

М. И. ЕВСТИФЕЕВ, Д. П. ЕЛИСЕЕВ, Д. В. РОЗЕНЦВЕЙН, И. Б. ЧЕЛПАНОВ

ОСОБЕННОСТИ ИСПЫТАНИЙ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ ГИРОСКОПОВ НА УДАРНЫЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Обосновываются требования к испытаниям микромеханических гироскопов (ММГ) на ударные воздействия. Основным параметром ударного воздействия следует считать произведение низшей собственной частоты ММГ на длительность ударного импульса. Показано, что при больших значениях этого произведения в расчетах можно использовать модель квазистатического нагружения, а длительность ударного импульса во время испытаний можно значительно сокращать при сохранении пиковых значений нагрузок, что снижает требования к ударным стендам.

Испытания на удар занимают важное место в программах испытаний ММГ, при этом экспериментальному определению могут подлежать ударопрочность (способность выдерживать удар без необратимых изменений, в частности без разрушения при возможности возвращения режима нормального функционирования через некоторое время после удара) и ударостойкость (сохранение режима нормального функционирования и во время удара). Параметры требуемого ударного воздействия для различных групп и классов подвижных объектов задаются требованиями стандартов и не подлежат изменению.

Специфика удара как высокодинамического воздействия заключается в кратковременности действия перегрузок. В механике как науке удар представляется первую очередь как физическое явление краткого механического взаимодействия материальных тел, сопровождающегося изменением их кинематических параметров (или параметров движения), а именно скоростей (в общем случае и линейных, и угловых), при больших ускорениях вследствие воздействия (в пределе – мгновенного) бесконечно больших сил [1]. В то же время для механических систем обязательными являются расчеты и испытания на статическое нагружение (при постоянных силах), что упрощает компьютерное моделирование, а иногда и аналитическое решение задач определения деформаций и напряжений в сечениях элементов конструкции прибора. Формулирование критериев оценок влияния динамических воздействий на механическую конструкцию ММГ и обоснование допустимости использования модели квазистатического нагружения для таких оценок применительно к ударным воздействиям представляется актуальной задачей расчета параметров ММГ.

Евстифеев Михаил Илларионович. Доктор технических наук, доцент, начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Академии навигации и управления движением.

Елисеев Даниил Павлович. Инженер ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Розенцвейн Дмитрий Владимирович. Научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Челпанов Игорь Борисович. Доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник ОАО «Концерн ЦНИИ «Электроприбор». Действительный член Академии навигации и управления движением.

Требования к испытаниям на удар и представление импульсов ударного ускорения

Применительно ко многим изделиям и приборам, в том числе и ММГ, предпочтительным считается задание свойств ударного воздействия описанием импульсов ударных ускорений $W(t)$ движения основания (подвижной платформы испытательного стенда), на котором находится прибор. Это определяется прежде всего принципиальными и практическими возможностями измерения и контроля параметров этих импульсных ускорений с помощью линейных акселерометров.

Существующее испытательное оборудование способно задавать лишь одномерные линейные ударные движения. В нормативных документах, в том числе в стандартах по испытаниям на удар [2, 3], всегда предусматривается задание ударных импульсов по определенной оси. При нескольких вариантах задания углового положения оси ММГ осуществляется переустановка прибора с изменением варианта угловой ориентации. В дальнейшем предполагается, что импульс ударного ускорения задается по одной, определенной оси. Для ММГ в большинстве случаев ось наиболее критичного воздействия направлена перпендикулярно плоскости инерционного тела (ИТ) на упругом подвесе.

При формулировании требований к испытаниям и к испытательным стендам, а также в паспортных характеристиках стендов обычно указывается упрощенная, идеализированная форма создаваемого импульса ускорения [2]. Как правило – это полуволна синусоиды или целый её период (рис.1, а, б). Предполагается, что обнаруживаемые при измерениях неконтролируемые отличия формы ударного импульса от номинальной (идеальной) формы можно относить к погрешности, которая обычно велика и имеет порядок 20% от номинала, но в действительности может быть и больше.

Степень гладкости регистрируемого импульса ускорений и его соответствие номинальной форме существенно зависит от полосы частот пропускания используемой аппаратуры. При этом необходимо учитывать, что сама форма импульса часто нестабильна и зависит от большого числа трудно учитываемых факторов. Часто бывает так, что вместо полуволны синусоиды воспроизводится виброударное воздействие сложной формы (рис.1, в) [4–6].

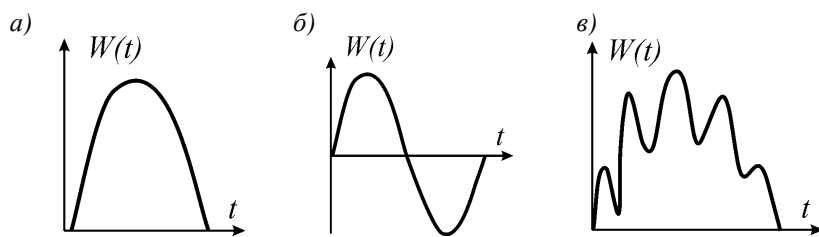


Рис.1. Формы ударных импульсов: в виде полуволны синусоиды (а), в виде целого периода синусоиды (б), в виде сложной зависимости от времени (в)

При коротких импульсах ускорений (меньше миллисекунды) возникает проблема контроля и измерения быстропеременных ускорений. В первую очередь это задача выбора высокочастотных акселерометров с очень широкой частотной полосой пропускания и их правильного размещения на платформе стенда. Данная задача измерений ударных ускорений на стенде представляет предмет отдельного исследования и в настоящей статье не рассматривается.

Длительность T и пиковое значение $W_{\max}$ ускорения ударного импульса $W(t)$ являются основными параметрами, задание которых в программах испытаний на удар всегда является обязательным. Часто задание ускорения ограничивается только этими двумя параметрами без детализации формы импульса.

Для более полного представления формы импульса ускорения нужно увеличивать число параметров импульсов. Эти параметры условно разделяются на интегральные и локальные. Наиболее распространенными интегральными параметрами являются соответственно приращение (потери) скорости и перемещения (тормозного пути) в процессе удара, которые математически представляют два первых момента от ускорения ударного импульса:

$$\Delta V = I_1 = \int_0^T W(\tau) d\tau; \quad \Delta S = I_2 = \int_0^T W(\tau) \tau d\tau.$$

Их удобно записать в следующей форме при нулевых начальных условиях:

$$\Delta V = \lambda \cdot W_{\max} \cdot T; \quad \Delta S = \frac{1}{2} \mu \cdot W_{\max} \cdot T^2, \quad (1)$$

где безразмерные коэффициенты λ и μ имеют порядок единицы и обращаются в единицу при идеализированной прямоугольной форме $W(t)$. Первое из выражений (1) сохраняет смысл также и в предельном случае $T \rightarrow 0$, что соответствует классической теории мгновенного удара испытательного стенда. Анализ динамики воздействия ударов на прибор показывает, что при определенных условиях существенны локальные параметры ударных импульсов. К числу локальных параметров кроме максимального значения $W_{\max}$ ускорения относятся крутизна переднего и заднего фронтов импульса ускорения, показатели плавности зависимости $W(t)$, оцениваемые по вторым производным. Значение этих параметров может быть установлено только после предварительного анализа динамики конструкции при ударном воздействии.

Необходимость и возможность сокращения длительности ударных импульсов

Как правило, механика создания ускорения ударного импульса в ударном стенде такова, что стол вместе с установленным на нем прибором тем или иным способом разгоняется, а импульс создается при быстром торможении стола с установленным на нем объектом испытаний от начальной скорости $V_0 = \Delta V$ до нулевой с помощью специальных тормозных устройств. Подробное рассмотрение большого числа эксплуатируемых ударных стендов показывает, что именно тормозные устройства являются самыми слабыми местами их конструкций и не могут обеспечивать с приемлемой точностью постоянство параметров ударных импульсов.

При воспроизведении ударного импульса торможением после предварительного плавного разгона одна из основных трудностей в создании ударных стендов заключается в том, что при больших значениях произведения $W_{\max} T$ необходимо перед торможением создать большие скорости стола вместе с прибором. Выбор требуемого значения этого произведения, связанного со скоростью V приведенным ранее приближенным первым выражением из уравнений (1), определяется необходимостью обеспечения его соответствия реальным условиям эксплуатации приборов. Эти требования могут оказаться практически невыполнимыми при испытаниях. Например, в артиллерии при выстреле скорость V может быть порядка 2000 м/с. При испытаниях на удар получение таких боль-

ших скоростей практически невозможно. Целью данной работы является обоснование возможности значительного уменьшения начальной скорости V и соответственно времени T удара при сохранении значения $W_{\max}$ и других количественных показателей динамического воздействия импульса ускорения на прибор.

Если условия испытаний жестко не регламентируются и их можно изменять при обоснованных условиях эквивалентности ударных воздействий, то при облегчении реализации режимов испытаний, а именно при уменьшении длительности удара T и, главное, при уменьшении скорости V , следует обращать внимание на вполне определенные свойства и параметры испытуемого прибора. Основным является положение о том, что обоснование возможности значительного сокращения длительности импульса ударного ускорения при сохранении эквивалентности воздействия на испытуемый объект (в данном случае ММГ) определяется его низшими частотами свободных колебаний. Далее для обоснования этого положения формулируются основы подхода к упрощению постановок задач динамики ММГ при ударных воздействиях.

Два типа ударного воздействия

Испытуемый ММГ представляет собой динамическую систему с распределенными параметрами, характеризуемую спектром собственных частот, каждой из которых соответствует своя форма свободных колебаний. При динамических воздействиях определяющим параметром прибора следует считать низшую собственную частоту $\omega_{\min}$ или несколько низших собственных частот, если имеет место разделение уравнений динамики, например, по поступательным или угловым движениям. Частотные спектры реальных изделий определяются многими параметрами их конструкций, однако наблюдается одна общая тенденция: с уменьшением габаритных размеров и масс испытуемых объектов (это является долговременной тенденцией современного приборостроения) собственные частоты изделий растут, что количественно может быть подтверждено на основе использования соотношений теории подобия. Можно констатировать, что миниатюризация приборов, в частности на основе микромеханики, сопровождается увеличением низших собственных частот.

Привязываясь к низшим собственным частотам конструкций ММГ, целесообразно ударные воздействия разделять на две группы: «быстрые» («короткие») и «медленные» («длинные»). Вопрос о том, следует ли считать удар «быстрым» или «медленным», решается на основе сопоставления низших собственных частот с длительностью ударного импульса. В зависимости от соотношения длительности импульса ускорения T и частоты $\omega_{\min}$ в соответствии с методикой, изложенной в [7], выделим следующие два предельных случая.

1. При $(\omega_{\min}T) \ll 1$ импульс является быстрым (коротким). После окончания удара происходят свободные колебания. Общая картина динамических процессов часто сложна, при ударе возбуждаются колебания по нескольким собственным частотам, но ускорения по элементам конструкции, как правило, быстро убывают от точек передачи воздействий в основании. При этом опасные состояния часто возникают в элементах конструкции, близких к основанию. Для этих элементов существенны локальные показатели. Применительно к ММГ следует констатировать, что близкие к основанию элементы конструкции (в местах заделки упругих элементов подвеса) играют роль амортизаторов. Пиковые значения ускорений будут значительно изменяться по конструкции. Лишь для удаленных от основания элементов конструкции форма импульса ускоре-

ния практически значения не имеет, и важны лишь интегральные показатели. При компьютерном моделировании воздействия короткого удара для получения правильных результатов необходимо с одной стороны использовать сложные динамические модели систем со многими степенями свободы, а с другой – учитывать детальную структуру импульса ускорения.

2. При $(\omega_{\min} T) \gg 1$ импульс является медленным (длинным), при этом можно считать, что механическая система испытуемого объекта в этих случаях работает в условиях, близких к статическому нагружению объемными силами инерции (как, например, при испытаниях на центрифуге). При плавности изменения ускорения вблизи максимума импульса можно проводить расчеты и испытания на постоянное ускорение $W_0 = W_{\max}$, которое практически не изменяется по элементам конструкции. При этом длительность импульса не должна быть менее определенного значения. На основании этого можно предполагать, что в данном случае при испытаниях на удар возможно значительное сокращение длительности при сохранении того же значения $W_{\max}$. Однако при этом степень соответствия условиям нагружения при сокращении длительности импульса необходимо оценить, что и делается далее.

Рассмотренные два случая, строго говоря, являются предельными. В широкой области промежуточных значений произведения $\omega_{\min} T$, которое нельзя считать ни малым, ни большим, степень справедливости сформулированных положений определяется уровнем допустимых погрешностей, которые можно оценивать на простых математических моделях.

Структура математической модели ММГ и расчет по модели квазистатического нагружения

В процессе исследования динамики испытуемого ММГ в относительном движении при ударных воздействиях механическая конструкция приближенно представляется, как колебательная система с несколькими степенями свободы, уравнения динамики которой, при отсутствии диссипативных сил, записываются в главных обобщенных координатах q_i : $d^2 q_i / dt^2 + \omega_i^2 q_i = \beta_i W(t)$; ($i = 1, 2, \dots$), где ω_i – собственные частоты, а коэффициенты β_i определяются распределением масс и направлением воздействия ударного импульса. Во время действия удара и на малых интервалах времени после его окончания механическим демпфированием вследствие потерь в материале пренебрегается, так как добротность колебательной системы ММГ очень высока (десятки тысяч) [8].

При одновременном наличии нескольких видов симметрии, что характерно для типовых конфигураций ИТ на упругом подвесе ММГ, можно считать, что первые формы колебаний по главным координатам соответствуют формам распределения статических перемещений под постоянной нагрузкой. Коэффициенты β_i , в общем случае размерные, целесообразно выбрать так, чтобы обобщенные координаты q_i характеризовали максимальные по всей поверхности ИТ линейные перемещения (в точках, в которых существует наибольшая опасность обращения в нуль зазора между ИТ и неподвижными элементами). При этом в формах свободных колебаний учитываются и упругие перемещения ИТ в целом (как твердого тела на упругих элементах подвеса), и деформации с деформацией самого ИТ, которые для типовых конструкций ММГ имеют тот же порядок [9].

При «медленном» ударе в первом приближении в уравнениях динамики можно пренебречь силами инерции (первые слагаемые) и изменения обобщенных координат под действием длинного (медленного) импульса определяются

как квазистатические (изменяющиеся синхронно и пропорционально ускорениям) в соответствии с выражением $q_{i0}(t) \approx \beta_i W(t)/\omega_i^2$.

В действительности на статическое перемещение накладываются упругие колебания (в общем случае переменной амплитуды, а если пренебречь демпфированием, то незатухающие). Амплитуда этих колебаний характеризует добавку к квазистатическому смещению. Использование статических зависимостей позволяет оценивать ударостойкость по перемещению при максимальном в процессе удара значении $W_{\max}$ ударного ускорения.

Оценим на простейшей динамической модели и для типичной формы импульса ускорения точность оценки по квазистатическому перемещению. Применительно к линейным перемещениям в первом приближении задача сводится к интегрированию дифференциального уравнения для линейного перемещения $x(t)$: $d^2x/dt^2 + \omega_0^2 x = W(t)$.

Получим и проанализируем решения в предположении, что реализуется синусоидальное воздействие $W(t) = W_0 \sin vt$, где W_0 – амплитуда ускорения, $v = \pi/T$ – частота вынужденных колебаний, вызванных импульсом в виде полуволны синусоиды.

Это воздействие может описывать односторонний импульс в виде полуволны синусоиды (этому импульсу соответствует конечное приращение скорости ΔV) или в виде импульса с обратной полуволной – целого периода синусоиды (такому импульсу соответствует нулевое приращение скорости и $v = 2\pi/T$). Необходимо оценить, насколько отличается полученная зависимость $x(t)$ от квазистатической $x_{\text{кст}}(t) = (W_0/\omega_0^2) \sin vt$. Для обоих случаев аналитическое решение при нулевых начальных условиях $x(0) = 0$ и $dx/dt(0) = 0$ – одно и то же и имеет вид

$$x(t) = W_0(\omega_0^2 - v^2)^{-1} [\sin vt - v/\omega_0 \sin \omega_0 t], \quad (2)$$

где ω_0 – частота собственных колебаний. Первое слагаемое соответствует вынужденным колебаниям, а второе – свободным колебаниям, которые возникают вследствие скачка производной ускорения при нулевых начальных условиях.

Приведенная формула (2) справедлива и по отношению к виброиспытаниям, и тогда первое слагаемое характеризует установившийся режим, а второе – эффект включения, который проявляется на не очень больших интервалах времени, но в любом случае существенен при оценивании вибростойкости и вибропрочности.

Отличие от квазистатического перемещения $x_{\text{кст}}(t)$ определяется выражением

$$\Delta x(t) = x(t) - x_{\text{кст}}(t) = W_0(\omega_0^2 - v^2)^{-1} [v^2/\omega_0^2 \sin vt - v/\omega_0 \sin \omega_0 t].$$

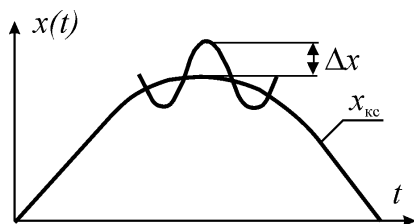


Рис. 2. Перемещение инерционного тела под действием ударного импульса

Учитывая, что для целого периода синусоиды $v = 2\pi/T$, получаем, что условие медленности удара имеет вид $v/\omega_0 \ll 1$. Тогда с точностью до слагаемых первого порядка малости $\Delta x(t) \approx (W_0/\omega_0^2)(v/\omega_0) \sin \omega_0 t$.

Для рассматриваемой задачи оценивания погрешностей от использования предположения о квазистатическом перемещении важным является обязательное увеличение максимального значения отклонения по сравнению с квазистатическим отклонением (рис. 2). Это увеличение экстремального значения приближенно равно ам-

плитуде свободных колебаний, определяемой вторым слагаемым выражения (2) (на рис.2 показано двойной стрелкой).

Максимальное по времени значение перемещения определяется приближенным выражением

$$\max[x(t)] \approx (W_0/\omega_0^2)(1 + v/\omega_0) = (1 + v/\omega_0) \max[x_{\text{ст}}(t)].$$

Таким образом, критерием соответствия приближенных оценок перемещений и напряжений в условиях ударных воздействий, полученных для квазистатического нагружения, можно считать следующую оценку относительной погрешности:

$$\Delta x / \max[x_{\text{ст}}(t)] \approx v/\omega_0. \quad (3)$$

Максимальное значение перемещений точек ИТ под действием импульса ускорений получается всегда несколько больше, чем квазистатическое значение, причем увеличение тем больше, чем больше частота v , т.е. чем короче импульс ускорения. Если потребовать, чтобы это увеличение не превышало 10%, то в соответствии с критерием (3) должно быть выполнено условие $v/\omega_0 < 0,1$. Когда одиночный импульс ускорения представляет собой полуволну синусоиды, то это будет означать, что на полуволне импульса ускорения должно быть не менее

5 периодов свободных колебаний ИТ на упругом подвесе.

Применительно к типовому ММГ, частота свободных колебаний ИТ которого по нормали к его плоскости равна 10 кГц (этому соответствует значение $\omega_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$), получаем, что в испытаниях на ударном стенде длительность ударного импульса должна быть не менее $T_{\min} \approx 0,5 \text{ мс}$. Это условие на минимально допустимую длительность ударного импульса является исходным при проектировании ударного стенда для испытаний микромеханических изделий с собственными частотами поступательных колебаний порядка 10 кГц.

Часто в технических заданиях на испытания встречаются значительно большие значения длительности, а именно порядка 10 мс и выше, что вызывает очень серьезные трудности при построении ударных стендов вследствие того, что необходимо создавать большие скорости движения перед ударом. Проведенное исследование следует считать обоснованием возможности снижения этой скорости на порядок. Например, при $W_0 = 10000 \text{ г}$ и $T = 10 \text{ мс}$ необходима была бы начальная скорость порядка 1000 м/с, что практически нереализуемо. При обоснованном сокращении длительности до $T = 0,5 \text{ мс}$ требуемая начальная скорость будет порядка 50 м/с, что вполне может быть получено с помощью малогабаритных ударных стендов [10].

С другой стороны, поскольку при оценивании ударопрочности по результатам испытаний на нагрузки важны упругие перемещения и напряжения, они могут быть получены при статическом нагружении на центрифуге. Для малогабаритных изделий на испытательных центрифугах можно получать ускорения порядка 10^5 г и даже выше, что значительно превышает возможности современных ударных стендов [11]. Результаты таких испытаний могут быть непосредственно пересчитаны на ударные испытания при условии сохранения медленности удара.

Выводы

Получены критерии соответствия приближенных оценок перемещений и напряжений при ударных воздействиях оценкам, полученным для квазистатиче-

ского нагружения. Показано, что максимальное значение перемещения инерционного тела ММГ под действием импульса ускорений получается всегда несколько больше, чем квазистатическое, причем увеличение тем больше, чем короче импульс ускорения.

Выявлены возможности использования применительно к динамическим ударным и вибрационным воздействиям оценок перемещений и механических напряжений, полученных расчетно для квазистатического нагружения. Определено минимальное значение длительности ударного импульса, позволяющее сохранить эквивалентность воздействия ускорения на параметры ММГ. Показано, что в этих случаях допустимо заменять испытания на ударных стендах испытаниями на центрифугах.

Обоснование возможностей сокращения длительности ударных воздействий при испытаниях ММГ доказывает целесообразность разработки воспроизводящих большие пиковые значения перегрузок малогабаритных ударных стендов с существенно меньшими скоростями разгона подвижных масс, чем это необходимо при больших длительностях импульсов ускорений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ, проект 10-08-00153-а

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лойцянский, Л.Г.** Курс теоретической механики. Т.П. Динамика /Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. - М.: Наука, 1983. - 640 с.
2. **ГОСТ Р 51371-99.** Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие ударов.
3. **MIL-STD-810G.** Department of Defense Test Method Standard. Environmental Engineering Considerations and Laboratory Test. - October 2008.
4. **ГОСТ Р 53190-2008.** Методы испытаний на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на удар с воспроизведением ударного спектра.
5. **Евстифеев, М. И.** Результаты испытаний микромеханических гироскопов при механических воздействиях / М.И. Евстифеев [и др.]// Гироскопия и навигация. - 2011. - № 1. - С.49-58.
6. **Habibi S.** Gun Hard Inertial Measurement Unit based on MEMS capacitive accelerometer and rate sensor / S. Habibi [et al] // Proceedings of IEEE/ION PLANS 2008, May 6–8, 2008.- Hyatt Regency Hotel Monterey, CA, pp. 232 - 237.
7. **Евстифеев, М.И.** Анализ прочности упругих подвесов микромеханических гироскопов / М.И.Евстифеев, Д.В.Розенцвейн, И.Б.Челпанов // Гироскопия и навигация. - 2009. - № 3. - С.22-34.
8. **Результаты** разработки микромеханического гироскопа / В.Г. Пешехонов [и др.] // Гироскопия и навигация. - 2005. - №3. - С.44-51.
9. **Евстифеев, М.И.** Анализ контактных взаимодействий в микромеханических гироскопах / М.И. Евстифеев, Д.В. Розенцвейн // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2010. - № 4. - С. 46-50.
10. **Елисеев, Д.П.** Разработка малогабаритного ударного стенда для испытаний микромеханических датчиков /Д.П. Елисеев, В.П. Серебряков, А.П. Чапурский // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. - 2011. - №4. - С.165-166.
11. **Челпанов, И.Б.** Автоматические технологические машины и оборудование. Испытания машин: Учебное пособие. - СПб: Изд-во Политехн.ун-та, 2008. - 296 с.

Abstract. The requirements to micromechanical gyroscopes shock tests are validating. The product of lowest natural frequency and shock impulse duration should be considered as main parameter of the applied shock. It is shown that if the values of this product are big it is possible to use quasistatic stress model. Also the shock impulse duration can be significantly shortened at conservation of the peak stress values that reduces the requirements to shock test bench.

Материал поступил 25.07.11