

# Новые горизонты применения в теории надежности высоконадежных систем гипотезы Н. М. Седякина

д.т.н. В. А. Смагин, к.т.н. В. С. Солдатенко  
Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, Россия  
va\_smagin@mail.ru, soldatenko\_vs@mail.ru

**Аннотация.** Сформулированы и подтверждены теоретическими соотношениями предложения по ослаблению ряда допущений, на основе которых сформулирована гипотеза Н. М. Седякина. Предложены направления адекватного использования данного научного положения по отношению к новым, ранее не рассматриваемым объектам. К ним относятся информационные и эргатические системы, программное обеспечение вычислительных комплексов. Описанные подходы позволяют обосновать результаты ускоренных испытаний на надежность достаточно широкого круга высоконадежных объектов.

**Ключевые слова:** надежность объектов, физические принципы надежности, ускоренные испытания, интенсивность отказов, ресурс надежности.

## ВВЕДЕНИЕ

В теории надежности технических объектов важное место заслуженно занимает место гипотеза Н. М. Седякина [1]. Внимание к данному научному положению и возможностям его практического применения не ослабевает как в нашей стране [2–7], так и за рубежом [8–10]. Это обусловлено ясным физическим смыслом, достаточной простотой и логической завершенностью полученных теоретических результатов и возможностью их экспериментальной проверки. Интерес к указанной гипотезе возрос в последние десятилетия. Это обусловлено двумя основными причинами. Во-первых, современный уровень развития техники и технологий позволяет достигнуть значения интенсивности  $\lambda(t)$  отказов элементов радиоэлектронной аппаратуры, близкие к  $10^{-9}$  час<sup>-1</sup>, а ресурсов электронных объектов — к десяткам тысяч часов. В этих условиях за практически приемлемое время экспериментально убедиться в обеспечении задаваемых в тактико-техническом задании (ТТЗ) или техническом задании (ТЗ) показателях надежности создаваемых изделий не представляется возможным. Одним из направлений решения этой актуальной задачи является оценивание значений требуемых показателей по результатам анализа безотказности (долговечности) элементов в условиях более тяжелых по сравнению с номинальными. В этом направлении получены значительные частные результаты (их анализ представлен далее). Однако гипотезу Н. М. Седякина отличает более высокий уровень общности сформулированных положений. Во-вторых, выяснилось, что рассматриваемый научный результат имеет более высокий уровень универсальности своего применения относительно той сферы, для которой он был первоначально сформулирован, и может быть успешно использован для приложений, которые ранее не рассматривались ни в

теоретическом, ни в практическом приложениях. Вместе с тем это требует уточнения областей обоснованного применения рассматриваемого научного положения, а также проведения анализа отдельных его положений для обеспечения адекватности теоретического обобщения гипотезы Н. М. Седякина в новых направлениях. Именно на решение этих вопросов нацелена данная статья.

## РОЛЬ И МЕСТО ГИПОТЕЗЫ Н. М. СЕДЯКИНА В ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ ВЫСОКОНАДЕЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Для описания взаимосвязи между внешними нагрузками и показателями надежности в настоящее время широко используются модели процессов разрушения [11]. Подходы, базирующиеся на их основе, позволяют оценивать интервал времени, в течение которого объект может противостоять заданной нагрузке до отказа, вызванного износом. Установлено, что наиболее точными моделями разрушения являются те из них, которые описывают физику процессов, приводящих к отказу элемента на уровне структуры или молекулярном уровне. Их называют структурными моделями закрытой формы, составными моделями или моделями физики процессов, приводящих к отказу [11]. Недостатком указанных моделей является их высокая сложность и по этой причине сравнительно узкая область применения. Отдельным важным видом модели разрушения является эмпирическая модель. Эмпирические модели математически описывают данные, собранные в процессе испытаний и эксплуатации определенных типов элементов. Наиболее широкое распространение нашли формы моделей, представленные на рисунке 1.



Рис 1. Формы эмпирических моделей разрушения

В основе первой из указанных моделей лежит уравнение зависимости интенсивности реакции инверсии сахарозы от температуры, полученное экспериментально нобелевским лауреатом в области химии С. Аррениусом (S. Arrhenius). Им был введен коэффициент ускорения времени указанной реакции с учетом изменения воздействующей температуры. К настоящему времени известно, что полученная закономерность также применима для оценивания характеристик отказов элементов микроэлектроники и ряда других типов объектов [12].

Следует отметить, что выполнение закона Аррениуса отвечает условиям линейной экстраполяции результатов испытаний с области повышенных температур на нормальные условия функционирования интегральных схем. Модель обратного степенного закона описывает ресурс системы, который, как предполагается, обратно пропорционален воздействующей нагрузке. Различные формы обратного степенного закона разработаны для конкретных применений. Развитием рассмотренных подходов является модель Эйринга. Она связывает с интенсивностью отказов интегральных схем не только повышение температуры, но и напряжение смещения. Недостатком приведенных видов эмпирических моделей является сравнительно узкая область их использования, обусловленная условиями доступности результатов проводимых экспериментальных исследований для конкретных типов объектов.

Значительно более общий характер имеют теоретические построения для обоснования ускоренных и форсированных испытаний. Основными из них являются так называемые физические принципы теории надежности. Наиболее широкое применение нашли принцип (гипотеза) Н. М. Седякина, гипотеза Майнера — Палмгрена и принцип наследственности. Гипотеза, сформулированная профессором Н. М. Седякиным, позволила найти объяснение многим ранее полученным экспериментальным результатам при исследовании электронных компонентов. Вторая из указанных гипотез описывает процесс линейного суммирования повреждений. Данное научное положение было сформулировано в период, когда изучение усталостных явлений только началось. Эта гипотеза не учитывает историю нагружения на объект и последовательность ступеней нагрузки. Позже Г. Д. Карташовым и А. И. Перроте на основе гипотезы Н. М. Седякина было сформулировано более общее научное положение — «принцип наследственности производства» [13]. Указанный принцип является достаточно продуктивным в решении ряда частных практических задач ускоренных испытаний отдельных видов изделий.

Следует отметить, что за время, прошедшее с момента формулирования принципа Н. М. Седякина, были проведены многочисленные экспериментальные исследования по проверке его справедливости. Эти опыты позволили, в целом, определить границы его действия. Было установлено, в частности, что в области небольших изменений нагрузочных факторов, действующих на радиоэлектронную аппаратуру (РЭА), данный физический принцип надежности, как правило, выполняется удовлетворительно, но в области значительных их изменений может выполняться неудовлетворительно. Объяснение этому результату пока полностью не дано. Также следует отметить, что возможности гипотезы Н. М. Седякина к настоящему

времени раскрыты далеко не полностью. Перейдем к анализу горизонтов действия этого важного научного положения.

#### АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ГИПОТЕЗЫ Н. М. СЕДЯКИНА

Рассмотрим предварительно общую формулировку гипотезы Н. М. Седякина. Обозначим через  $\varepsilon$  конкретные условия применения элементов РЭА при эксплуатации. Под этими условиями понимаются механические, электрические, тепловые и иные нагрузки, воздействующие на объект со стороны внешней для него окружающей среды. Тогда выражение для вероятности  $P(t/\varepsilon)$  безотказной работы объекта с учетом условий  $\varepsilon$  его эксплуатации можно записать в следующем виде:

$$P(t/\varepsilon) = \exp \left[ - \int_0^t \lambda(z/\varepsilon) dz \right], \quad (1)$$

где  $\lambda(t)$  — интенсивность отказов объекта в момент времени  $t$  при условиях  $\varepsilon$  его эксплуатации.

Значение показателя степени в правой части соотношения (1) получило название ресурса (запаса) надежности  $r(t/\varepsilon)$ , выработанного объектом за время  $t$  в условиях  $\varepsilon$  эксплуатации [1]. Таким образом, можно записать:

$$r(t/\varepsilon) = \int_0^t \lambda(z/\varepsilon) dz. \quad (2)$$

Профессором Н. М. Седякиным было сформулировано следующее утверждение (гипотеза) [1]: «существует множество условий, в котором надежность объекта в будущем зависит от величины запаса надежности (ресурса), выработанного в прошлом, и не зависит от того, как выработан этот ресурс».

Пусть  $\varepsilon_1$  характеризует условия, при которых интенсивность отказов объекта по техническим условиям (ТУ) равна  $\lambda_1(t/\varepsilon_1)$ . Условия  $\varepsilon_2$  соответствуют повышенной нагрузке на объект, интенсивность его отказов при этом равна  $\lambda_2(t/\varepsilon_2)$ . Очевидно, что при этом справедливо неравенство:

$$\lambda_1(t/\varepsilon_1) < \lambda_2(t/\varepsilon_2). \quad (3)$$

За интервал времени  $t_1$  при установленной ТУ нагрузке  $\varepsilon_1$  вырабатывается ресурс надежности  $r_1(t_1/\varepsilon_1)$ . Такой же ресурс может быть выработан при условиях  $\varepsilon_2$  при ином значении времени  $t_2$ . Ясно, что при этом справедливо условие  $t_1 > t_2$ . Следовательно, определив при повышенной нагрузке  $\varepsilon_2$  показатели надежности объекта, можно за гораздо меньшее время определить расход его ресурса надежности в условиях эксплуатации по ТУ. Математически гипотеза Н. М. Седякина может быть представлена в виде соотношения

$$P(t/r) = P_1(t/x_1) = P_2(t/x_2), \quad (4)$$

где  $P(t/r)$  — вероятность безотказной работы объекта за интервал времени  $t$  при условии, что его израсходованный ресурс надежности равен  $r(x, \varepsilon)$ ; интервалы времени  $x_1$  и  $x_2$  удовлетворяют интегральному соотношению

$$r(x, \varepsilon) = \int_0^{x_1} \lambda(z, \varepsilon_1) dz = \int_0^{x_2} \lambda(z, \varepsilon_2) dz. \quad (5)$$

Зададим условия  $\varepsilon$  работы объекта в следующем виде:

$$\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon_1, & 0 < z \leq t_1; \\ \varepsilon_2, & t_1 < z \leq (t_1 + t_2). \end{cases} \quad (6)$$

Тогда интенсивность  $\lambda(z, t_2, t_1)$  его отказа в интервале  $(t_1, t_1 + t_2)$  удовлетворяет соотношению

$$\lambda(z, t_2, t_1, \varepsilon_1) = \lambda(z + t_2 - t_1, \varepsilon_2), \quad (7)$$

где  $t_2$  находится в результате решения относительно этого показателя уравнения:

$$\int_0^{t_2} \lambda(z, \varepsilon_2) dz = \int_0^{t_1} \lambda(z, \varepsilon_1) dz. \quad (8)$$

Таким образом, с помощью соотношений (1)–(8) сравнительно просто получить значения оценок надежности исследуемых объектов с учетом действующих на них нагрузок. Однако достигается такая кажущаяся простота использованием достаточно жестких предположений. Ослабление некоторых из них может привести к расширению области применения гипотезы Н. М. Седякина. Рассмотрим основные направления развития данной гипотезы.

НАПРАВЛЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ОБОБЩЕНИЯ ГИПОТЕЗЫ Н. М. СЕДЯКИНА

Основные возможные направления развития гипотезы Н. М. Седякина представлены на рисунке 2.

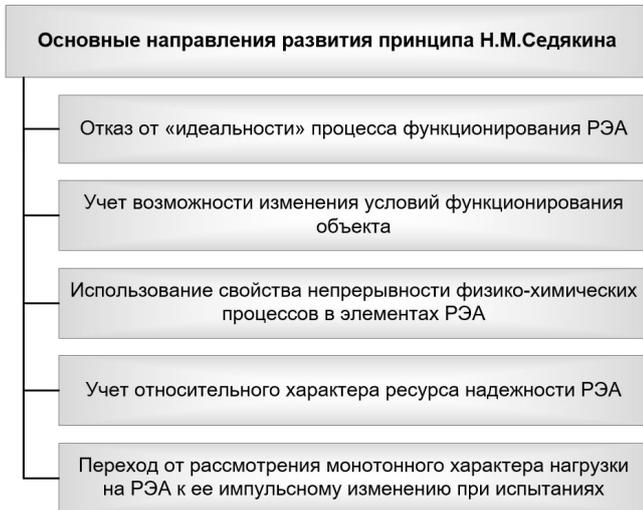


Рис. 2. Направления коррекции гипотезы Н. М. Седякина

Первым направлением теоретического обобщения гипотезы Н. М. Седякина является ослабление допущения о том, что при любом распределении времени до отказа объекта случайный ресурс его надежности распределен экспоненциально. Указанное допущение приводит к выводу о том, что процесс расходования ресурса надежности объекта является марковским. Однако такое допущение соответствует только идеализированным процессам функционирования технических объектов. Следовательно, для определения возможности увеличения области применимости гипотезы Н. М. Седякина, необходимо проанализировать справедливость ее применения для ресурса надежности объектов с рассмотрением более широкого класса распределений.

Второе направление состоит в следующем. Функция ресурса (запаса) надежности объекта, описываемая выражением (2), зависит от двух аргументов —  $t$  и  $\varepsilon$ . Однако при исследовании свойств ресурса надежности ранее этот показатель рассматривался как функция, у которой переменная  $t$  изменяется во времени, а нагрузка  $\varepsilon$  остается неизменной. Это соответствует частному случаю, когда заранее заданы интенсивности отказа исследуемого объекта для рассматриваемых фиксированных значений нагрузки. Для увеличения общности гипотезы в данном случае следует рассмотреть утверждение о том, что ресурс надежности объекта, как реализация случайной величины, не является неизменным при различных нагрузках. Его значение может зависеть как от увеличения нагрузки, так и от характера ее изменения.

Третье направление состоит в том, чтобы использовать свойство непрерывности физико-химических процессов, протекающих в материалах элемента. Это приводит к возможности для расчетов надежности применять гипотезу Н. М. Седякина не только с применением интегральной формы расчета вероятности безотказной работы исследуемого объекта, но и перейти к ее интегрально-дифференциальной форме. Поясним это следующим образом. Пусть для элемента установлено два режима  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  работы, отличающиеся уровнями нагрузки для него. Установим, что режим  $\varepsilon_2$  характеризуется большим уровнем нагрузки на элемент по сравнению с нагрузкой при режиме  $\varepsilon_1$ , соответствующим ТУ на объект. В этом случае ресурс надежности элемента при использовании режима  $\varepsilon_2$  может быть выражен через ресурс надежности при использовании режима  $\varepsilon_1$  с помощью соотношения [14]

$$\int_0^{x(t)} \lambda(z, \varepsilon_2) dz = \int_0^t \sum_{i=0}^{\infty} \frac{\partial \lambda^i(z, \varepsilon_1)}{i! \partial \varepsilon_1^i} (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^i dz. \quad (9)$$

Выражение (9) нетрудно представить в следующем виде:

$$\int_0^{x(t)} \lambda(z, \varepsilon_2) dz = \sum_{i=0}^{\infty} \frac{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^i}{i!} \int_0^t \frac{\partial \lambda^i(z, \varepsilon_1)}{\partial \varepsilon_1^i} dz. \quad (10)$$

В дальнейшем при сохранении общности рассуждений и для упрощения выкладок можно ограничиться только двумя первыми членами ряда в правой части соотношения (10). При сделанном допущении получим соотношение для интенсивности отказов  $\lambda(t, \varepsilon_2)$  элемента в режиме использования  $\varepsilon_2$ . Выполняя операцию дифференцирования для двух частей формулы (10), имеем следующее соотношение [14]:

$$\lambda(t, \varepsilon_2) = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} \times \left( \lambda\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} t, \varepsilon_1\right) + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \frac{\partial \lambda\left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} t, \varepsilon_1\right)}{\partial \varepsilon_1} \right). \quad (11)$$

Значительный практический интерес имеет переход от более нагруженного режима  $\varepsilon_2$  к режиму  $\varepsilon_1$  по ТУ. Поэтому целесообразно, используя выражение (11), получить соотношение для интенсивности отказов  $\lambda(t, \varepsilon_1)$  элемента в режиме использования  $\varepsilon_1$ . Искомая расчетная формула для показателя  $\lambda(t, \varepsilon_1)$  имеет следующий вид:

$$\lambda(t, \varepsilon_1) = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \times \left( \lambda\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} t, \varepsilon_1\right) + (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \frac{\partial \lambda\left(\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} t, \varepsilon_2\right)}{\partial \varepsilon_2} \right). \quad (12)$$

Выражения (11) и (12) позволяют обоснованно корректировать значения интенсивностей отказов элементов РЭА на основе результатов их испытаний.

**Четвертое направление.** Выражение (5) для значения ресурса  $r(t, \varepsilon)$  надежности исследуемого элемента имеет статистический характер и не может быть абсолютным для любой нагрузки. Этот показатель должен иметь относительный характер по отношению к некоторому (базовому) значению  $\varepsilon_0$  интенсивности отказов рассматриваемого типа элементов РЭА. Такое допущение приводит к тому, что показатель  $r(t, \varepsilon)$  элемента в режиме  $\varepsilon$  должен зависеть не только от значения времени  $t$ , но и от режима  $\varepsilon_0$ , принимаемого за начало отсчета.

**Пятое направление.** Выражение (5) для значения ресурса  $r(t, \varepsilon)$  надежности элемента РЭА предполагает постоянство условий  $\varepsilon$  на интервале испытаний. Известно, что на практике интенсивность отказов элементов аппаратуры существенно возрастает при резких кратковременных перепадах нагрузки. Это предполагает проведение исследований в направлении учета импульсного характера воздействий на объект исследования.

Несомненно, приведенные направления развития гипотезы Н. М. Седякина потребуют проведения не только теоретических, но и ряда экспериментальных исследований. Рассмотрим теперь возможности использования данной гипотезы, отличающиеся постановкой решаемых задач.

#### ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГИПОТЕЗЫ Н. М. СЕДЯКИНА

Основные возможности применения гипотезы Н. М. Седякина в сферах, отличных от надежности элементной базы РЭА, представлены на рисунке 3.



Рис. 3. Новые возможности применения гипотезы Н. М. Седякина

Понятие надежности технических и иных объектов не является застывшим и неизменным. В настоящее время

предлагаются различные подходы по расширению этого сложного свойства [15]. Не остается в стороне от этого процесса и гипотеза Н. М. Седякина. Достаточно новым является ее использование при анализе безопасности, надежности и качества продукции высоких технологий на основе статистики ускоренных испытаний [16].

Достаточно часто данный физический принцип надежности используется в своей исходной трактовке, но применительно к новым видам технических объектов, существенно отличающихся от элементной базы РЭА [17, 18]. Еще более интересным является применение гипотезы Н. М. Седякина для объектов нетехнической природы. Оказалось, что достаточно приемлемые для практики результаты можно получить при анализе надежности человека-оператора с учетом уровня его обучения [19]. Аналогичный подход использовался также для оценивания системы предотвращения нештатных ситуаций в эргатических системах управления на транспорте [20].

Огромные возможности таятся в применении гипотезы Н. М. Седякина в области надежности программного обеспечения (ПО) современных вычислительных систем. Можно выделить два направления этой работы:

- ускоренное определение показателей качества ПО при принудительном форсировании среды функционирования проверяемых программ, например за счет повышения быстродействия технической составляющей вычислительной системы [21];

- оценивание показателей безотказности и долговечности информационных систем различного назначения на основе принципа Н. М. Седякина, когда при расчетах учитываются особенности редящих нестационарных импульсных потоков дефектов ПО этих систем [22, 23].

Таким образом, можно сделать следующие важные выводы:

1. В теоретическом плане у гипотезы профессора Н. М. Седякина имеются значительные резервы, использование которых позволит значительно обогатить теорию и практику ускоренных испытаний высоконадежных объектов.

2. В условиях развития современной техники, прежде всего автоматизированной, рассматриваемый физический принцип надежности может найти достаточно широкое применение к таким объектам исследования, как программное обеспечение информационных систем.

3. Имеющиеся разработки позволяют говорить об определенной адекватности моделей эргатических систем, построенных на основе гипотезы Н. М. Седякина.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенные в статье направления развития гипотезы Н. М. Седякина позволяют существенно снизить достаточно жесткие требования к исходным допущениям, в рамках которых ранее рассматривалось применение данного научного положения. Это позволит расширить возможности организации и проведения ускоренных испытаний высоконадежных технических объектов.

Обобщенные в материалах статьи возможности применения гипотезы Н. М. Седякина говорят о том, что сфера ее использования намного шире, чем это предполагалось ранее. Несомненно, что следует продолжить работу в данном направлении, определять объекты различной физической природы и принципа действия, для которых окажутся

справедливыми условия применения рассмотренных научных выводов.

Предложенные подходы, как представляется, будут полезны специалистам по надежности технических объектов и программному обеспечению информационных систем, а также специалистам, изучающим свойства эргатических систем.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Седякин, Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности // Известия Академии наук СССР. Техническая кибернетика. 1966. № 3. С. 80–87.
2. Гишваров, А. С. Моделирование ускоренных испытаний технических систем на надежность и ресурс // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2007. Т. 9, № 1 (19). С. 26–40.
3. Ерошкин, А. Л. Оценка надежности полупроводниковых приборов и микросхем / А. Л. Ерошкин, Р. А. Попо // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12-2. С. 221–225.
4. Кулибаба, А. Я. Проблемы ускоренных испытаний электронной компонентной базы на надежность / А. Я. Кулибаба, С. П. Прищепова, А. Ю. Штукарёв // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2014. Т. 1, Вып. 2. С. 81–85.
5. Авдеев, В. В. О возможностях ускоренных испытаний медицинского оборудования / В. В. Авдеев, Т. В. Колтакова // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2017. Т. 5, № 1 (16). 9 с.
6. Дорошевич, К. К. Методология проведения ускоренных испытаний перспективных больших интегральных схем и сверхбольших интегральных схем на надежность / К. К. Дорошевич, П. В. Дорошевич, А. П. Поздеев // Военная электроника и электротехника: научно-технический сборник. 2011. Вып. 63, Ч. 2. С. 39–43.
7. Дорошевич, П. В. Исследования по определению энергии активации сверхбольших интегральных схем // Военная электроника и электротехника: научно-технический сборник. 2013. Вып. 65 (Ф), Ч. 2. С. 85–92.
8. Meeker, W. Q. Statistical Tools for the Rapid Development and Evaluation of High-Reliability Products / W. Q. Meeker, M. Hamada // IEEE Transactions on Reliability. 1995. Vol. 44, Is. 2. Pp. 187–198. DOI: 10.1109/24.387370.
9. Billinton, R. Basic Considerations in Generating Capacity Adequacy Evaluation / R. Billinton, D. Huang // Proceedings of the 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE) (Saskatoon, Canada, 01–04 May 2005). — Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005. — Pp. 611–614. DOI: 10.1109/CCECE.2005.1557005.
10. Jiang, K. New Models and Concepts for Power System Reliability Evaluation Including Protection System Failures / K. Jiang, C. Singh // IEEE Transactions on Power Systems. 2011. Vol. 26, No. 4. Pp. 1845–1855. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2156820.
11. Солдатенко, В. С. Надежность и испытания вооружения, военной и специальной техники: Учебное пособие / В. С. Солдатенко, Д. В. Садин, И. О. Голиков. — Санкт-Петербург: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2021. — 165 с.
12. Строгонов, А. В. Долговечность интегральных схем и производственные методы ее прогнозирования // Chip News: Инженерная микроэлектроника. 2002. № 6. С. 44–49.
13. Перроте, А. И. Основы ускоренных испытаний радиоэлементов на надежность / А. И. Перроте, Г. Д. Карташов, К. Н. Цветаев. — Москва: Советское Радио, 1968. — 224 с. — (Библиотека инженера по надежности).
14. Смагин, В. А. Обобщение физического принципа теории надежности профессора Н. М. Седякина // Информатика и космос. 2006. № 3. С. 71–78.
15. Расширение понятия «надежность» в современной электроэнергетике / А. Л. Куликов, В. Л. Осокин, Б. В. Папков, Т. В. Шилова // Вестник НИИЭИ. 2018. № 3 (82). С. 88–98.
16. Никулин, М. С. О развитии и внедрении методов статистики ускоренных испытаний для анализа безопасности, надежности и качества продукции высоких технологий / М. С. Никулин, М. В. Сильников, К. А. Дубаренко // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. Вып. 1 (190). С. 217–223.
17. Оценка надежности пьезоэлектрических вакуумных прецизионных резонаторов, применяемых в радиоэлектронной аппаратуре космических аппаратов / И. В. Архипова, А. В. Батулин, И. А. Голубева, А. И. Митюшов // I-methods. 2018. Т. 10, № 4. С. 5–10.
18. Ефремов, Л. В. Ускоренные испытания стальных образцов на износостойкость методом искусственных баз / Л. В. Ефремов, А. В. Тикалов, А. Д. Бреки // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 8. С. 671–676. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-671-676.
19. Смагин, В. А. Модель надежности оператора в условиях обучения // Надежность и контроль качества. Методы менеджмента качества. 1999. № 9. С. 57–64.
20. Смагин, В. А. Эвристическая модель ликвидации нештатных ситуаций в эргатических системах управления // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2017. № 1 (9). С. 5–10.
21. Смагин, В. А. Форсированные быстродействием испытания программного обеспечения на надежность // Автоматика и вычислительная техника. 2003. № 5. С. 3–11.
22. Солдатенко, В. С. Надежность информационных систем: Учебное пособие. — Санкт-Петербург: ВКА имени А. Ф. Можайского, 2008. — 86 с.
23. Смагин, В. А. Обобщение понятия ресурса надежности информационно-измерительных систем на основе принципа Н. М. Седякина / В. А. Смагин, Р. О. Лавров, С. Ф. Литвиненко // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 40–47. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-4-5.

# New Horizons of Application in the Theory of Reliability of Highly Reliable Systems of the Hypothesis of N. M. Sedyakin

Grand PhD V. A. Smagin, PhD V. S. Soldatenko

Mozhaisky Military Space Academy

Saint Petersburg, Russia

va\_smagin@mail.ru, soldatenko\_vs@mail.ru

**Abstract.** Proposals for weakening a number of assumptions on the basis of which the hypothesis of N. M. Sedyakin was formulated and confirmed by theoretical relations. Directions of adequate use of this scientific position in relation to new objects not previously considered are proposed. These include information and ergatic systems, computer complex software. The described approaches will justify the results of accelerated reliability tests of a fairly wide range of highly reliable objects.

**Keywords:** reliability of objects, physical principles of reliability, accelerated tests, failure rate, reliability resource.

## REFERENCES

- Sedyakin N. M. About One Physical Principle of Reliability Theory [Ob odnom fizicheskom printsipe teorii nadezhnosti], *Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics [Izvestiya Akademii nauk SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika]*, 1966, No. 3, Pp. 80–87.
- Gishvarov A. S. Modeling of Accelerated Tests of Technical Systems for Reliability and Resource [Modelirovanie uskorennykh ispytaniy tekhnicheskikh sistem na nadezhnost i resurs]. *Vestnik of Ufa State Aviation Technical University [Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta]*, 2007, Vol. 9, No. 1 (19), Pp. 26–40.
- Eroshkin A. L., Popo R. A. Evaluation of Reliability Semiconductor Devices and Microcircuits [Otsenka nadezhnosti poluprovodnikovyykh priborov i mikroskhem], *International Journal of Applied and Fundamental Research [Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy]*, 2015, No. 12-2, Pp. 221–225.
- Koulibaba A. Ya., Prischepova S. P., Shtukarev A. Yu. Problems of Accelerated Life Tests of Electronic Components [Problemy uskorennykh ispytaniy elektronnoy komponentnoy bazy na nadezhnost], *Rocket-Space Device Engineering and Information Systems [Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy]*, 2014, Vol. 1, Is. 2, Pp. 81–85.
- Avdeev V. V., Koltakova T. V. About the Possibilities of Accelerated Testing of Medical Equipment [O vozmozhnostyakh uskorennykh ispytaniy meditsinskogo oborudovaniya], *Modeling, Optimization and Information Technology [Modelirovanie, optimizatsiya i informatsionnye tekhnologii]*, 2017, Vol. 5, No. 1 (16), 9 p.
- Doroshevich K. K., Doroshevich P. V., Pozdeev A. P. Methodology of Accelerated Testing of Promising Large Integrated Circuits and Ultra-Large Integrated Circuits for Reliability [Metodologiya provedeniya uskorennykh ispytaniy perspektivnykh bolshikh integralnykh skhem i sverkhbolshikh integralnykh skhem na nadezhnost], *Military Electronics and Electrical Engineering [Voennaya elektronika i elektrotehnika: nauchno-tekhnicheskii sbornik]*, 2011, Is. 63, Pt. 2, Pp. 39–43.
- Doroshevich P. V. Research on Determining the Activation Energy of Ultra-Large Integrated Circuits [Issledovaniya po opredeleniyu energii aktivatsii sverkhbolshikh integralnykh skhem], *Military Electronics and Electrical Engineering [Voennaya elektronika i elektrotehnika: nauchno-tekhnicheskii sbornik]*, 2013, Is. 65 (F), Pt. 2, Pp. 85–92.
- Meeker W. Q., Hamada M. Statistical Tools for the Rapid Development and Evaluation of High-Reliability Products, *IEEE Transactions on Reliability*, 1995, Vol. 44, Is. 2, Pp. 187–198. DOI: 10.1109/24.387370.
- Billinton R., Huang D. Basic Considerations in Generating Capacity Adequacy Evaluation, *Proceedings of the 2005 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE), Saskatoon, Canada, May 01–04, 2005*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005, Pp. 611–614. DOI: 10.1109/CCECE.2005.1557005.
- Jiang K., Singh C. New Models and Concepts for Power System Reliability Evaluation Including Protection System Failures, *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, Vol. 26, No. 4, Pp. 1845–1855. DOI: 10.1109/TPWRS.2011.2156820.
- Soldatenko V. S., Sadin D. V., Golikov I. O. Reliability and Testing of Weapons, Military and Special Equipment: Study guide [Nadezhnost i ispytaniya vooruzheniya, voennoy i spetsialnoy tekhniki: Uchebnoe posobie]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2021, 165 p.
- Strogonov A. V. Durability of Integrated Circuits and Production Methods of Its Forecasting [Dolgovechnost integralnykh skhem i proizvodstvennye metody ee prognozirovaniya], *Chip News: Microelectronics Engineering [Chip News: Inzhenernaya mikroelektronika]*, 2002, No. 6, Pp. 44–49.
- Perrote A. I., Kartashov G. D., Tsvetayev K. N. Fundamentals of Accelerated Testing of Radio Elements for Reliability [Osnovy uskorennykh ispytaniy radioelementov na nadezhnost]. Moscow, Soviet Radio Publishing House, 1968, 224 p.
- Smagin V. A. Generalization of the Physical Principle of the Reliability Theory by Professor N. M. Sedyakin [Obobshchenie fizicheskogo printsipa teorii nadezhnosti professora N. M. Sedyakina], *Information and Space [Informatsiya i kosmos]*, 2006, No. 3, Pp. 71–78.
- Kulikov A. L., Osokin V. L., Papkov B. V., Shilova T. V. The Extension of the Concept «Reliability» in Modern Electric Power Industry [Rasshirenie ponyatiya «nadezhnost» v sovremennoy elektroenergetike], *Bulletin NGIEI [Vestnik NGIEI]*, 2018, No. 3 (82). Pp. 88–98.

16. Nikulin M. S., Silnikov M. V., Dubarenko K. A. On the Development and Implementation Methods of Statistics of Accelerated Tests for Safety Analysis, Reliability and Quality of Products of High Technologies [O razviti i vnedrenii metodov statistiki uskorennykh ispytaniy dlya analiza bezopasnosti, nadezhnosti i kachestva produktsii vysokikh tekhnologiy], *St. Petersburg Polytechnical University Journal [Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta]*, 2014, Is. 1 (190), Pp. 217–223.

17. Arkhipova I. V., Baturin A. V., Golubeva I. A., Mityushov A. I. Assessment of the Reliability of Piezoelectric Vacuum Resonators Used in Electronic Equipment of Spacecrafts [Otsenka nadezhnosti pyezoelektricheskikh vakuumnykh pretsizionnykh rezonatorov, primenyaemykh v radioelektronnoy apparature kosmicheskikh apparatov], *I-methods*, 2018, Vol. 10, No. 4, Pp. 5–10.

18. Efremov L. V., Tikalov A. V., Breki A. D. Accelerated Testing of Steel Samples on the Durability by the Artificial Bases Method [Uskorennyye ispytaniya stalnykh obraztsov na iznosostoykost metodom iskusstvennykh baz], *Journal of Instrument Engineering [Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie]*, 2016, Vol. 59, No. 8, Pp. 671–676. DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-8-671-676.

19. Smagin V. A. Model of Operator Reliability in Training Conditions [Model nadezhnosti operatora v usloviyakh obucheniya], *Reliability and Quality Control. Quality Management Methods [Nadezhnost i kontrol kachestva. Metody menedzhmenta kachestva]*, 1999, No. 9, Pp. 57–64.

20. Smagin V. A. Heuristic model of liquidation of super-numerary situations in man-machine control systems [Evristsicheskaya model likvidatsii neshtatnykh situatsiy v ergaticheskikh sistemakh upravleniya], *Intellectual Technologies on Transport [Intellektualnye tekhnologii na transporte]*, 2017, No. 1 (9), Pp. 5–10.

21. Smagin V. A. The Tests Forced by Speed of the Software for Reliability [Forsirovannyye bystrodeystviem ispytaniya programmnoy obespecheniya na nadezhnost], *Automatic Control and Computer Sciences [Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika]*, 2003, No. 5. Pp. 3–11.

22. Soldatenko V. S. Reliability of information systems: Study guide [Nadezhnost informatsionnykh sistem: Uchebnoe posobie]. Saint Petersburg, Mozhaisky Military Space Academy, 2008, 86 p.

23. Smagin V. A., Lavrov R. O., Litvinenko S. F. Generalization of the concept of reliability resource information and measurement systems based on the principle of N. M. Sedyakin [Obobshchenie ponyatiya resursa nadezhnosti informatsionno-izmeritelnykh sistem na osnove printsipa N. M. Sedyakina], *Reliability and Quality of Complex Systems [Nadezhnost i kachestvo slozhnykh sistem]*, 2022, No. 4, Pp. 40–47. DOI: 10.21685/2307-4205-2022-4-5.