

УДК 62-192; 620.19

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЁЖНОСТИ ТЕРМОГЕНЕРАТОРНЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

©2009 А. С. Осипков

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Проводится разработка методологии селекции термогенераторных модулей (ТГМ) для тепловых двигателей на заключительном этапе их сборки путём контроля их качества методом акустической эмиссии. Приведено обоснование выбора акустико-эмиссионного (АЭ) метода контроля качества ТГМ, методическое обоснование информативных признаков АЭ, введены амплитудные информативные параметры АЭ, разработана методика и приведены результаты ресурсных испытаний ТГМ при регистрации сигналов АЭ, предложена методика их селекции.

Двигатель, термогенераторный модуль, контроль качества, надёжность акустическая эмиссия

В современных двигателях внутреннего сгорания (ДВС) только около 30...40% тепловой энергии, получаемой при сгорании топлива, преобразуется в механическую работу. Остальное тепло рассеивается в виде выхлопных газов автомобиля, а также в системе охлаждения двигателя. Даже частичное преобразование этого рассеиваемого тепла в полезную энергию позволит значительно увеличить эффективность ДВС.

Так как современные автомобили снабжены большим количеством электронных и электромеханических устройств, причём наблюдается тенденция к увеличению их количества, а это, в свою очередь, влечёт увеличение потребляемой ими мощности, перспективным является преобразование рассеиваемого тепла в электрическую энергию. Расчёты показывают, что преобразованием 6% тепла выхлопных газов в электрическую энергию можно добиться сокращения расхода топлива на 10% за счет уменьшения нагрузки на двигатель от генератора.

Одним из методов прямого преобразования тепла в электрическую энергию является термоэлектрический метод, основанный на эффекте Зеебека. Этот метод применим везде, где есть разница температур между двумя средами, и его эффективность не зависит от размера источника тепла. Таким образом, термоэлектрический метод применим даже там, где невозможно или экономически нецелесообразно использовать иные способы преобразования тепла, а

именно в небольших источниках с мощностью от 1 ватта до 5 киловатт.

Воплощением термоэлектрического метода являются термогенераторные модули (ТГМ), представляющие собой набор полупроводниковых ветвей, расположенных между двумя теплопроводами. При создании разности температур между теплопроводами за счёт явления термодиффузии на контактах ТГМ появляется разность потенциалов.

В настоящее время одной из основных областей применения термогенераторных модулей (ТГМ) является утилизация бросового тепла на транспортных установках (автомобилях, судах) (рис. 1). Также ведутся работы по внедрению ТГМ в авиационные двигательные установки. На данный момент одним из основных ограничений их распространения как значимого источника энергии является их крайняя ненадёжность и быстрая деградация под воздействием термических перепадов и агрессивных сред.

Анализ причин отказов ТГМ двигательных установок показал, что их значительное число вызвано зарождением и развитием исходных технологических дефектов в виде микротрещин, увеличивающих повреждённость конструкции до критической величины в процессе эксплуатации. Динамика процесса изменения повреждённости конструкции ТГМ обусловлена совокупным влиянием на неё экстремального термомеханического напряжённого состояния отдельных ветвей термоэлементов (ТЭ),

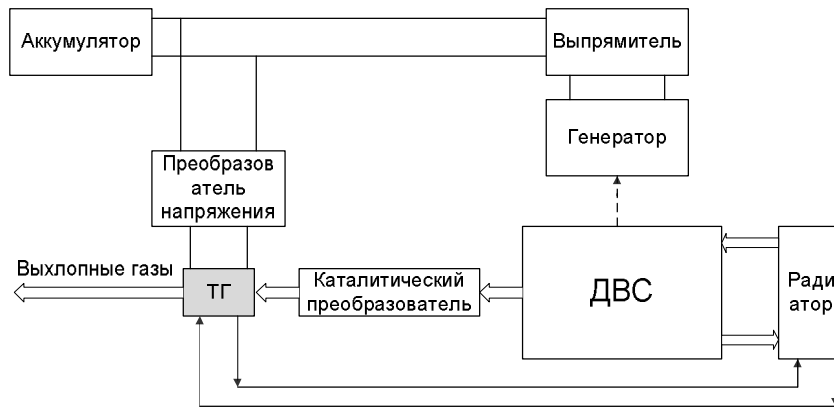


Рис. 1. Схема установки ТГМ

особенно в момент включения и выхода на рабочий режим, а также вероятностным фактором распределения начальной технологической дефектности элементов конструкции [1].

В связи с этим возникает важная технико-экономическая проблема прогнозирования эксплуатационной надёжности ТГМ, в первую очередь их реального ресурса, путем анализа изменения дефектности конструктивных элементов модулей по окончании технологического цикла изготовления. Очевидно, что введение завершающей технологической операции контроля качества ТГМ способно существенным образом повысить эксплуатационную надёжность данного вида изделий ответственного назначения.

Из рассмотрения физико-технологических особенностей энергетических превращений при возникновении и развитии микродефектов в ТГМ в виде нарушений сплошности материала конструктивных элементов следует, что этот процесс неразрывно связан с генерацией высокочастотных волн упругой деформации - волн акустической эмиссии (АЭ) [2]. Поэтому наиболее эффективным методом контроля и диагностики, отвечающим особенностям изменения дефектности ТГМ при эксплуатации, будет метод АЭ.

Теоретическое изучение процесса возникновения и развития микротрещин в элементах конструкции ТГМ по термофлуктуационному механизму показало достаточную для практических нужд информативность параметров АЭ. Это открывает перспективу прогнозирования динамики последующего изменения дефектности

модулей при эксплуатации путём анализа сигналов АЭ, генерируемых в потенциально опасных участках конструкции, при выходном технологическом контроле, т.е. на условно нулевом, начальном диагностическом этапе эксплуатации.

Методические обоснования информативных признаков АЭ

Для контроля качества ТГМ методом АЭ и оценки его ресурса необходимо выявить зависимость

$$R = F_0(AЭ), \tag{1}$$

где R – ресурс ТГМ; $F_0(AЭ)$ – параметры АЭ сигнала на начальном этапе эксплуатации и/или испытаниях ТГМ.

Ресурс ТГМ τ (средняя наработка до отказа) определяется в общем случае из решения уравнения [3]:

$$\int_0^{\tau} dt / \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t)) / kT(t)] = 1 \tag{2}$$

Выражение (2) можно переписать в следующем виде:

$$\omega(t) = \omega_0 + \int_0^t dt / \tau_0 \exp[(U_0 - \gamma\sigma(t)) / kT(t)], \tag{3}$$

где $\omega(t)$ - функция изменения поврежденности конструкции ТГМ, ω_0 – начальное значение поврежденности. При $\omega = \omega_{кр}$ из (3) определяется ресурс ТГМ.

Так как изменение поврежденности во времени определяется зарождением и развитием субмикротрещин в элементах конструкции ТГМ, в первую очередь необходимо найти тот информативный параметр АЭ, который наиболее полно отражает изменение дефектности в элементах конструкции модуля.

В качестве основных и наиболее значимых информативных признаков полезного сигнала АЭ в информативном частотном диапазоне можно использовать следующие энергетические характеристики:

– амплитуду (А) импульса АЭ (максимальную и/или среднюю), которая определяется длиной или приращением образовавшейся или подрастающей микротрещины;

– скорость счета (интенсивность) сигнала АЭ: $N=\Delta N/\Delta t$; где ΔN – число характерных импульсов АЭ, зарегистрированных за промежуток времени Δt .

Более полную информацию о механизмах микроразрушения ТГМ можно получить, используя амплитудный анализ сигналов АЭ.

С физической точки зрения в начальный момент испытаний в материале ТГМ происходит зарождение субмикроскопических трещин вследствие движения и слияния трещинообразующих дислокаций. Эти дефекты имеют малые линейные размеры ($10^{-5} \dots 10^{-3}$ мм) [3], и поэтому волны напряжений, генерируемые ими, имеют малую амплитуду.

Рост субмикроскопических трещин до микроскопических ($10^{-3} \dots 10^{-2}$ мм) приводит к тому, что волны АЭ имеют более значительную амплитуду, чем при зарождении субмикротрещин. Слияние микротрещин в магистральную трещину и ее развитие связано с интенсивным выделением большого количества упругой энергии и сопровождается генерированием сигналов АЭ большой амплитуды.

Таким образом, на начальной стадии нагрузки амплитудное распределение сигналов АЭ имеет преобладающее число сигналов малой амплитуды, а в момент, предшествующий разрушению, наблюдается характерный всплеск относительного числа сигналов большой амплитуды. Изменение амплитудного спектра сигналов позволяет получать информацию об изменении кинетики зарождения и развития дефектов.

Перспективность амплитудного анализа сигнала АЭ для диагностики дефектности

конструкций при сложном термосиловом режиме испытаний и/или эксплуатации, которые характерны для ТГМ, обусловлена возможностью энергетической селекции сигнала от шумов, а также высокой информативностью формы кривой, описывающей амплитудное распределение.

Проведение и результаты испытаний ТГМ

Для экспериментальных исследований был собран диагностический стенд (рис. 2) на базе двухканальной акустико-эмиссионной системы Малахит АС-15, позволяющий проводить непрерывную регистрацию АЭ сигналов ТГМ при испытании его на надёжность путем циклического нагружения вплоть до отказа модуля.

В процессе испытания на модуль подавалось напряжение $14В \pm 1\%$, полярность которого изменялась с периодом 90с. Приведённые на рис. 2, 3 температурные режимы испытания не превышают допустимых по ТУ условий эксплуатации ТГМ (максимальная температура $85^{\circ}C$).

Помимо регистрации сигналов АЭ в процессе испытания производилось измерение сопротивления ТГМ RLC-метром Е7-22 на частоте переменного тока 1кГц с погрешностью $\pm 2\%$.

Сбор и первичная обработка регистрируемых сигналов проводилась на персональной ЭВМ с помощью пакета специализированных программ АЕ Studio. Однако при анализе амплитудных распределений сигналов возможностей данной программы оказалось недостаточно, так как требовалось получать численные значения информативного параметра. С этой целью акустико-эмиссионная база данных, содержащая полную информацию о зарегистрированных сигналах, преобразовывалась в формат MS Access и далее передавалась в среду MathCad, где производилась дальнейшая математическая обработка сигналов.

Анализ амплитудных распределений при циклическом термосиловом нагружении ТГМ показал возрастание больших амплитуд сигналов АЭ при увеличении числа циклов. При этом можно выделить диапазоны 35...42 дБ и 38...48 дБ, 48...60 дБ, где этот

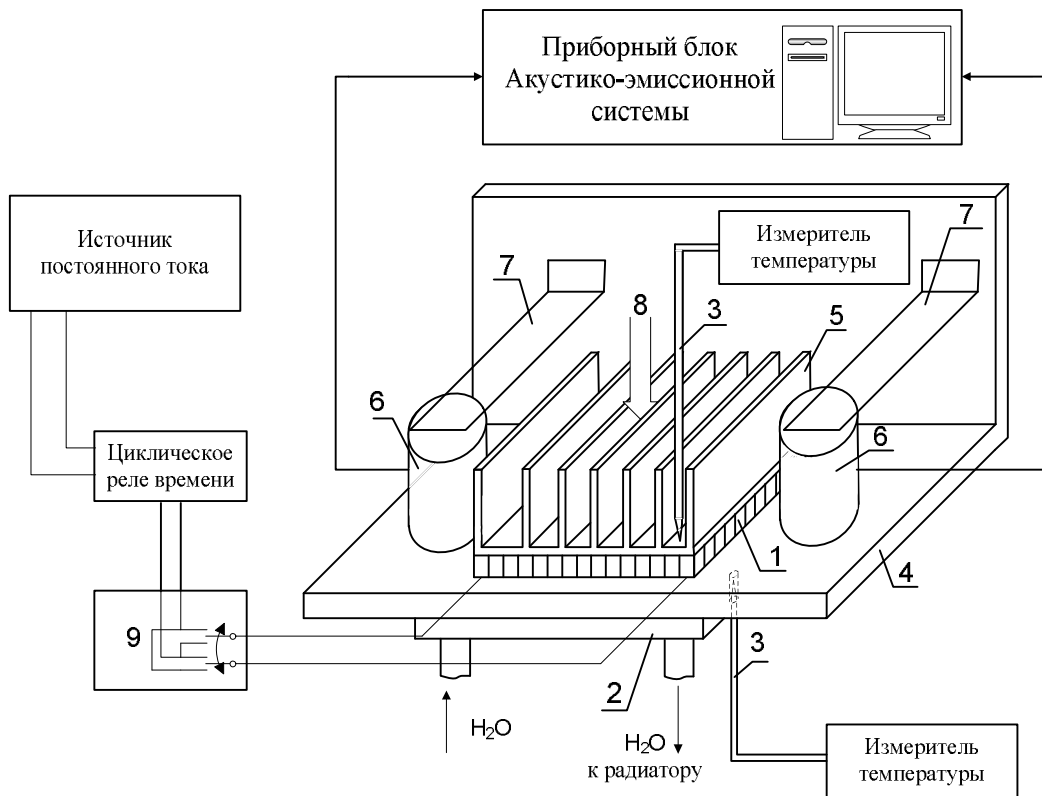


Рис. 2. Схема диагностического стенда для непрерывной регистрации АЭ сигналов ТГМ при испытании его на надёжность:

1-.....; 2 – водяной теплообменник; 3 – термоэлектрический преобразователь (термопара); 4 – нижний «холодный» радиатор; 5 – верхний «горячий» радиатор; 6 – преобразователь акустико-эмиссионный (ПАЭ); 7 – прижимы ПАЭ; 8 – прижимная нагрузка; 9 – промежуточное реле с 2- переключающими группами

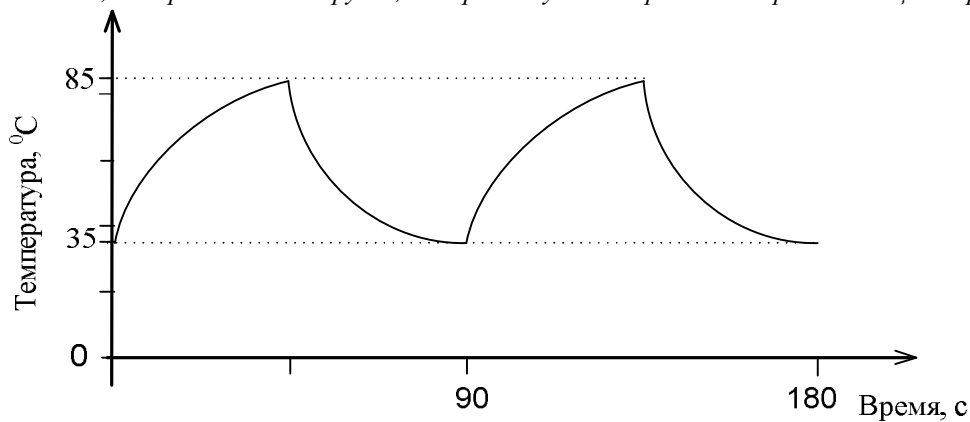


Рис. 3. График изменения температуры верхнего «горячего» радиатора (установившийся режим)

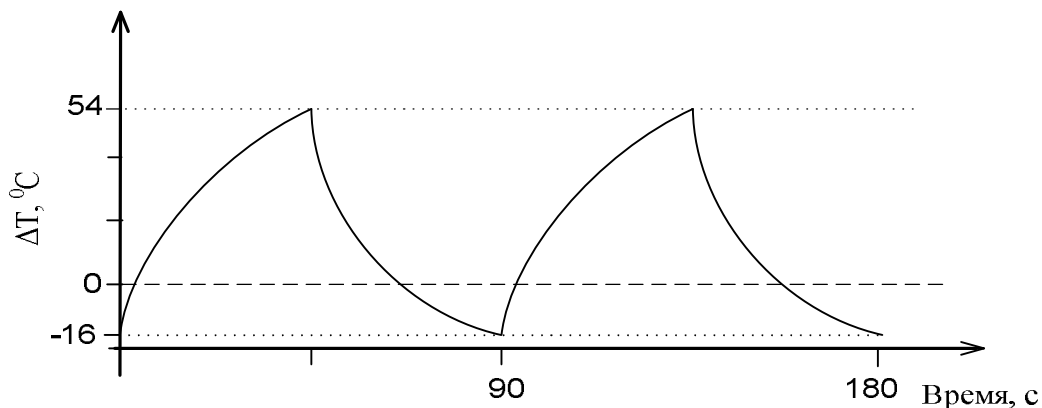


Рис. 4. График изменения разности температур между теплопроводами ТГМ (минус соответствует изменению направления деформации теплопроводов)

процесс происходит наиболее интенсивно. Причем в первые 2,5 тыс. циклов нагружения для анализа изменения дефектности конструкции ТГМ наиболее эффективен первый амплитудный диапазон. Далее происходит смещение амплитудного распределения в сторону увеличения амплитуд сигналов

АЭ. При этом наблюдается интенсивный рост сопротивления ТГМ. На рис. 4 показаны амплитудные распределения сигналов после 600 (рис. 4а) и 4000 (рис. 4б) циклов при испытании его на надёжность по описанной выше методике.

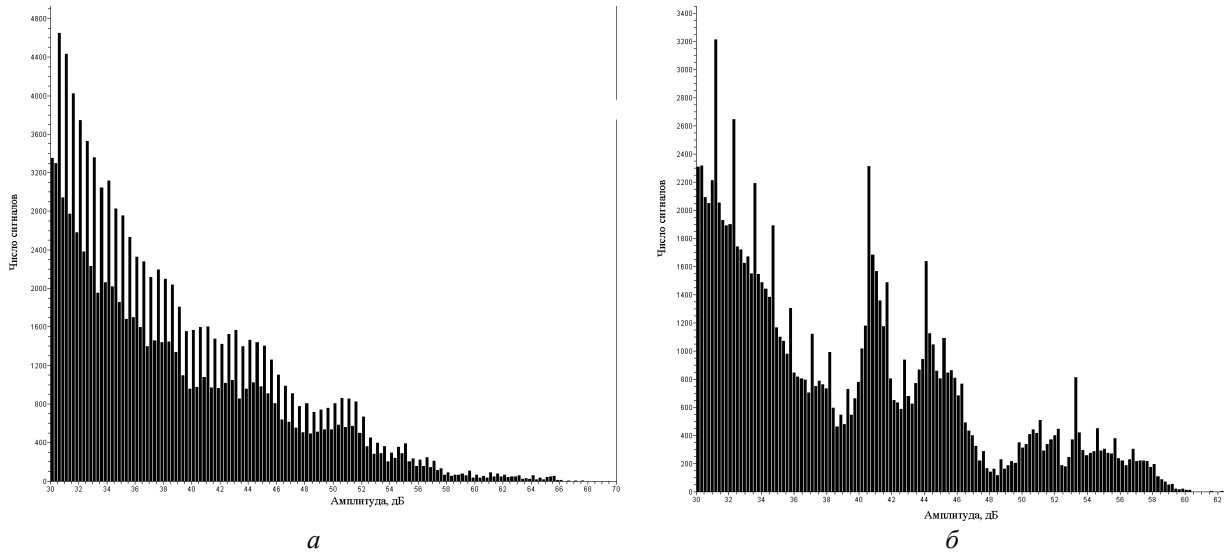


Рис. 5. Амплитудные распределения сигналов АЭ при циклическом термосиловом нагружении ТГМ (порог дискриминации 30дБ): после 600 (а) и 4000 (б) циклов

На основе анализа проведенного теоретического и экспериментального анализа изменения АЭ сигналов при термосиловом нагружении ТГМ были введены амплитудные информативные параметры, представляющие собой отношение энергии сигналов АЭ в определенном амплитудном диапазоне к энергии в диапазоне 30-35 дБ, позволяющие про-

водить оценку изменения дефектности и прогнозировать остаточный ресурс ТГМ (рис. 6).

На рис. 6 приведены критические значения информативных параметров, при которых происходит отказ ТГМ (критерий отказа – выход сопротивления (рис. 7) за пределы поля допуска).

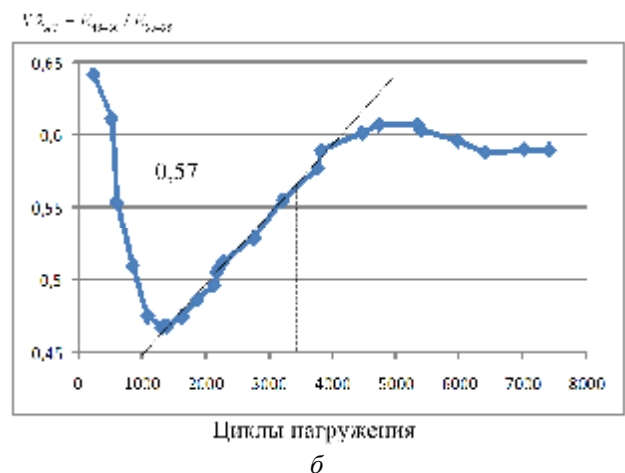


Рис. 6. Изменение информативных параметров АЭ при циклическом нагружении ТГМ: $X1_{aэ} = E_{35-42} / E_{30-35}$ (а); $X2_{aэ} = E_{38-48} / E_{30-35}$ (б)



Рис. 7. Изменение сопротивления при циклическом нагружении ТГМ

Из рис. 6,7 видно, что динамика изменения введенных информативных параметров АЭ более эффективно отражает изменение дефектности элементов конструкции ТГМ по сравнению с изменением его сопротивления.

Методику селекции ТГМ можно построить на регистрации АЭ-сигналов при ограниченном числе циклов (50...100) нагружения ТГМ и вычислении первых производных введенных параметров: $dX1_{АЭ}/dt$, $dX2_{АЭ}/dt$. Селекцию ТГМ в этом случае можно произвести по трем уровням качества:

- 1) $dX1_{АЭ}/dt < 0$ и $dX2_{АЭ}/dt < 0$ (высокая надёжность);
- 2) $dX1_{АЭ}/dt > 0$ и $dX2_{АЭ}/dt < 0$;
- 3) $dX1_{АЭ}/dt > 0$ и $dX2_{АЭ}/dt > 0$ (низкая надёжность).

Заключение

Таким образом, создаются реальные теоретические и экспериментальные предпосылки для использования метода АЭ в качестве эффективного средства контроля и диагностики для технологического прогнозирования эксплуатационного ресурса ТГМ для двигательных установок, их кратковременных автоматизированных испытаний на завершающем этапе изготовления.

По нашей оценке автомобильная термогенераторная система позволит преобразо-

вывать от 0,5 до 5 кВт тепловой энергии выхлопных газов. При 5% КПД ТГМ это позволит получить электрическую энергию мощностью до 750 Вт, что сравнимо с мощностью обычного автомобильного генератора.

Библиографический список

1. Анатычук, Л.И. Термоэлементы и термоэлектрические устройства/ Л.И. Анатычук– Киев: Наукова думка, 1979. – 766с.
2. Барзов, А.А. Эмиссионная технологическая диагностика. Библиотека технолога/ А.А. Барзов – М.: Машиностроение, 2005. -384с.
3. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Служкер, Э.Е. Томашевский – М.: Наука, 1974. – 560с.

References

1. Anatichek L.I. Thermoelements and Thermoelectric devices. Kiev: Naukova dumka, 1979.
2. Barzov A.A. The emission technological diagnostics. Technologist's Library. M.:Mashinostroenie, 2005.
3. Regel V.P, Slutsker A.I, Tomashevskiy E. M. Kinetic nature of solids strength. M.: Nauka, 1974.

**OPERATE RELIABILITY ENHANCEMENT OF THERMOGENERATOR MODULES
FOR HEAT ENGINE WITH ACOUSTIC EMISSION METHOD**

© 2009 A. S. Osipkov

Bauman Moscow State Technical University

Methodology preparation of thermogenerator modules (TGM) selection for heat engine in backend of the assembly process with acoustic emission method is carried out. Acoustic emission (AE) method and its informative attributes are justified for TGM quality control. Special amplitude informative AE parameters were introduced for this purpose. There are also results of TGM longevity test with AE signals registration and selection method in this paper.

Engine, thermoelectric module, quality control, reliability, acoustic emission

Информация об авторе

Осипков Алексей Сергеевич, аспирант Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Тел. 8-916-114-45-89. E-mail: alexosipkov@mail.ru. Область научных интересов: надёжность технических систем, неразрушающий контроль.

Osipkov Alexey Sergeevich, post-graduate student of the department «Instrument-making Technologies» of Bauman Moscow State Technical University. Tel: 8-916-114-45-89. E-mail: alexosipkov@mail.ru. Area of research: Reliability of Technical Systems, nondestructive check.