

# Анализ факторов нагрузки в электронных модулях мехатроники

**Электронные системы и компоненты, особенно в области автомобилестроения, подвергаются разнообразным и отчасти сильным вредным влияниям окружающей среды. Для разработки, оптимизации или оценки надежности автомобильной электроники необходимо точно знать полевые нагрузки, которые различаются в зависимости от эксплуатации и внешних условий окружающей среды по интенсивности, частоте и продолжительности. Они специфичны и в зависимости от места монтажа компонента в автомобиле и от конкретной конструкции системы. Нагрузками на электронные модули, например, являются температура и колебания, которые переносятся с блока двигателя на корпус электроники. Нагрузки на компоненты в электронных узлах обычно зависят от их геометрии, материалов электронных компонентов и места их монтажа.**

Давид Пуштан (David Pustan)

pustan@imtek.uni-freiburg.de

Перевод: Андрей Новиков

andrej.novikov@uni-rostock.de

В данной работе проанализированы температура, влажность и вибрация электронного модуля одного коммерческого устройства управления при помощи микросистемных сенсоров и мобильной системы регистрации и обработки данных в полевых условиях. Влияния этих физических величин на определенные виды нагрузки компонента BGA на электронном модуле детально исследованы при помощи современных методов испытаний. Далее была проведена оценка функциональной надежности в полевых условиях резистора типа CR2512 с бессвинцовыми паяными соединениями на основе данных испытательного стенда и полученных полевых данных, пересчитанных в диапазон нагрузок.

Большая часть проблем надежности транспортных средств объясняется отказами электроники. Термомеханическая усталость паяных соединений

## Введение

электронных компонентов — существенная причина отказов, которая зависит от конструкции и процесса производства, вследствие чего условием для создания надежных конструкций является обширное знание имеющихся нагрузок в полевых условиях.

Особенно это касается электроники, встраиваемой в двигатель, как в случае с исследуемым модулем автоматического управления двигателем. Корпус электронного модуля присоединен к блоку двигателя с демпфированием колебаний и термической изоляцией при помощи воздушного зазора (рис. 1). В данной работе исследован электрически неактивный модуль управления двигателем в оригинальном месте монтажа. Активное устройство для управления двигателем было перемещено в салон автомобиля при помощи адаптера.

Исследуемым в деталях электронным компонентом, находящимся на печатной плате модуля управления, является ИС в корпусе LFBGA (Low Profile Fine Pitch Ball Grid Array Package). Этот популярный тип конструкции для микрочипов в микроэлектронике используется для компонентов с большим количеством внешних контактов, например для процессоров и микроконтроллеров. Данный электронный компонент имеет 345 шариков припоя из сплава SnAgCu и припаян к электронному модулю с растровым шагом 0,5 мм. Электронный компонент LFBGA представляет собой слоистую структуру из кремниевого кристалла, клея, промежуточного слоя-носителя, пресс-массы и шариков припоя (рис. 2).

Из-за различных термических коэффициентов расширения материалов изменение температуры вызывает механические напряжения в корпусе и в паяных соединениях. Основной причиной механических напряжений в электронном компоненте являются технологические процессы монтажа и соединения. К факторам влияния относятся также предварительная температурная нагрузка и материалы с их нелинейными, зависящими от температуры и времени свойствами [2, 3]. Для того чтобы сделать возможным анализ нагрузки в электронном ком-



Рис. 1. Частичное представление разреза блока двигателя с модулем управления [1]

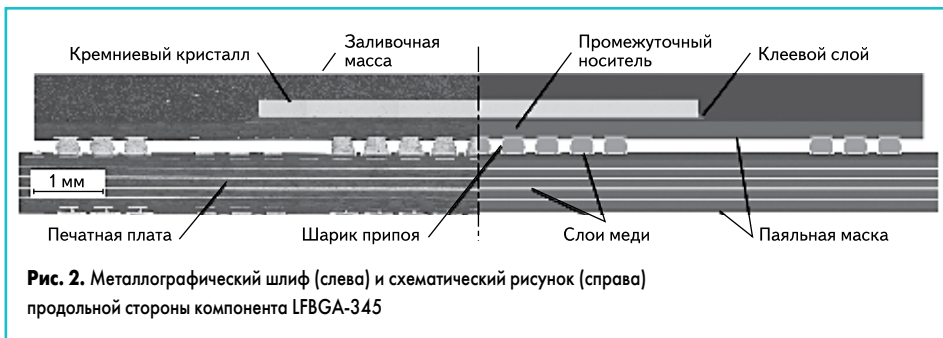


Рис. 2. Металлографический шлиф (слева) и схематический рисунок (справа) продольной стороны компонента LFBGA-345

понтенте, на место микроэлектронного чипа в электронный компонент LFBGA был монтирован специально разработанный, чувствительный к продольной деформации тестовый микрочип (рис. 2). Этот сенсор измеряет абсолютные механические напряжения и продольные деформации на своей поверхности во время эксплуатации автомобиля.

Представленные исследования были проведены в рамках совместного проекта Федерального Министерства науки и образования (Bundesministerium für Bildung und Forschung) Германии «Модификация материалов для ограниченных по форме и материалу соединительных конструкций электронных модулей с высокой степенью интеграции» (сокращенно — LiVe) для того, чтобы получить обширную базу значений, измеренных в полевых условиях, в автомобильной электронике и испытать на ее основе модели прогнозирования надежности при нагрузках в полевых условиях [4].

### Сенсоры и техника измерения

В данном исследовании были в полевых условиях измерены следующие физические величины:

- температура;
- влажность;
- ускорение;
- динамические механические продольные деформации;
- термомеханические расширения и напряжения.



Рис. 3. Печатная плата модуля управления, модифицированная при помощи сенсоров, для получения данных в полевых условиях

Параметры и снимки сенсоров, необходимых для получения данных значений в электронном модуле, представлены в таблице 1.

На рис. 3 показана специально подготовленная для измерения печатная плата модуля управления, оснащенная сенсорами. При помощи двух датчиков ускорения измерены вибрации в горизонтальном и вертикальном направлении на уровне печатной платы, которые вызваны работой двигателя. Полученный сигнал, по существу, соответствует приданным извне ускорениям, так как датчики ускорения расположены очень близко к месту крепления печатной платы.

Переносимые вибрации приводят в печатной плате устройства управления к зависимым от местоположения ускорениям. Так как зависящая от местоположения изменяющаяся симуляция ускорений и локальных колебаний печатной платы требует больших затрат, компонент LFBGA на печатной плате оснащается тензометрическими датчиками (DMS). С их помощью возможно опытным путем измерить как медленные термомеханические деформации элек-

тронного компонента, так и высокочастотные деформации, вызванные колебаниями печатной платы. Также на различные места корпуса модуля управления устанавливаются температурные сенсоры и датчик влажности (рис. 3).

Электронный компонент в корпусе LFBGA компании Infineon Technologies AG вместо микроэлектронного чипа имеет специально разработанный тестовый микрочип. Этот чип оснащен чувствительными к продольной деформации и температуре структурами, изготовленными по тонкопленочной технологии, и измеряет термомеханические деформации компонента LFBGA в зависимости от местоположения в плоскости микрочипа (рис. 4). Миниатюрные тензометрические датчики ( $\mu$ DMS) работают по геометрическому принципу как обычные DMS. Изменение электрического сопротивления структуры можно высчитать при помощи продольного удлинения  $\epsilon_1$  и изменения температуры  $\Delta T$  по уравнению (1) с вычисленным опытным путем фактором  $k$ , равным 2,07, и линейным температурным коэффициентом  $\alpha$  сопротивления 37 ppm/K относительно 0 °C:

$$\Delta R(\epsilon, T) = \underbrace{R_0 \times \alpha \times \Delta T}_{\text{тепловая часть}} + \underbrace{R_0 \times k \times \epsilon_1}_{\text{механическая часть}} \quad (1)$$

Тестовые микрочипы подвергаются термической обработке, и для каждого датчика  $\mu$ DMS устанавливается полином между термически обусловленным изменением сопротивления и температурой. При помощи этого отношения возможно из измеренного сопротивления вычислить чисто механически вы-

Таблица 1. Измеряемые параметры и спецификации сенсоров для получения данных в полевых условиях в автомобильной электронике

	Измеряемая величина				
	Относительная влажность	Температура	Продольная деформация		Ускорение
Сенсор	ИС-датчик влажности	Платиновый измерительный резистор	Розетка тензометрического датчика	Тонкопленочный тестовый микрочип	Двухосевой сенсор ускорения
Допустимый диапазон измерения	От 0 до 100% отн. вл. -30...100 °C	-50...200 °C	-196...120 °C	-45...160 °C	±18g до 2,5 кГц
Внешний вид					

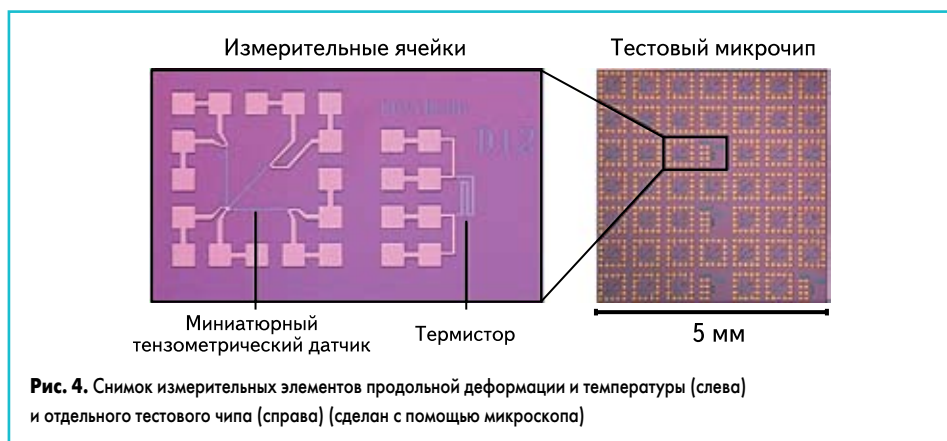


Рис. 4. Снимок измерительных элементов продольной деформации и температуры (слева) и отдельного тестового чипа (справа) (сделан с помощью микроскопа)

званное изменение сопротивления согласно уравнению (1).

После получения характеристики микрочипы компании Infineon монтируются в корпус LFBGA (рис. 2). Каждый элемент имеет по три  $\mu\text{DMS}$  с ориентацией в  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ . Измеренные продольные деформации могут быть пересчитаны в нормальные напряжения и напряжение среза в плоскости элемента, при этом принимается во внимание двумерное напряженное состояние.

После монтажа сенсоров на электронный модуль конструкция монтируется на блок двигателя (рис. 1). Сенсоры модуля управления соединены с соответствующими измерительными приборами в багажнике автомобиля с помощью разветвленного кабеля (рис. 5). Измерительные приборы имеют независимое электропитание, и ими можно управлять и получать их данные, используя общую измерительную программу.

**Данные, полученные в полевых условиях**

Были получены данные об ускорении, температуре и относительной влажности электронного модуля во время испытательного пробега. Для проведения измерений были выбраны три типичных для эксплуатации автомобиля вида пробега (табл. 2). Продолжительность пробега для каждого профиля составляет приблизительно один час.

**Таблица 2.** Данные профилей пробегов

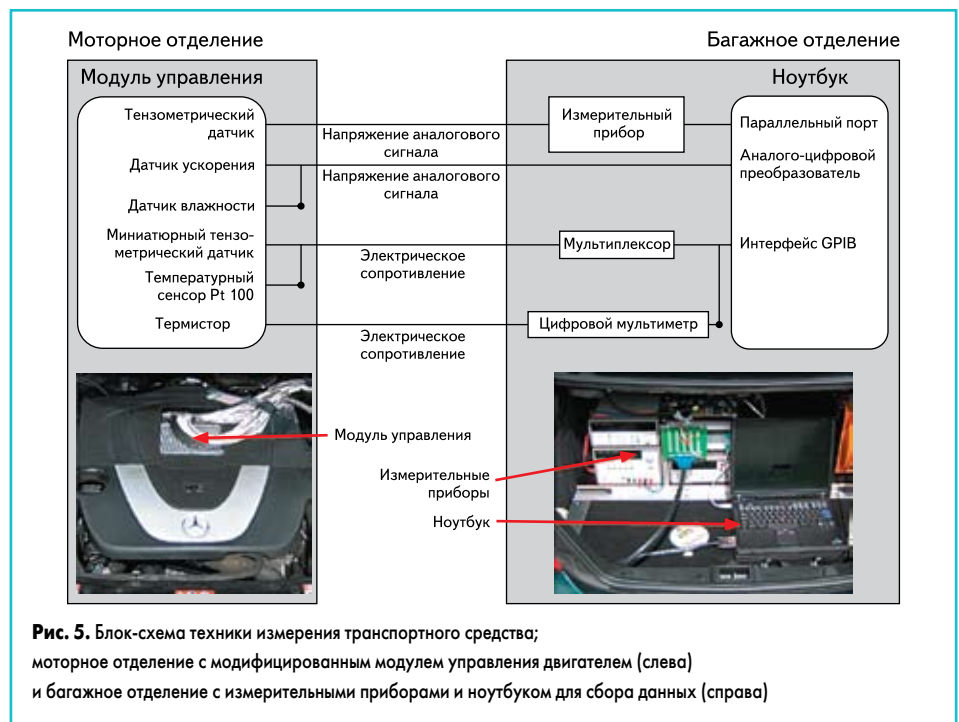
Профиль	Дистанция, км	Скорость, км/ч
Скоростная автомагистраль	93	108
За городом	55	53,6
В городе	22,8	26,3

Во время пробега с помощью устройства оперативной регистрации данных были зафиксированы скорость, число оборотов двигателя, температура охлаждающей жидкости, внешняя температура автомобиля и температура впускаемого воздуха (рис. 6). Средняя скорость удваивается при выезде из города и выезде на автомобильную скоростную магистраль (автобан). Среднее число оборотов составляет от 1100 до 1800 об./мин, в то время как на автобанах оно увеличивается до 2000–2500 об./мин.

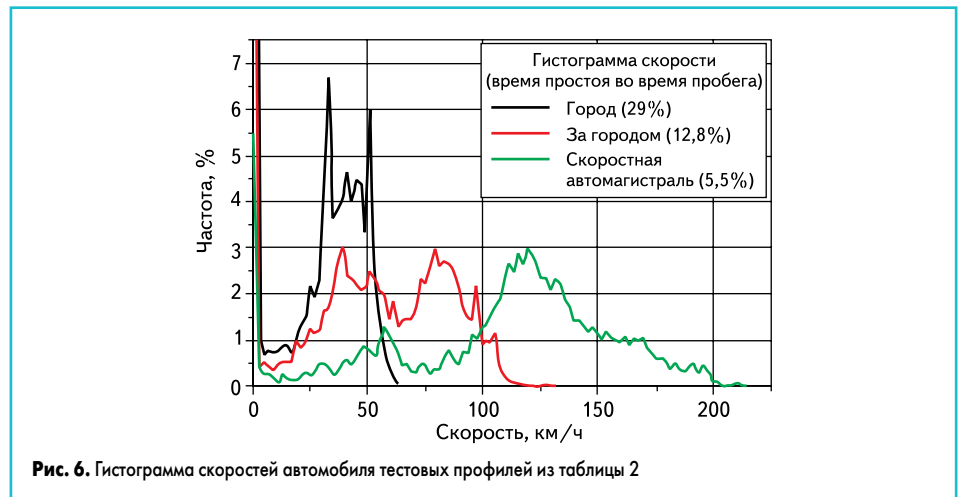
**Влажность**

Интегрированный датчик влажности измеряет относительную влажность и температуру в устройстве управления. При помощи этих данных могут быть вычислены давление насыщенного пара, температура «точки росы» и абсолютная влажность воздуха в корпусе.

Для испытанной конструкции изменение температуры и абсолютная температура во время эксплуатации будут существенно зависеть от температуры окружающей среды, охлаждения, происходящего из-за встречного потока воздуха с увеличением скорости, и регулируемого охлаждения, вызванного работой венти-



**Рис. 5.** Блок-схема техники измерения транспортного средства; моторное отделение с модифицированным модулем управления двигателем (слева) и багажное отделение с измерительными приборами и ноутбуком для сбора данных (справа)



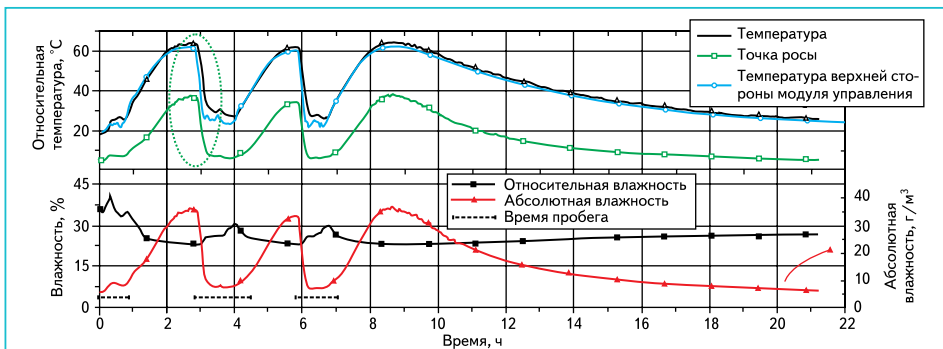
**Рис. 6.** Гистограмма скоростей автомобиля тестовых профилей из таблицы 2

лятора двигателя. Как правило, блок двигателя достигает своей рабочей температуры в течение 7–15 минут в зависимости от нагрузки двигателя. После выключения двигателя (Soakphase) электроника мотора достигает своей максимальной температуры приблизительно через 1,5 часа простоя из-за тепла, переданного от блока двигателя (рис. 7). С учетом максимальной температуры можно сделать вывод, что электронный модуль остывает очень медленно и экспоненциально с постоянной времени, равной приблизительно 6,5 ч.

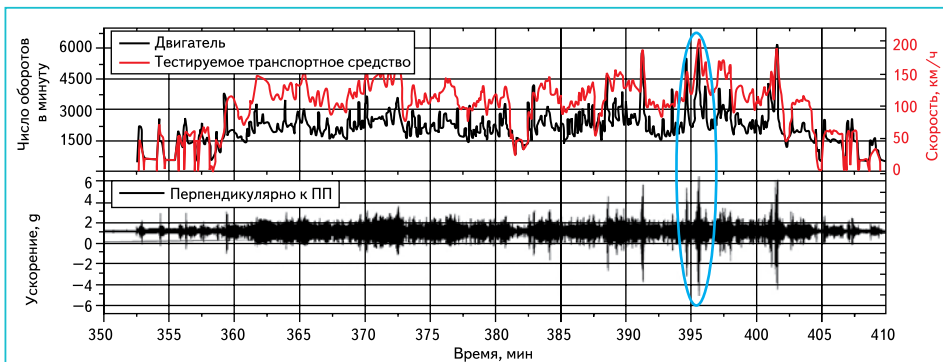
В самом простом случае в описании изменения влажности устройства управления можно исходить из того, что абсолютная влажность воздуха остается приблизительно неизменной, а относительная влажность уменьшается с повышением температуры, так как максимальное паросодержание воздуха, которое возможно измерить, растет с увеличением температуры.

На рис. 7 изображено изменение температуры и влажности в устройстве управления во время трех пробегов по скоростной автомагистрали с короткими остановками и следующими за ними фазами простоя.

Измерение показывает, что относительная влажность воздуха в устройстве управления падает недостаточно сильно для того, чтобы поддерживать постоянной абсолютную влажность воздуха при увеличении температуры. Поэтому абсолютная влажность в устройстве управления увеличивается с  $5,9 \text{ г/м}^3$  в начале пробега до  $36,3 \text{ г/м}^3$  во время фазы догрева. Из этой разницы в  $30,4 \text{ г/м}^3$  при объеме воздуха в устройстве управления приблизительно  $445 \text{ см}^3$  может быть вычислено получившееся количество воды — около 13,6 мг. Для сравнения: одна капля воды весит около 0,2 г при диаметре приблизительно 7 мм. При этом исключено то, что влажный воздух проникает извне, так как во время разогрева воздух в модуле управления расширяется. Причиной разницы значений влажности является высокая водопоглощающая способность, а следовательно, и выделяющая способность полимерного материала штекера прибора. Данный штекер состоит из полиамида PA6, который при нормальных климатических условиях ( $23^\circ\text{C}$ , 50% относительной влажности) может впитывать около 3 весовых процентов воды [6]. В этом случае он играет роль накопителя влаги и ста-



**Рис. 7.** Измеренные изменения влажности и температуры в устройстве управления во время испытательного пробега по скоростной автомобильной магистрали и во время последующих фаз простоя



**Рис. 8.** Вертикальное ускорение печатной платы, число оборотов двигателя и скорость автомобиля во время испытательного пробега по скоростной автомагистрали

билизирует относительную влажность воздуха в корпусе устройства [7]. Исходное значение абсолютной влажности воздуха практически достигается вновь через 14,1 часа после остановки работы автомобиля (рис. 7).

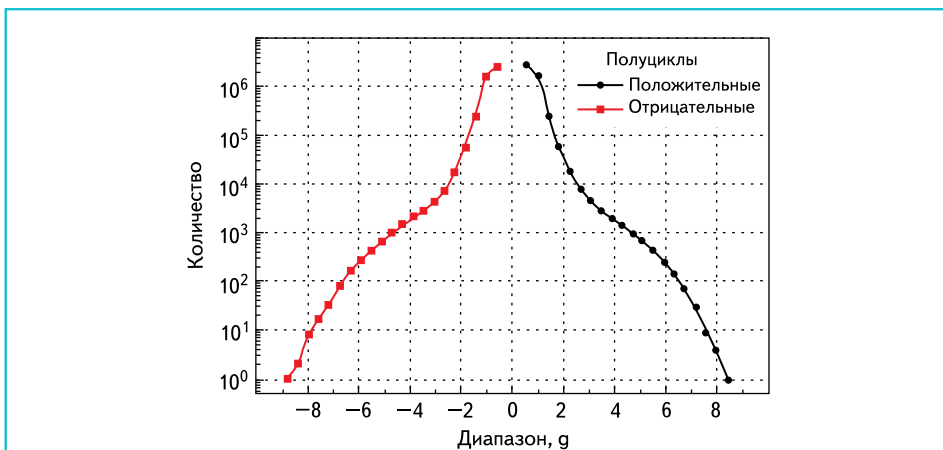
Из-за высокой абсолютной влажности воздуха, которая наступает одновременно с достижением температурного максимума, в устройстве управления при быстром охлаждении может возникнуть оттаивание, например, при последующем пробеге на высокой скорости при соответствующем охлаждении встречным потоком воздуха.

Во время тестового пробега автомобиля по скоростной автомагистрали значения точки росы и температуры самого холодного места внешней поверхности корпуса модуля управления находятся при определенных обстоятельствах очень близко друг к другу (рис. 7,

выделенная область). Во время этих пробных пробегов последующий тестовый пробег начинался сразу при самом высоком значении температуры фазы догрева, в связи с чем было достигнуто максимальное значение охлаждения печатной платы — более чем 2,5 К/мин. При более подробном анализе фаз охлаждения можно заметить, что в данном случае точка росы также находится ниже измеренной температуры в корпусе (рис. 7). Измеренная разница температур между расчетным значением точки росы и температурой в корпусе составила более 6 °С.

**Вибрация**

Помимо влаги и температуры во время эксплуатации автомобиля присутствует также вибрация устройства управления.



**Рис. 9.** Распределение диапазонов полуволн ускорения при испытательном пробеге по скоростной автомагистрали; время пробега 56 минут

На рис. 8 изображено временное изменение ускорения перпендикулярно к поверхности печатной платы во время испытательного пробега по скоростной автомагистрали.

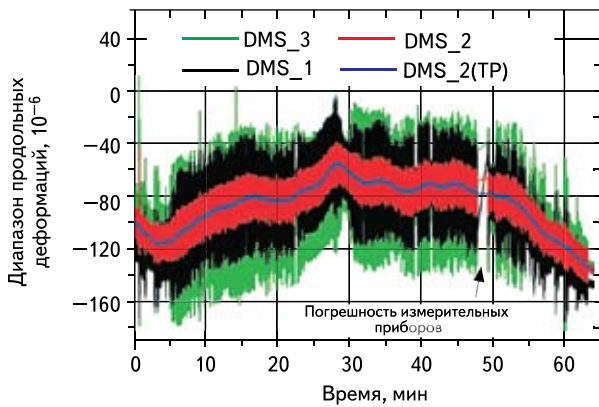
Измеренные вибрации при размещении прибора на двигателе в основном зависят от нагрузки двигателя и числа его оборотов, а не от особенностей дороги, как в том случае, когда прибор расположен в кузове автомобиля. Ускорения с максимальной амплитудой колебаний до 10g появляются при большом числе оборотов и максимальной нагрузке двигателя при испытательном пробеге по скоростной автомагистрали (рис. 8).

Используя метод классификации средних промежутков времени, из временного изменения ускорений можно вычислить диапазон (разницу между ближайшими максимальными значениями) и среднее значение положительных и отрицательных полуволн относительно полного диапазона нагрузок. Полуциклы с большой разницей коррелируют с максимальным ускорением автомобиля и, соответственно, происходят редко. Полуциклы со средней разницей ускорений между 4g и 5g, напротив, встречаются около трех раз в секунду во время пробега по скоростной автомагистрали (рис. 9). Ускорения, измеренные во время испытательного пробега, незначительны вследствие метода монтажа корпуса, при котором колебания демпфированы. При разработке конструкции необходимо обращать внимание на то, чтобы печатная плата обладала достаточной жесткостью и крепилась к корпусу в нескольких местах для того, чтобы значение резонансной частоты колебаний печатной платы было по возможности выше конкретного спектра частоты ускорений. В ином случае усиление при резонансе может вызвать очень сильные локальные ускорения.

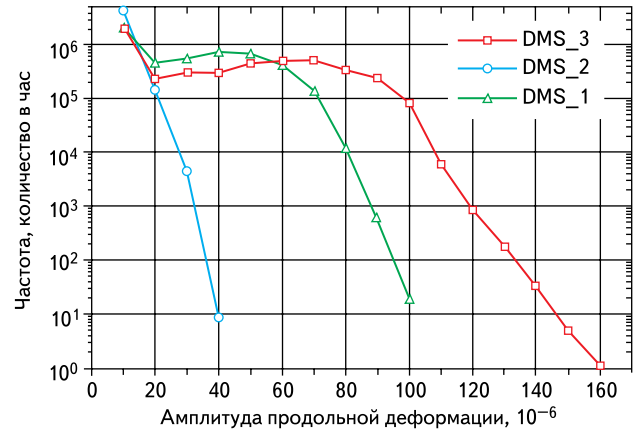
**Динамические механические продольные деформации**

Обычно для надежности электронных компонентов поверхностного монтажа важны вертикальные ускорения. Они приводят к колебаниям печатной платы и соответствующим локальным высокочастотным продольным деформациям, вызванным изгибом печатной платы, вследствие чего паяные соединения электронных компонентов испытывают нагрузку. Ускорения в плоскости печатной платы оказывают влияние на возвышающиеся над ее поверхностью электронные компоненты, такие как электролитические конденсаторы. Центр тяжести таких компонентов по сравнению с компонентами поверхностного монтажа расположен достаточно далеко от поверхности печатной платы, и продольные ускорения из-за инерции приводят к высоким нагрузкам на изгиб в месте соединения электронных компонентов с печатной платой.

Тензометрические датчики на компоненте LFBGA регистрируют локальную продольную деформацию печатной платы в месте ее монтажа. Они работают по полумостовой схеме с температурной компенсацией и измеряют изменение продольных деформаций между



**Рис. 10.** Показания тензометрических датчиков (DMS) во время пробега по скоростной автомагистрали; частота развертки — 9,6 кГц, ТР — с фильтрацией нижних частот



**Рис. 11.** RFC-диапазон нагрузок с разницей продольных деформаций при пробеге по скоростной автомагистрали

поверхностью электронного компонента и нижней стороной печатной платы вдоль обеих диагоналей и одной биссектрисы электронных компонентов (табл. 1, рис. 3).

Измеренный сигнал состоит из динамических механических деформаций электронного компонента, вызванных высокочастотными колебаниями печатной платы, и медленных термомеханических деформаций, вызванных различными термическими коэффициентами расширения материалов электронных компонентов при температурных изменениях. На рис. 10 изображен измеренный перепад продольных деформаций при испытательном пробеге по скоростной автомагистрали. Сигнал тензометрических датчиков DMS\_2, пропущенный через фильтр низких частот, соответствует медленным термомеханическим деформациям электронного компонента по сравнению с печатной платой, в то время как динамические механические деформации суммируются с этим сигналом.

С помощью дождевого алгоритма (Rainflow-Count-Algorithmus, RFC) возможно вычислить закрытые кривые гистерезиса из временных изменений динамических продольных деформаций. Результат этого метода подсчета, примененный для измерения во время пробега по скоростной автомагистрали, представлен на рис. 11.

Четко видно, что динамические нагрузки в плоскости электронного компонента сильно зависят от ее направления. Максимальная амплитуда продольной деформации была зафиксирована в направлении тензометрического датчика DMS\_3, вдоль одной из диагоналей электронного модуля.

На основании этого диапазона нагрузок в рамках исследований по надежности проводился расчет срока эксплуатации электронного компонента CR2512.

### Термомеханическая продольная деформация и напряжение

Как уже было упомянуто выше, различные термические коэффициенты расширения материалов электронных компонентов приводят к термомеханическим напряжениям в электронном компоненте во время его производства и при последующих температурных изменениях.

В случае если в плоскости или в углах кристалла присутствует высокое напряжение растяжения, как, например, после монтажа кремниевого кристалла на медную выводную рамку, то оно может вместе с повреждениями поверхности кристалла привести к возникновению вертикальных или горизонтальных трещин в кремнии (рис. 12) [8]. В работе Ван Кесселя и его соавторов было предложено использовать следующий критерий для расчета предельного разрушающего напряжения  $\sigma_c$ :

$$\sigma_c = m \frac{K_{1c}}{\sqrt{\pi \times a}}, \quad (2)$$

где  $m = 1,2$  используется для полуэллиптической трещины глубиной  $2a$  и  $K_{1c} = 25,9 \text{ Н/мм}^{3/2}$  для расчета предела прочности при растяжении кремния [8].

Для простых конструкций механические напряжения могут быть рассчитаны аналитиче-

ским путем. По мнению Болгера, максимальное напряжение растяжения  $\sigma_{\max}$  в углу кристалла после его монтажа на субстрат можно вычислить следующим образом [9]:

$$\sigma_{\max} = K(\alpha_s - \alpha_{si})(T_g - T) \sqrt{\frac{E_a \times E_s \times L}{x}}, \quad (3)$$

где  $K$  — геометрическая постоянная;  $E$  — модуль упругости;  $\alpha$  — коэффициент расширения;  $L$  — длина края кристалла;  $x$  — толщина слоя клея; индексы:  $a$  — клей,  $s$  — субстрат,  $si$  — кремний.

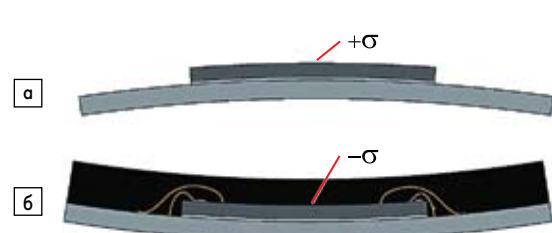
Для более сложных конструкций с несколькими этапами изготовления и сильным влиянием вязкоупругих органических материалов требуются более сложные вычисления и знание определенных параметров вязкоупругих материалов [2, 3].

В данной работе для определения механических нагрузок в электронном компоненте LFBGA был выбран экспериментальный способ — применение чувствительного к деформации тестового кристалла. Механические нагрузки зависят не только от влияния окружающей среды, например, во время эксплуатации автомобиля или проведения испытаний надежности, они возникают уже в процессе изготовления, монтажа и соединения электронного компонента.

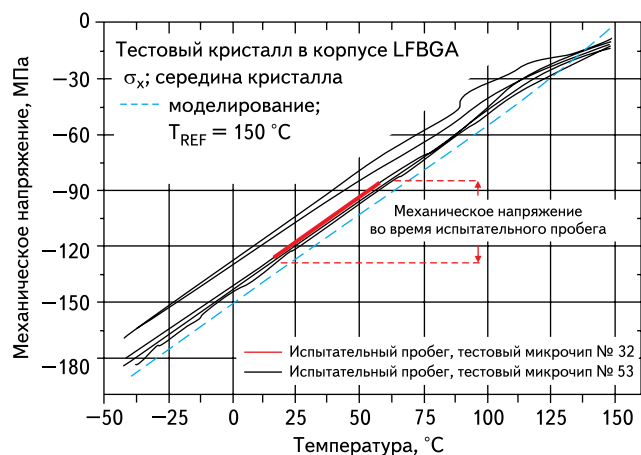
Приклеивание кремниевого кристалла на плату-носитель приводит после охлаждения до комнатной температуры к напряжениям растяжения почти в 60 МПа на поверхности кристалла с датчиком (рис. 13а). Они переходят в напряжения сжатия в 98 МПа на поверхности кристалла после этапа корпусирования



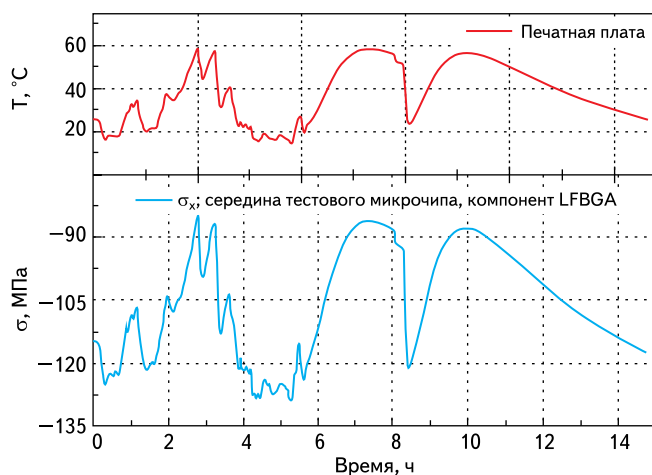
**Рис. 12.** Горизонтальная трещина: а) в структуре, состоящей из кремниевого кристалла и заливочной массы; б) в микрочипе электронного компонента LFBGA



**Рис. 13.** Схематическое изображение деформации кристалла при комнатной температуре: а) после его приклеивания на плату-носитель; б) после заливки



**Рис. 14.** Кривые механического напряжения на поверхности кристалла электронного компонента LFBGA во время испытательного пробега по скоростной автомагистрали и температурного шока (-40...+150 °C)



**Рис. 15.** Кривые механического напряжения и температуры на поверхности кристалла LFBGA во время испытательного пробега по скоростной автомагистрали

**Таблица 3.** Механические напряжения и растяжения в середине кристалла электронного компонента LFBGA в зависимости от времени и нагрузки

	Продольная деформация $\epsilon$ , $10^{-6}$	Напряжение $\sigma$ , МПа	Температура, °C
Необработанный микрочип	0	0	комн. температура
Смещение за счет приклеивания микрочипа	30	5,5	150
После монтажа микрочипа	330	59,4	25
После прессования	-547	-98,3	26
После пайки оплавлением	-649	-115,4	23
Испытательный пробег № 17 (старт)	-645	-115,1	25
Профиль по скоростной автомагистрали (максимум)	-477	-84,9	59
Испытательный пробег № 17 (конец)	-659	-117,5	25
Термошок (30'10"30')	-47	-8,7	148
-40...+150 °C (4 цикла)	-1020	-183	-43
Циклическая нагрузка влажностью (24 ч; 85% отн. вл.)	-178	-31,8	85
10-85% отн. вл. (24 ч; 10% отн. вл.)	-352	-63	85

электронного компонента при помощи заливочной массы и после охлаждения его до комнатной температуры (рис. 13б).

Изменение механического напряжения в диапазоне изменения температуры поверхности микрочипа носит практически линейный характер ниже температуры стеклования материалов и составляет примерно 1 МПа/К (рис. 14). Выше температуры стеклования ( $\geq 100$  °C) наклон кривой несколько уменьшается.

Абсолютные значения механического напряжения в плоскости кристалла минимальны при высоких температурах и максимальны при низких температурах.

Температура, не приводящая к механическим напряжениям, составляет в середине кристалла для неприпаянных электронных компонентов около 125 °C, а после пайки оплавлением на печатную плату — около 150 °C. Таким образом, она значительно ниже температуры отвержде-

ния заливочной массы электронного компонента, которая составляет 175 °C.

Изображенные на рис. 15 изменения механических напряжений в электронном компоненте во время нагрузки в полевых условиях можно точно измерить, но они небольшие по сравнению с нагрузками, которые возникают при испытаниях срока службы (рис. 14).

Наряду с нагрузкой температурой и вибрацией электронный компонент будет также подвержен нагрузке окружающей влажностью. Как и в случае с термическими коэффициентами расширения, диффузия молекул воды в органических материалах электронных компонентов приводит прежде всего к изменению объема и лишь вторично — к изменению свойств материала. Этот эффект можно было измерить для электронного компонента LFBGA при помощи изотермической нагрузки влажностью с установленными относительными значениями влажности воздуха.

Изменение механических напряжений на поверхности кристалла, вызванное диффузией молекул воды в электронный компонент, составляет при 85 °C около 0,42 МПа/% относительной влажности.

В конце таблицы 3 представлены механические напряжения во время различных временных и температурных этапов процесса изготовления электронного компонента LFBGA и при последующих различных нагрузках.

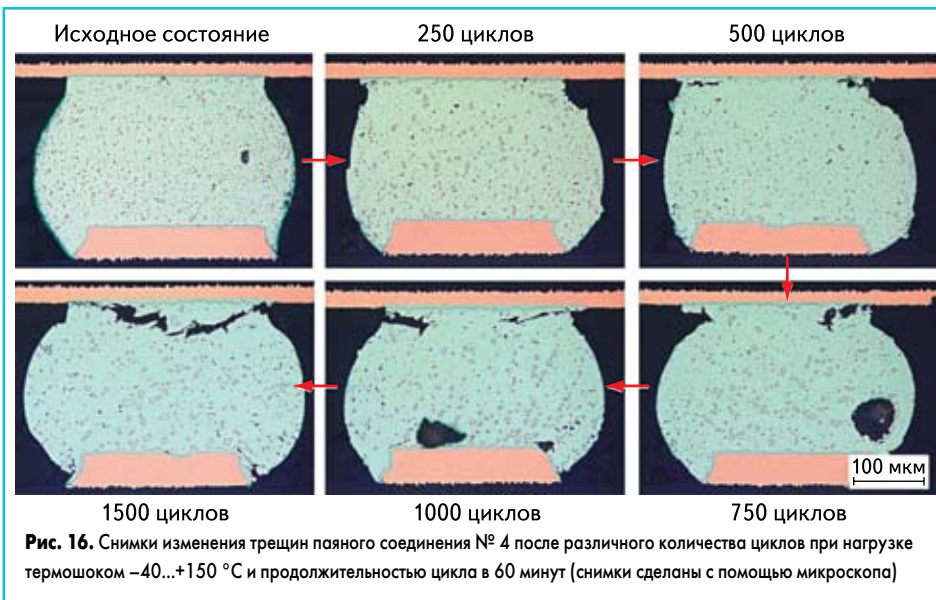
## Надежность

Из результатов испытаний в полевых условиях можно сделать вывод, что электронный компонент LFBGA и его паяные соединения с печатной платой испытывают как термомеханическую, так и динамическую механическую нагрузку (рис. 10).

## Малоцикловая усталость

Термомеханическая усталость паяных соединений (low cycle fatigue) была исследована в ускоренном режиме при испытании температурным шоком с граничными значениями температуры -40 и 150 °C и продолжительностью цикла в один час. При этом через определенные отрезки времени электронные компоненты извлекали из испытательного термошкафа, и их использовали для изготовления металлографических шлифов. Шлифы были сделаны вдоль диагоналей электронных компонентов, так как паяные соединения в этом месте имеют наибольшие циклические деформации ползучести.

На рис. 16 изображен шлиф паяного соединения на различных этапах циклического испытания (4-е паяное соединение от угла на рис. 17). Уже после 250 циклов на стороне электронного компонента вблизи интерметаллической фазы можно увидеть начало трещины в паяном соединении. После 500 циклов трещина видна с обеих сторон паяного соединения и к 1500-му циклу она практически полностью разделяет паяное соединение. Количество циклов, скорость роста трещины за цикл и количество циклов до момента отказа паяного соединения можно рассчитать

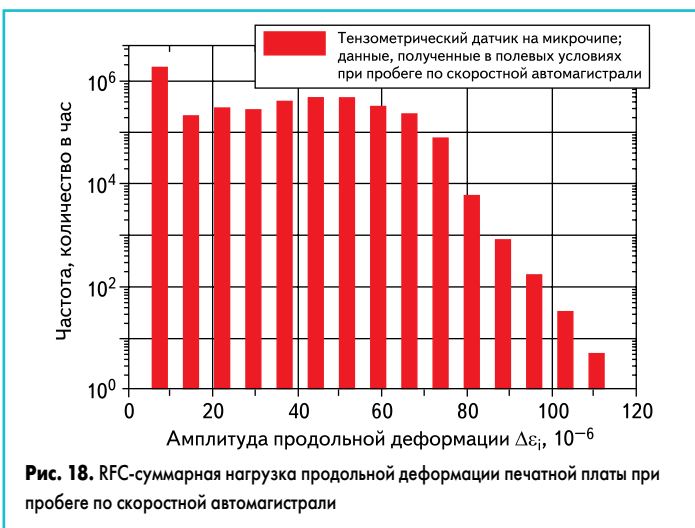


при помощи линейной регрессии длины трещины в зависимости от количества циклов. Эти параметры зависят от локальной нагрузки исследуемого паяного соединения (рис. 17).

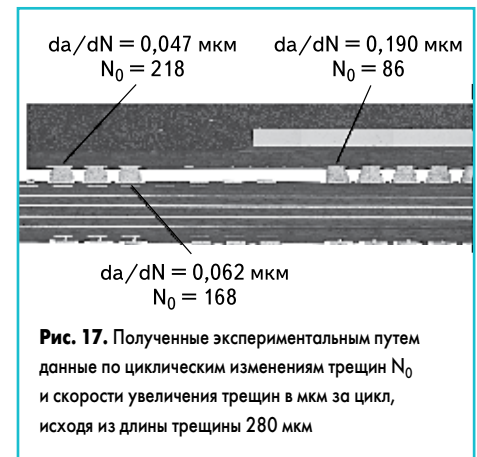
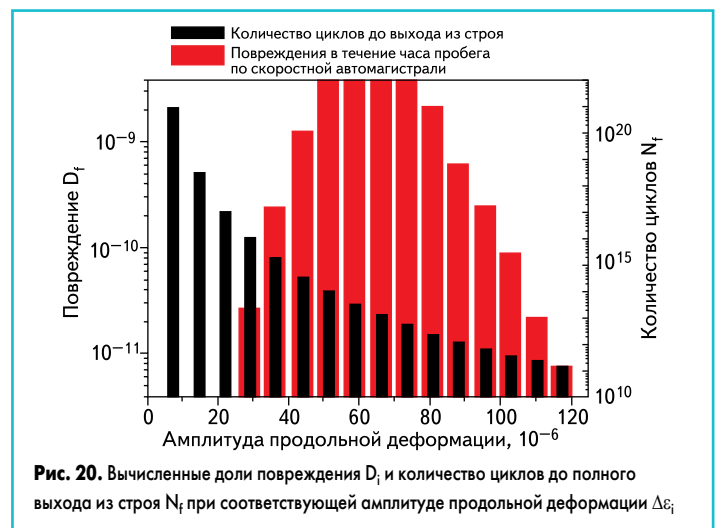
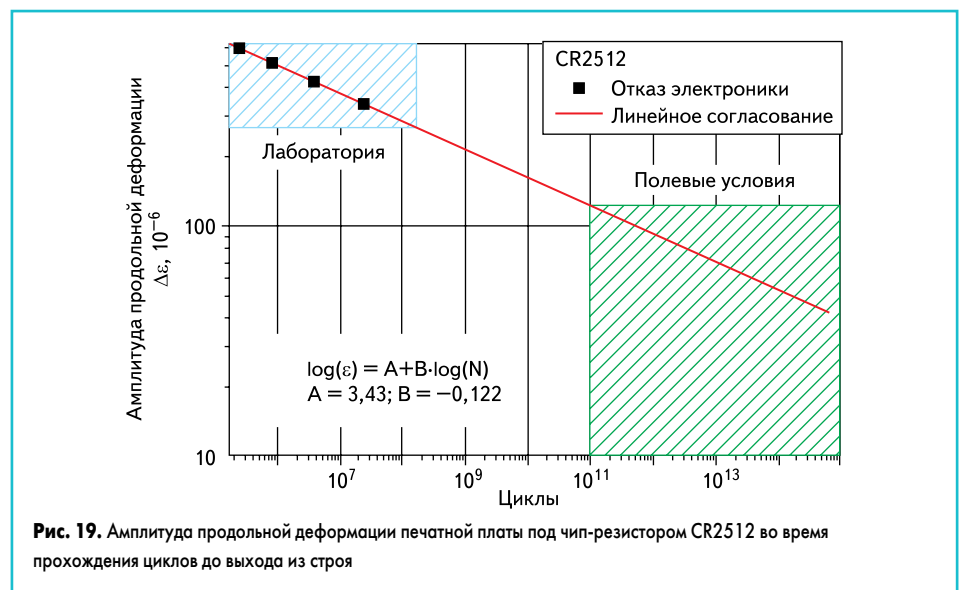
Воздействие различий в геометрии или в параметрах материала электронного компонента может быть рассчитано при помощи вероятностного анализа [10]. Изображенное на рис. 16 паяное соединение с трещиной длиной 280 мкм должно выйти из строя в среднем после 1560 циклов, исходя из измеренной после 86 циклов скорости распространения трещины 0,19 мкм за цикл. Локальные нагрузки паяных соединений, полученные при моделировании методом конечных элементов, могут быть соотнесены с полученными опытным путем вышеназванными параметрами, для того чтобы высчитать закономерность повреждения и образования трещин [11]. При этом необходимо следить за тем, чтобы механизм отказа не изменялся и чтобы повреждения другого характера, происходящие одновременно, не оказывали влияния или же учитывались при анализе модели [12].

### Многоцикловая усталость

Далее проводился расчет срока службы в полевых условиях электронного компонента на примере керамического чип-резистора



CR2512 на основе измеренных продольных деформаций. В качестве величины нагрузки используется динамическая механическая продольная деформация печатной платы под двухполюсником. Анализ временной зависимости динамической механической продольной деформации в полевых условиях на основе дождевого алгоритма (RFC) показывает,



насколько часто в течение часа появляется амплитуда продольной деформации при пробеге по скоростной автомагистрали (рис. 18).

Во время стендовых испытаний в лаборатории проводилось тестирование на вибростойкость при определенных условиях и регистрировался выход из строя двухполюсника после числа циклов деформации (рис. 19) [4].

С учетом отказов в работе при лабораторных нагрузках был выведен следующий закон повреждений, который используется для вычисления повреждений, возникающих в полевых условиях:

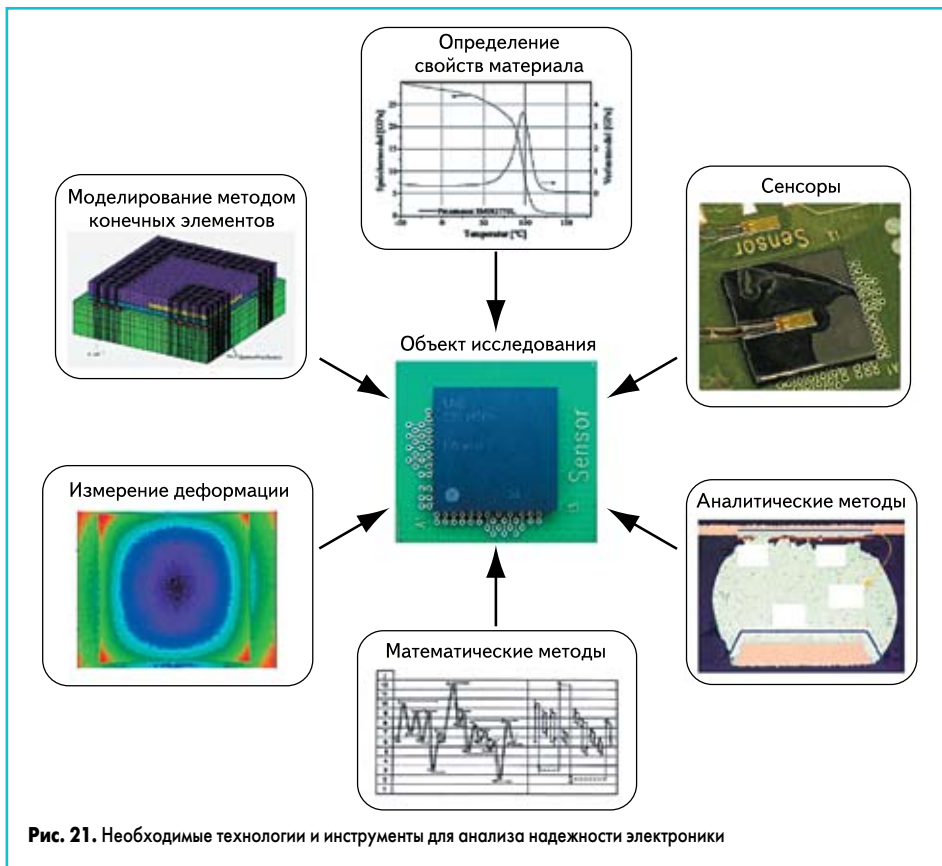


Рис. 21. Необходимые технологии и инструменты для анализа надежности электроники

$$\log(N_f) = 28,1 - 8,2 \times \log(\Delta \epsilon_i). \quad (4)$$

Каждому значению амплитуды деформации  $\Delta \epsilon_i$  согласно уравнению (4) может соответствовать количество циклов до выхода из строя  $N_f$ . В соответствии с правилом линейного суммирования повреждений, основанного на гипотезе Пальмгрена-Майнера, для каждой амплитуды продольной деформации в соответствии с частотой ее проявления  $N_i$  можно вычислить ее долю  $D_i$  в суммарном повреждении  $D$  (рис. 20):

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{N_i(\Delta \epsilon_i)}{N_f(\Delta \epsilon_i)}. \quad (5)$$

Для данной динамической нагрузки момент возникновения отказа наступает значительно раньше идеального срока службы автомобиля, который равен 15 годам. В дальнейших вычислениях необходимо учитывать также такой дополнительный фактор повреждения, как изменение температуры. Лабораторные исследования по-

казали, что предварительная циклическая температурная нагрузка вела к различным уровням повреждения паяных соединений и к значительно более раннему отказу в последовательном испытании вибрацией [4].

### Заключение

На примере одного коммерческого мехатронного модуля были подробно исследованы факторы нагрузки в электронике, такие как температура, влажность и вибрация, при этом применялись различные методы их анализа и трансформации в суммарную нагрузку.

С помощью тестового микрочипа преследовалась цель проанализировать до сих пор не изученные нагрузки электронных компонентов. При этом стало возможно — насколько нам известно — проанализировать и представить детальное исследование механических напряженных состояний, начиная с процесса изготовления электронных компонентов, эксплуатации, испытания и заканчивая их выходом из строя.

Описанный метод может быть применен для анализа других систем и особенно интересен на стадии разработки электронных и мехатронных систем. В представленном случае отдельные виды нагрузки из-за особенностей структуры системы скорее незначительны. Однако было показано, что они могут проявляться как последовательно, так и параллельно и, строго говоря, требуют суммарного анализа их разрушающего воздействия. В связи с этим возникает необходимость в расширенном изучении моделей повреждения для возможности расчета срока службы мехатронных систем, подвергающихся нескольким видам нагрузки. При условии, что исследователи понимают всю суть проблемы,

это возможно только при наличии всех необходимых вычислительных и экспериментальных методов и инструментов (рис. 21).

Авторы статьи выражают благодарность Федеральному Министерству науки и образования Германии за поддержку данного проекта.

**Примечание.** Оригинал статьи опубликован в журнале PLUS (Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2009. № 8. Германия).

### Литература

- Hack G. V-Power // Auto, Motor und Sport. 2004. № 1.
- Fischer S., Beyer H., Janke R., Wilde J. The influence of package-induced stresses on moulded Hall sensors // Microsystem Technologies 12. 2005. № 1–2.
- Fischer S., Beyer H., Janke R., Hartwig S., Wilde J. Comparison of analysis methods for package-induced stresses on moulded Hall sensors // Microsystem Technologies 12. 2006. № 10–11.
- Herausgeber W. Scheel, Wittke K., Nowotnick M. Materialmodifikation für geometrisch und stofflich limitierte Verbindungsstrukturen hochintegrierter Elektronikbaugruppen // LiVe, Band 8: Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik — Aktuelle Berichte.
- Pape U., Frühauf P., Freytag J. Zuverlässigkeitssteigerung durch Miniaturisierung der Lötverbindungen? Teil 2 — Untersuchungsergebnisse verschiedener Messmethoden // PLUS — Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2008. № 7.
- Specht K., Bledzki A. Technische Kunststoffe — Polyamide, Skript, Universität Kassel, 1998.
- Hilbrunner F. Ein Beitrag zur Feuchtekompensation von Präzisionsmessgeräten / Dissertation, Universitätsbibliothek Ilmenau. Jahr 2005.
- Kessel C., Gee S., Murphy J. The quality of die-attachment and its relationship to stresses and vertical die-cracking // IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. Vol. 6. Jahr 1983.
- Bolger J. C. Polyimide Adhesives to Reduce Thermal Stresses in LSI Ceramic Packages / 14<sup>th</sup> National SAMPE Technical Conference. Oktober 1982.
- Wilde J., Zukowski E., Scheel W., Wege S. Verarbeitung und Zuverlässigkeit von Micropackages für Halbleiterbauelemente // PLUS — Produktion von Leiterplatten und Systemen. 2007. № 12.
- Dalin J., Wilde J. Zuverlässigkeit bleifrei gelöteter Leistungs — Halbleiterbauelemente // PLUS — Produktion Leiterplatten und Systemen. 2008. № 7.
- Wilde J., Schneider-Ramelow M., Petzold M., Scheel W. Methoden zur Zuverlässigkeitsqualifizierung neuer Technologien in der Aufbau- und Verbindungstechnik — Herausforderungen und Möglichkeiten, Aufbau- und Verbindungstechnik in der Elektronik, Bd. 3, Verlag Dr. Markus A. Detert, Berlin, Germany.