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-6500-series-switches/24053-193.html#subtopic2a>>. (дата обращения: 18.04.2022).
8. Wilkins D. J. The Bathtub Curve and Product Failure Behavior Part One-The Bathtub Curve // Infant Mortality and Burn-in [Электронный ресурс]: <<https://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>>.
9. Строгонов А., Белых М., Пермяков Д. Анализ методов расчета эксплуатационной интенсивности отказов БИС // Электроника: наука, технология, бизнес. 2022. № 1.
10. Zaharia S., Martinescu I., Morariu C. Life time prediction using accelerated test data of the specimens from mechanical element // Eksploatacja i Niezawodnosc. 2012. N 14. P. 99—106.
11. Гербин А. Использование ускоренных методов оценки показателей надежности изделий ЭКБ отечественного производства — один из путей повышения их коммерческой привлекательности // Электроника: наука, технология, бизнес. 2019. № 9. DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.136.140.
12. Матвеевский В. П. Надежность технических систем. М., 2003. 113 с.
13. Надежность ЭРИ ИП 2006: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 52 с.

14. Бухаров А. Е., Жихарев И. А., Иофин А. А. Некоторые методические особенности технологической тренировки радиовысотометров // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2008. Т. 2. С. 116—119.
15. Создание методики технологического прогона телекоммуникационного оборудования [Электронный ресурс]: <<https://www.hse.ru/edu/vkr/628353363?ysclid=159m0dksyg753088704>>. (дата обращения: 20.06.2022).

Сведения об авторах

- Юлия Олеговна Серебрякова** — студентка; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии / Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова; E-mail: yuoserebryakova@edu.hse.ru
- Сергей Николаевич Полесский** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии / Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова; доцент; E-mail: spolessky@hse.ru
- Павел Сергеевич Королев** — канд. техн. наук; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, департамент электронной инженерии / Московский институт электроники и математики им. А. Н. Тихонова; старший преподаватель; E-mail: pskorolev@hse.ru

Поступила в редакцию 27.04.22; одобрена после рецензирования 26.05.22; принята к публикации 21.06.22.

REFERENCES

1. Avduyevskiy B.C., Severtsev N.A., Kuznetsov V.I. et al. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik* (Reliability and Efficiency in Engineering: a Handbook), Moscow, 1986–1990. (in Russ.)
2. Artyomov I.I., Simonov A.S., Denisova N.E. *Nadezhnost' i kachestvo* (Reliability and Quality), Proceedings of the International sympos., Penza, 2010, vol. 2, pp. 3–7. (in Russ.)
3. Denson W. *Handbook of 217plus reliability prediction models*, RIAC, 2006.
4. Gorlov M., Adamyan A., Anufriev L. et al. *ChipNews*, 2001, no. 10.
5. *RM 11 0004-84. Kontrol' nerazrushayushchiy. Metody diagnostiki sostoyaniya poluprovodnikovyykh priborov po proizvodnym volt-ampernyykh kharakteristik* (RM 11 0004-84. The control is Non-Destructive. Methods for Diagnosing the State of Semiconductor Devices by Derivatives of Current-Voltage Characteristics), Moscow, 1984, 43 p. (in Russ.)
6. Korolev P.S. *Journal of Instrument Engineering*, 2021, no. 4(64), pp. 316–328. (in Russ.)
7. *Troubleshooting Hardware and Common Issues on Catalyst 6500/6000 Series Switches Running Cisco IOS System Software*, <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/switches/catalyst-6500-series-switches/24053-193.html#subtopic2a>.
8. Wilkins D.J. *Infant Mortality and Burn-in*, <https://www.weibull.com/hotwire/issue21/hottopics21.htm>.
9. Strogonov A., Belykh M., Permyakov D. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2022, no. 1. (in Russ.)
10. Zaharia S., Martinescu I., Morariu C. *Eksploatacja i Niezawodnosc*, 2012, no. 14, pp. 99–106.
11. Herbin A. *Electronics: Science, Technology, Business*, 2019, no. 9, DOI: 10.22184/1992-4178.2019.190.9.136.140. (in Russ.)
12. Matveevskiy V.R. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* (Reliability of Technical Systems), 2003, Moscow, 113 p. (in Russ.)
13. *Nadezhnost' ERI IP 2006* (Reliability ERI IP 2006), Reference book, Moscow, 2006, 52 p. (in Russ.)
14. Bukharov A.E., Zhikharev I.A., Iofin A.A. *Nadezhnost' i kachestvo* (Reliability and Quality), Proceedings of the International sympos., Penza, 2008, vol. 2, pp. 116–119. (in Russ.)
15. <https://www.hse.ru/edu/vkr/628353363?ysclid=159m0dksyg753088704>. (in Russ.)

Data on author

- Yulia O. Serebryakova** — Student; HSE University, Department of Computer Engineering / Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; E-mail: yuoserebryakova@edu.hse.ru
- Sergey N. Polesskiy** — PhD; HSE University, Department of Computer Engineering / Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; Associate Professor; E-mail: spolessky@hse.ru
- Pavel S. Korolev** — PhD; HSE University, Department of Electronic Engineering / Tikhonov Moscow Institute of Electronics and Mathematics; Senior Lecturer; E-mail: pskorolev@hse.ru

Received 27.04.22; approved after reviewing 26.05.22; accepted for publication 21.06.22.