

## О ПРОЛЕГОМЕНАХ КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ МАШИН И ПРИБОРОВ

ВОЛЬФРИДА НИКОЛАЕВИЧА ТРЕЙЕРА

1. Белорусский государственная академия авиации, Минск, Беларусь
2. Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь
3. ООО «Стримцентр», Минск, Беларусь

*Предлагается продолжить забытые работы В. Н. Трейера по обеспечению надежности деталей машин и приборов, потому что использованный в них подход изучения кинетики отказов хорошо показал себя в радиоэлектронике.*

**Введение.** Важность проблемы обеспечения и повышения надежности машин и приборов не вызывает сомнений. Решением этой проблемы инженеры занялись с момента появления первой машины или прибора. С течением времени наработки в этой области распространились на радиоэлектронные приборы и аппараты. Прогнозирование надежности и долговечности машин и их деталей чаще всего проводилось с помощью усталостных испытаний деталей на долговечность. Исследования в этой области выполняли специалисты-механики. Прогнозирование же надежности радио и микроэлектронной аппаратуры с помощью ускоренных форсированных испытаний на надежность развивали специалисты-радиоэлектроники. Ниже рассмотрены наиболее интересные достижения как радиоэлектроников, так и механиков.

### Основная часть.

1. Прогнозирование надежности радио- и микроэлектроники. Особый прогресс по обеспечению и прогнозированию надежности этих объектов был достигнут в 1960-х годах в части надежности микроэлектронных приборов [1–4], что в будущем помогло создать высоконадежные микроэлектронные чипы, число компонентов которых во много раз *превышает* число деталей в машине. Этот прогресс был достигнут за счет особого подхода к надежности, названного физикой отказов. В 1975 году в СССР был издан указатель зарубежной и советской литературы [5] по физике отказов.

Методы физики отказов полагают, что пересчет результатов ускоренных форсированных испытаний прибора или микроэлектронного элемента на нормальные условия эксплуатации осуществляются путем построения линий Аррениуса (рис. 1).

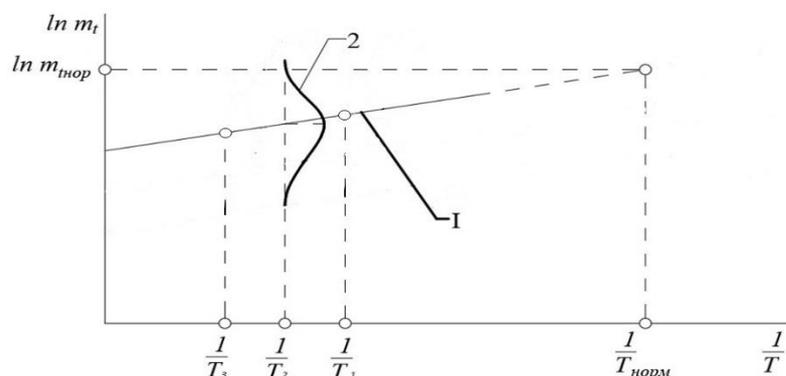


Рис. 1. Линия Аррениуса для медианной наработки

При этом полагается, что время  $t_{\chi}$ , прошедшее с начала эксплуатации элемента при некоторой абсолютной температуре  $T$ , до момента, при котором процент отказов равен некоторому заданному числу  $\chi$ , обратно пропорционально скорости  $v$  физико-химического процесса, вызывающего отказ объекта. Таким образом, при некоторых постоянных  $B_{\chi}, A_0, E, G$

$$t_{\chi} = \frac{B_{\chi}}{V}, \quad (1)$$

где

$$V = A_0 \exp\left(-\frac{E}{GT}\right). \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой зависимость скорости  $v$  химической реакции износа объекта от температуры  $T$  (в градусах Кельвина) и называется уравнением Аррениуса. В нем  $E$  – это введенное Сванте Аррениусом понятие энергии активации, а  $G$  – универсальная газовая постоянная (константа, численно равная работе расширения одного моля идеального газа в изобарном процессе при увеличении температуры на 1 градус Кельвина).

Энергия активации  $E$  в свою очередь – это эмпирически определяемый параметр, характеризующий показательную зависимость константы скорости реакции от температуры (выражается в джоулях на моль).

Логарифмируя (1) после подстановки в него (2), получим уравнение линии Аррениуса при некотором проценте отказов  $\chi$ :

$$\ln t_{\kappa} = \ln \frac{B_{\kappa}}{A_0} + \frac{E}{G} \cdot \frac{1}{N}. \quad (3)$$

На рис. 1 показана линия Аррениуса, построенная для трех температур испытаний  $T_1, T_2$  и  $T_3$  ( $T_3 > T_2 > T_1$ ), по которой можно прогнозировать  $m_{\text{норм}}$  – среднюю наработку до отказа при проценте отказов  $\chi = 50\%$  (медианную наработку, как ее принято именовать в американской литературе [1; 4]) объекта при нормальной температуре эксплуатации  $T_{\text{норм}}$ .

При этом на рис. 1 линия Аррениуса помечена цифрой 1, а плотность распределения наработки до отказа при температуре  $T_2$  – цифрой 2. Для оценки с помощью линии Аррениуса характеристики  $m_t$  распределения времени работы объекта до отказа, соответствующей нормальным условиям эксплуатации, такие же характеристики для каждой из температур ускоренных испытаний отмечаются точками в координатах  $\left(\ln t, \frac{1}{T}\right)$ . Затем через полученные точки проводится прямая (линия Аррениуса) (3). Далее эта линия продляется в область нормальных температур  $T_{\text{норм}}$ .

**2. Прогнозирование надежности и долговечности машин и их деталей с помощью усталостных испытаний на долговечность.** На наш взгляд, особый интерес в этой области представляют собой работы В. Н. Трейера, который еще в 1931 году [6] занялся проблемой оценки надежности и долговечности деталей машин в нормальных условиях эксплуатации с помощью ускоренных форсированных их испытаний и системно изложил их в 1964 году в монографии [7]. Развитие своих идей, заложенных в [6], В. Н. Трейер продолжил в работах [7–14]. При этом проведенные им исследования общих причин и закономерностей

развития отказов позволили ему создать стройную теорию, которую сам В. Н. Трейер назвал кинетической теорией долговечности и надежности маши и приборов [12–14]. Большое внимание в этой теории В. Н. Трейер уделял аргументации всеобщности ее пролегомен [13], под которыми он понимал рассуждения, формулирующие исходные понятия и дающих предварительные сведения о теории.

Согласно этой теории долговечность (расчетный срок службы  $T_{cc}$ ) деталей машин и приборов (ДМП) определяется формулой [4]

$$T_{cc} = \tau_0 \left( 1 + \frac{U_0 - \gamma X}{fkT} \right)^f, \quad (4)$$

где  $f$  – частота энергетических флуктуаций, порожденных активацией тепловых колебаний атомов материала ДМП;

$\tau_0$  – длительность сублимации;

$U_0$  – энергия сублимации (сублимация или возгонка – это переход вещества из твердого состояния в газообразное без пребывания в жидком состоянии);

$X$  – напряженность эксплуатационного (нагрузочного) воздействия; воздействия;

$\gamma$  – коэффициент приведения  $X$  к его энергетическому эквиваленту;

$T$  – температура в градусах Кельвина;

$k$  – постоянная Больцмана.

При этом выражение (4) вытекает из следующих температурно-временных соотношений:

$$fkTT_{cc} = \gamma XT_{cc} = \tau_0 U_0 = const. \quad (5)$$

Если  $c_1$  – скорость реакции материала на воздействие  $X_1$  при соответствующем значении температуры  $T_1$ , выдерживаемая материалом лишь в течение времени  $(T_{cc})_1$ , где

$$X_1 / (T_{cc})_1 = c_1, \quad (6)$$

то температурно-временные соотношения (5) приводят к общеизвестной формуле скорости протекания физико-химических реакций Сванте Аррениуса (у В. Н. Трейера – формуле химической кинетики о скоростях течения реакций) (2), которая у В. Н. Трейера в (13) записана в виде

$$c_1 = c_0 \exp\left(-\frac{B}{T_1}\right), \quad (7)$$

в которой  $c_0$  и  $B$  – параметры, характеризующие физическое состояние реальных ДМП при предельно-высоких допустимых скоростях  $c_1$  течения в них термоактивационных процессов, принимаемых за основу при оценке их долговечности [12] (в [14] – работоспособности).

В [14] была сделана попытка применить идеи В. Н. Трейера к изделиям радиоэлектроники – конденсаторам. Для этого определялось значение такой величины предельно-форсированной нагрузки  $X_f$ , которая не выводила бы объект испытаний из течения физических явлений, протекающих в объекте в нормальных эксплуатационных условиях работы [14].

Другими словами, В. Н. Трейер добивался автоточности (одинаковости) течения процесса износа детали в нормальных условиях и условиях испытаний. Значение  $X_f$  В. Н. Трейер определял [14] при помощи ступенчатого нагружения объекта испытания методом суммирования частей утраты его ресурса под разными по величине нагрузками. При этом считалось, что разные нагрузки связаны соотношением

$$X = X_f \left( \frac{t_{mf}}{t_m} \right)^{1/k_1}, \quad (8)$$

где  $X$  и  $X_f$  – эксплуатационное расчетное и форсированное нагрузочные воздействия;

$t_m$  и  $t_{mf}$  – соответственно медианные сроки службы;

$k_1$  – некоторый коэффициент, принимаемый ориентировочно с последующим его уточнением.

Согласно [14] допускаемая вероятность отказа испытуемого объекта  $q(t)$  равна

$$q(t) = \exp(-at^{-b}), \quad (9)$$

где  $a$  и  $b$  – параметры распределения (9), определяемые опытным путем. Тогда расчетный срок службы  $T_{cc}$  испытуемого объекта (детали) равен

$$T_{cc} = \frac{t_{mf}}{z} \left( \frac{X_t}{X} \right), \quad (10)$$

где

$$z = \left[ \frac{\lg q(t)}{\lg 0,5} \right]^{1/b}. \quad (11)$$

Анализируя формулу (9), несложно заметить, что она является модификацией формулы общеизвестного экспоненциального распределения, в которой время  $t$  в отличие от общеизвестной формулы возводится в степень « $-b$ ».

Определяемая опытным путем предельно допустимая форсированная нагрузка  $X_f$  при ступенчатом нагружении рассчитывается как [14]

$$X_f = \left( \sum_{s=1}^n \frac{t_s X_s^k}{t_{mf}} \right)^{1/k_1}, \quad (12)$$

где  $t_s$  и  $X_s$  – соответственно длительность выдержки на  $s$ -й ступени нагружения и нагрузка на этой ступени при общем числе ступеней  $n$ . Таким образом в [14] была показана возможность применения в радиоэлектронике идей В. Н. Трейера, разработанных им для механики.

**Заключение.** Анализ наиболее интересных работ в области прогнозирования надежности объектов радиоэлектроники (п. 1 этой статьи) и механики (п. 2) показывает общность примененного в них подхода – исследование кинетики отказов. Поскольку этот подход хорошо показал себя в радиоэлектронике, на наш взгляд следует продолжить развитие идей В. Н. Трейера для обеспечения надежности деталей машин и приборов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nelson, W. Graphical analysis of accelerated life test data with a mix of failure modes/ W. Nelson // IEEE Transactions on Reliability. – 1975. – Vol. R-24. – No. 4. – P. 230–237.
2. Сотсков, Б. С. Физика отказов и определение интенсивности отказов / Б. С. Сотсков // О надежности сложных технических систем: сб. науч. трудов. – М.: Советское Радио, 1966. – 324 с. – С. 289–306.
3. Гречин, Д. Н. Подход к оценке надежности интегральных схем на основе изучения физики отказов / Д. Н. Гречин // Технические средства управления и вопросы их надежности: сб. статей / Памяти чл.-кор. АН СССР Б. С. Сотскова / АН СССР; М-во приборостроения, средств автоматизации и систем управления СССР; Ин-т проблем управления (автоматики и телемеханики). – М.: Наука, 1974. – 207 с. – С. 171–178.
4. Vaccaro, J. Semiconductor reliability within the U. S. Department of defence / J. Vaccaro // Proceedings of the IEEE. – 1974. – Vol. 62. – No. 2. – P. 162–184.
5. Физика отказов: (Указ. рус. и иностр. литературы) / сост.: Е. О. Вильдт, В. В. Яшина / науч. ред. И. Е. Декабрун, Б. И. Филипович. – М.: АН СССР, Библиотека по естественным наукам, Библиотека технической литературы, 1975. – 69 с.
6. Трейер, В. Н. Шарико- и роликотопдишпники в автомобиле и тракторе: руководство по монтажу и уходу для техников и механиков / В. Н. Трейер. – М.-Л.: Государственное издательство сельскохозяйственной и колхозно-кооперативной литературы, 1931. – 59 с.
7. Трейер, В. Н. Теория надежности и долговечности машин / В. Н. Трейер. – Минск : Наука и техника, 1964. – 136 с.
8. Трейер, В. Н. Основные вопросы теории долговечности машин / В. Н. Трейер. – Труды Таллинского политехнического института, серия А. – № 42 – Таллин: Эстон. гос. изд., 1953. – 31 с.
9. Трейер, В. Н. О методике исследования и расчета долговечности машин и их деталей / В. Н. Трейер. – Труды Таллинского политехнического института, серия А. – № 49. – Таллин: Эстон. гос. изд., 1953. – 31 с.
10. Трейер, В. Н. Расчеты деталей машин на долговечность / В. Н. Трейер. – М.: Машгиз, 1956. – 134 с.
11. Трейер, В. Н. Совмещенный расчет надежности и долговечности механизмов радиоэлектронной аппаратуры: Пособие по вопросам надежности и долговечности, предусмотренным программами по курсам «Конструирование механизмов радиоэлектронной аппаратуры» и «Механика» / В. Н. Трейер. – Минск : МРТИ, 1970. – 49 с.
12. Трейер, В. Н. Кинетические основы теории надежности и долговечности машин и приборов / В. Н. Трейер // Доклады АН БССР. – 1974. – Т. 18. – № 4. – С. 333–336.
13. Трейер, В. Н. Аргументация всеобщности пролегомен кинетической теории надежности и долговечности машин и приборов / В. Н. Трейер // Доклады АН БССР. – 1976. – Т. 20. – № 2. – С. 130–133.
14. Трейер, В. Н. Ускоренное испытание керамических конденсаторов для совмещенной оценки их надежности и долговечности / В. Н. Трейер, В. С. Рыбов // Доклады АН БССР. – 1974. – Т. 18. – № 5. – С. 425–427.

*Поступила 04.10.2023*