



**МОСКОВСКИЙ АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ
ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)**

Кафедра промышленно-транспортной экологии

Утверждаю
Зав. кафедрой, профессор
_____ Ю.В.Трофименко
« _____ » _____ 2001 г.

В.Е.Тольский, Б.А.Виноградов, С.В. Шелмаков

**Методические указания
к лабораторным работам по курсу
«Экологические испытания автомобилей»
Часть 2**

Москва 2001 г.

УДК
БК

Лабораторная работа «Определение вибрации автомобиля при холостом ходе двигателя»

Цель работы: практическое освоение студентами методов и средств оценки вибрации автомобиля.

Общие положения

Объектом испытания является автомобиль с четырехцилиндровым двигателем. Вместе со сцеплением и коробкой передач этот двигатель установлен на резиновых опорах силового агрегата. Четырехцилиндровый двигатель имеет два основных возмущающих фактора, определяющих его вибрацию [1]. Один из них связан с газовыми силами, которые возникают в цилиндрах двигателя. Под действием газовых сил образуется опрокидывающий момент. В результате на опорах двигателя возникает вибрация, вызванная действием суммарного опрокидывающего момента рассматриваемого четырехцилиндрового четырехтактного двигателя. В цилиндрах такого двигателя за каждый оборот коленчатого вала происходит два рабочих процесса. Весь рабочий процесс происходит за два оборота коленчатого вала, поэтому основная гармоника опрокидывающего момента рассматриваемого четырехцилиндрового двигателя проявляет себя с частотой $2n/60$, где n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} . Поскольку характер изменения суммарного опрокидывающего момента двигателя имеет периодический характер, то кроме гармоники второго порядка могут возникать гармоники и более высокого порядка, например, гармоника 4-го или 6-го порядка. Предполагается, что во всех цилиндрах двигателя протекают идентичные рабочие процессы. Однако практически всегда, особенно при малой частоте вращения коленчатого вала двигателя, топливо по цилиндрам распределяется неравномерно, что вызывает неодинаковое протекание рабочего процесса по цилиндрам. Это вызывает появление гармоник опрокидывающего момента двигателя с частотой ниже, чем $2n/60$. Например, если один из четырёх цилиндров вообще не работает, то

появляется гармоника половинного порядка. Процесс, который происходит при малых оборотах коленчатого вала двигателя и вызывается неравномерностью протекания рабочих процессов по цилиндрам, является случайным процессом. Поэтому амплитуды гармоник низшего порядка имеют также случайный характер.

Таким образом, основная вынужденная частота, возникающая при работе четырехцилиндрового двигателя, как упоминалось выше, равна $2n/60$. Кроме суммарного опрокидывающего момента, в четырехцилиндровом рядном двигателе проявляется неуравновешенная сила, вызванная движением возвратно-поступательных частей кривошипно-шатунного механизма. Равнодействующая этих сил действует в вертикальном направлении и расположена посередине двигателя. Неуравновешенная сила инерции второго порядка существенным образом зависит от частоты вращения коленчатого вала двигателя. Если амплитудное значение гармоник опрокидывающего момента двигателя имеют наибольшие значения при малых оборотах коленчатого вала двигателя, то второй возмущающий фактор – неуравновешенная сила инерции второго порядка проявляется в наибольшей степени при максимальной частоте вращения коленчатого вала двигателя. При этом режиме работы двигателя в наибольшей степени проявляется также остаточная неуравновешенность вращающихся деталей двигателя с частотой $n/60$.

Двигатель, установленный вместе со сцеплением и коробкой передач на резиновых опорах можно представить в виде твердого тела с шестью степенями свободы.[1, 2]. То есть он может перемещаться в вертикальном, продольном и поперечном направлениях и вращаться вокруг вертикальной, продольной и поперечной осей. Эти перемещения показаны на рис. 1. Вокруг продольной оси действуют гармоники опрокидывающего момента. Это колебания вокруг оси X (см. рис. 1). В вертикальном направлении вдоль оси Z действует неуравновешенная сила второго порядка. Раз двигатель имеет шесть степеней свободы, значит он имеет шесть

собственных частот. Из них наиболее важными являются две частоты – вокруг оси X и вдоль оси Z, т.е. в тех направлениях, в которых действуют основные возмущающие факторы. Мы не можем влиять на частоту возмущающих сил, т.к. они присущи выбранной конструкции двигателя (для нашего случая - четырехцилиндровый, рядный). Если мы хотим повлиять на вибрацию двигателя с целью её уменьшения, то мы можем сделать это за счёт правильной установки двигателя на раме или кузове автомобиля. У всех двигателей резонансная частота расположена ниже минимально возможной частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Значение минимальной частоты вращения автомобильного бензинового двигателя составляет обычно около 900 мин^{-1} . Таким образом, основная гармоника опрокидывающего момента рассматриваемого двигателя при этой частоте коленчатого вала будет равна 30 Гц.

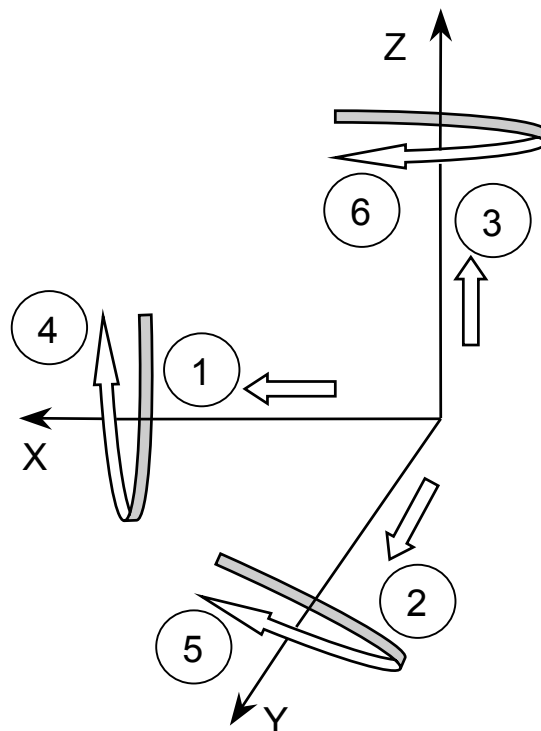


Рис. 1. Степени свободы двигателя, установленного на упругих опорах

Резонанс наступает, когда отношение вынужденной частоты к собственной частоте равно 1. Задача заключается в том, чтобы так

выбрать подвеску силового агрегата, чтобы отношение вынужденной частоты к собственной частоте при минимально устойчивых оборотах холостого хода двигателя примерно было равно 2 [1]. В этом случае мы имеем резонансные колебания силового агрегата и значение коэффициента динамичности силового агрегата меньше единицы.

Таким образом, при проектировании подвески силового агрегата ставится задача так подобрать собственную частоту вокруг оси X, чтобы отношение вынужденной частоты $2n/60$ и собственной частоты вокруг оси X было не меньше 2. Следовательно, собственная частота вокруг оси X силового агрегата должна быть не более 15 Гц.

Наибольшее виброперемещение силового агрегата автомобиля происходят при частоте вращения коленчатого вала двигателя наиболее близкой к резонансной, т.е. при минимально-устойчивых оборотах холостого хода двигателя. По мере увеличения частоты вращения коленчатого вала виброперемещение силового агрегата уменьшаются.

Одной из задач лабораторной работы (экспериментальных исследований вибрации двигателя) является определение уровня и характера его вибрации при разных частотах вращения коленчатого вала.

Параметры вибрации

При периодических колебаниях объекта (в данном случае двигателя) существуют три параметра, характеризующих вибрацию:

- виброперемещение, выражаемое в мм,
- виброскорость, выражаемая в м/с,
- виброускорение, выражаемое либо в долях g , либо в $м/с^2$.

Можно измерять любой из параметров отдельно, либо последовательно все три параметра. Выбор параметров определяется ещё и типом датчика, используемого при измерениях. В нашем случае применяется акселерометр, т.е. датчик, в котором вибрация превращается в электрический сигнал, пропорциональный виброускорению. При использовании интегратора можно получить

значения виброскорости или виброперемещений. Но в этом случае сигнал, подвергаемый интегрированию, значительно ослабевает. Это может привести к возникновению различных помех и шумов, которые становятся соизмеримыми с полезным сигналом, особенно при определении виброперемещений. Поэтому в данной работе целесообразно измерять только виброускорение (интегратор отсутствует), а затем полученные значения виброускорений пересчитать по известным формулам в значения виброскорости и виброперемещений.

Методика экспериментального определения виброизоляции подвески силового агрегата автомобиля

Вибрация определяется над опорой и под опорой силового агрегата. Это позволяет определить степень гашения вибрации, которая обеспечивается виброизолятором (резиновой опорой).

Методика измерения вибрации в вертикальном направлении силового агрегата и рамы автомобиля при холостом ходе двигателя заключается в следующем:

Акселерометр поочередно устанавливается на переднюю опору двигателя и на поперечину рамы (кузова) автомобиля. При испытаниях измерения виброускорений проводятся при различных частотах вращения коленчатого вала двигателя на холостом ходу. Сначала проводят измерения при минимально устойчивой частоте вращения коленчатого вала, где ожидаются максимальные виброперемещения силового агрегата. Затем проводят измерения при нескольких других значениях частоты вращения коленчатого вала двигателя.

Количественный и качественный анализ вибрации

Под количественным анализом вибраций понимают определение общего уровня вибраций (в нашем случае – уровня виброускорений в дБ). Для определения общего уровня виброускорений можно принять значения частот вращения коленчатого вала двигателя, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Протокол испытаний виброизоляции подвески силового агрегата
автомобиля

Частота вращения, мин ⁻¹	Общий уровень виброускорений, дБ	
	Точка 1 (опора двигателя)	Точка 2 (рама (кузов) автомобиля)
900		
1500		
2000		
2500		
3000		
Норма*	6·10 ² м/с	

Но общий уровень вибрации несёт очень мало информации о причинах, вызывающих вибрацию. Поэтому необходимо, кроме определения общего уровня вибрации, измерять частотный спектр виброускорений. Для этого с помощью анализатора проводится частотный анализ. При этом можно видеть какая составляющая спектра имеет наибольший уровень, выявить частоту этой составляющей и анализировать причины, предопределяющие измеренный ранее общий уровень виброускорений.

Предлагается общий уровень вибрации определять при нескольких значениях частот вращения коленчатого вала двигателя, а спектральную характеристику вибраций (октавный спектр виброускорений) определять только при минимально устойчивой частоте вращения коленчатого вала двигателя - 900 об/мин, а также при 3000 об/мин (см. табл. 2). В этом случае можно выяснить как скоростной режим работы двигателя меняет частотные спектры виброускорений.

Таблица 2

* Рекомендуемые предельные значения виброскорости, м/с, в вертикальном направлении при 4000 мин⁻¹ для двигателя мощностью 72 – 77 л.с. (РД 37.001.008-83)

Октавные спектры виброускорений двигателя и рамы (кузова)
автомобиля

Октавы, Гц	Общий уровень виброускорений, дБ			
	n=900 мин ⁻¹		n=3000 мин ⁻¹	
	Точка 1	Точка 2	Точка 1	Точка 2
31				
63				
125				
250				
500				
1000				
2000				
4000				

После того, как будет оценен общий уровень вибраций при различных частотах вращения коленчатого вала двигателя, и спектры виброускорений при двух режимах работы двигателя, можно перейти к исследованию виброизоляции опоры силового агрегата. Это очень важный момент, т.к. чем меньше вибрации передаётся на раму (кузов), тем меньше она воздействует на водителя и пассажиров автомобиля. Измерения проводятся над опорой (точка 1) и под опорой (точка 2) силового агрегата.

Методика определения уровня локальной вибрации на рулевом колесе автомобиля

Третья точка измерения вибрации выбирается на рулевом колесе автомобиля, с тем, чтобы исследовать влияние на передачу вибраций не только характеристик опор силового агрегата, но и других деталей и агрегатов автомобиля.

При измерении вибрации рулевого колеса ограничимся измерением виброускорений только в одном перпендикулярном направлении Y_p (см. рис. 2).

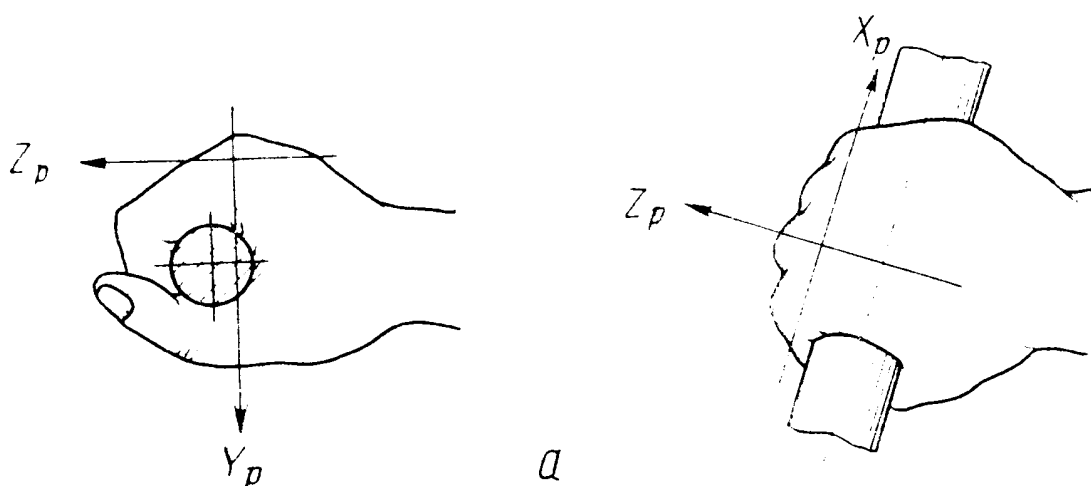


Рис. 2. Направления измерения локальной вибрации на рулевом колесе автомобиля

Значения измеренной локальной вибрации заносятся в табл. 4, где также приведены допустимые значения (нормы) согласно ГОСТ 12.1.012-78 «Вибрация. Общие требования безопасности».

Таблица 4

Общий уровень виброускорений рулевого колеса (точка 3)

Октавы, Гц	Уровень виброускорений		Нормы
	дБ	м/с ²	
63			5,4
125			10,7
250			20,3
500			42,5
1000			85

Таким образом, измерив виброускорения в 3-х точках на автомобиле при работе двигателя на холостом ходу, мы определим ту вибрацию, которую вызывает работающий двигатель, и сравним полученные значения с требованиями нормативных и руководящих документов.

Крепление акселерометра и погрешности, возникающие при измерении вибрации двигателя

Очень важен вопрос крепления вибродатчика в месте измерения вибрации. Лучше всего крепить его на жёсткой шпильке. Но это не всегда возможно и поэтому применяют различные способы крепления, в том числе на магните, на воске, с помощью виброщупа и т.д. Однако при этом резонансные частоты могут смещаться в сторону малых частот. Поэтому прежде, чем проводить измерения, необходимо убедиться в том, что ни магнит, ни виброщуп не вносят погрешность в результаты измерений. Строго говоря, наличие любых промежуточных деталей крепления, расположенных между датчиком и местом измерения вибрации крайне нежелательно, т.к. они вносят существенные погрешности в результат эксперимента [3].

Если применяется постоянный магнит, то резонанс следует ожидать при 7 кГц, если применяется ручной щуп, то резонанс появляется при 2 кГц. При креплении датчика при помощи шпильки или клея резонанс сдвигается в область больших частот и наступает примерно при 28 кГц. Для измерений вибрации двигателя применение ручного щупа нежелательно, поскольку при этом резонанс наиболее близок к рабочему диапазону частот вибрации двигателя. Применение магнита удобно, т.к. можно быстро произвести измерения, однако магнит может значительно исказить картину вибрации, если он установлен на деталь с малой массой. Что касается допустимых виброускорений, то магнит обычно работает до ускорений порядка $1000 - 2000 \text{ м/с}^2$ в зависимости от собственной массы акселерометра.

В качестве склеивающих материалов рекомендуется применять эпоксидные смолы и цианакриловые клеи. Применение мягких клеев может привести к значительному уменьшению рабочего частотного диапазона акселерометра.

На погрешности, возникающие при измерении вибрации, сказываются также условия внешней среды. Обычный акселерометр устойчиво (нормально) работает при температуре до 250°C . Для

нашего случая измерение возможно, поскольку опоры силового агрегата автомобиля имеет температуру не более 70^oC.

В качестве помехи, влияющей на точность измерений вибрации, следует учитывать также «шум» кабелей, которые соединяют датчик с регистрирующим прибором. Этот так называемый «трибоэлектрический шум» связан с механическим движением соединительных кабелей. Для его минимизации необходимо, чтобы при измерении вибрации соединительный кабель не совершал никаких движений и не касался деталей, совершающих вибрацию.

Должно быть обеспечено контрзаземление, т.е. эффективным методом устранения шумов разного рода является электрическая изоляция акселерометра, обеспечиваемая заземленной шпилькой и слюдяной шайбой.

К погрешностям следует также отнести деформацию основания, на котором устанавливается вибродатчик. Если эта деформация слишком сильна, то возникает паразитная вибрация, связанная с деформацией основания. Таки образом может возникнуть паразитный электрический сигнал, никак не связанный с измеряемой вибрацией (полезным сигналом).

С целью уменьшения этого эффекта акселерометр следует крепить к жестким деталям. Нельзя применять промежуточные кронштейны, т.к. в этом случае происходит искажение в измерении вибрации, поскольку промежуточный кронштейн имеет свои вибродинамические характеристики, которые негативно сказываются и искажают полезный сигнал [3].

Большая влажность окружающей среды также отрицательно влияет на измерение вибрации. Поэтому при большой влажности проводить измерения вибрации нежелательно.

Что касается акустических шумов, генерируемых другими машинами, то они мало сказываются на точности результатов измерения и анализа механических колебаний.

Есть ещё одно обстоятельство, которое может исказить картину вибрации. Речь идёт о том, что акселерометры чувствительны к

механическим колебаниям перпендикулярным поверхности, на которой они закреплены, а также колебаниям в поперечных направлениях. Поперечная чувствительность, т.е. чувствительность к колебаниям, в перпендикулярной к главной оси датчика плоскости, не должна быть высокой. Если она не превышает 3...4% от чувствительности в направлении главной оси, то такой акселерометр пригоден для измерений вибрации.

Электромагнитный шум также является шумом, который крайне нежелателен при измерениях вибрации.

Калибровка акселерометров

Это процедура очень важная, т.к. позволяет проверить качество проводимого эксперимента. Калибровка вибродатчиков обычно производится до испытаний и после испытаний. Калибровка происходит на специальном вибрационном столе, где на горизонтальный участок стола крепится акселерометр и производится его калибровка при тарированном вибрационном сигнале. Обычно таким сигналом является ускорение, равное 1g или 10 м/с². По этому сигналу тарируется вся шкала измерительного прибора.

В нашем случае в качестве усилителя сигнала применяется шумомер производства фирмы «Роботрон», ГДР. Этот прибор является универсальным, поскольку может использоваться как для измерения шума, так и вибрации. Шкала этого прибора проградуирована в децибелах, т.е. она предназначена для измерения уровня шума или уровня виброускорения. Поэтому при тарировке сигнала, равного 1g, необходимо знать, сколько по шкале этого прибора такому сигналу соответствует децибел. В этом случае необходимо знать зависимость отношения амплитуд колебаний от разности вибраций (см. табл.3).

Таблица 3

Зависимость относительных амплитуд вибрации от их разности, выраженной в дБ

Разность уровней вибрации, дБ	Отношение амплитуд вибрации	Разность уровней вибрации, дБ	Отношение амплитуд вибрации
0	1	10	3,16
1	1,22	11	3,55
2	1,26	12	4,0
3	1,41	13	4,47
4	1,58	14	5,0
5	1,78	15	5,62
6	2	16	6,31
7	2,24	17	7,1
8	2,51	18	7,95
9	2,82	19	8,91
-	-	20	10

Обработка результатов измерения вибрации

После получения результатов измерения следует их проанализировать. При таком анализе целесообразно руководствоваться требованиями РД для двигателей различных типов (см. табл.4). В этой таблице данные представлены в размерности виброскорости, т.е. в м/с. Однако по формуле (1) можно пересчитать значение вибрации, выраженной в виде виброускорений в значение вибрации, выраженной в виде виброскорости.

$$A_j = (2\pi f)^2 \cdot A \quad (1)$$

$$A_v = 2\pi f \cdot A \quad (2)$$

где A , A_v , A_j – соответственно амплитуды виброперемещений, виброскорости и виброускорений;

f – частота вынужденных колебаний.

После такого пересчёта можно проводить сравнения.

Что касается вибрации пола, сидения и руля, то здесь необходимо обращаться к такому документу, как ГОСТ 12.1.012-78 «Вибрация. Общие требования безопасности».

По способу передачи вибрации на человека она подразделяется на общую, т.е. такую, которая передаётся через опорные поверхности на тело сидящего или стоящего человека, и локальную, которая передаётся через руки человека (рис.2).

По направлению действия вибрация подразделяется на вертикальную и горизонтальную.

По источнику возникновения общая вибрация делится на несколько категорий. Мы будем иметь дело с вибрацией первой категории, т.е. транспортной вибрацией, действующей на оператора машин и транспортных средств при их движении по различной местности и различным дорогам.

Условно будем считать, что измеренная нами вибрация также относится к транспортной вибрации (условно, поскольку автомобиль не движется). Поэтому можно сравнивать полученные значения вибрации на полу и на руле с нормами ГОСТ 12.1.012-78.

Данный ГОСТ и те диапазоны частот, в которых ограничивается вибрация, действующая на оператора или на пассажира, основываются на международном стандарте ИСО 2631, где определены границы частотных диапазонов для исследования и анализа вибрации.

Общая вибрация контролируется в диапазоне частот от 1 Гц до 80 Гц, а локальная вибрация, действующая на руки человека, ограничивается диапазоном от 8 Гц до 1000 Гц. Это обстоятельство надо учитывать при сравнении измеренной вибрации с нормами ГОСТа. Общая вибрация оценивается в области низких частот до 80 Гц и обусловлена теми возмущающими факторами, которые вызываются движением автомобиля. Поскольку мы оцениваем вибрацию при неподвижном автомобиле и делаем анализ виброускорений, начиная с 63 Гц, то следует сравнивать полученные

при измерениях данные по вибрации рулевого колеса (см. табл. 4) с допустимыми значениями, которые относятся к локальной вибрации.

Нормирование вибрации может быть осуществлено и по общему уровню вибрации. Для локальной вибрации при непрерывной работе, равной 480 мин, это 4м/с (см ГОСТ 12.1.012-78).

Гигиенические нормы вибрации, воздействующей на человека, при рассмотренном выше частотном анализе (см. табл. 5), установлены для длительности воздействия также 480 мин, т.е. 8 часов непрерывной работы машины или автомобиля.

Таблица 5

Допустимые значения локальной вибрации

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Допустимые значения нормируемого параметра		
	по виброускорению	по виброскорости	
	м/с ²	м/с*10 ⁻²	дБ
31	2,7	1,4	109
63	5,4	1,4	109
125	10,7	1,4	109
250	21,3	1,4	109
500	42,5	1,4	109
1000	85,0	1,4	109

Таким образом, имея перечисленные выше руководящие документы, которые говорят о допустимых уровнях вибрации, можно дать оценку измеренных уровней вибрации в различных точках: на опорах силового агрегата, на полу и руле.

Вопросы

1. Какие возмущающие факторы определяют вибрацию 4-х цилиндрового рядного двигателя (P-4).
2. От каких возмущающих факторов зависит уровень вибрации двигателя P-4 при разной частоте вращения коленчатого вала.
3. Сколько степеней свободы имеет двигатель на упругой подвеске.
4. Резонансные колебания двигателя (силового агрегата) на подвеске (где расположен резонанс).
5. Как можно изменить резонансные колебания двигателя (силового агрегата) на подвеске.
6. Параметры, характеризующие вибрацию двигателя.
7. Как определить виброизоляцию при работающем двигателе.
8. Анализ частотного спектра вибрации 4-х цилиндрового рядного двигателя (P-4).
9. Что такое общая и локальная вибрация применительно к автомобилю?
10. Какие погрешности могут возникать при измерении вибрации двигателя?
11. Какие способы крепления акселерометров применяются на практике?
12. Как осуществляется калибровка акселерометров.

Литература

1. Тольский В.Е., Корчемный Л.В., Латышев Г.В., Минкин Л.М. Колебания силового агрегата автомобиля, «Машиностроение», 1976
2. Тольский В.Е., Горшков Ю.В., Коваль А.П. Методические указания к расчетному исследованию вибрации двигателя. МАДИ, 1989
3. Воронцов С.А., Латышев Г.В., Тольский В.Е. О погрешностях при измерении вибрационного ускорения двигателя внутреннего сгорания Сб. «Снижение вибраций и колебаний дизелей», вып.8, 1969, НИИИНФОРМТЯЖМАШ.

Содержание

Лабораторная работа «Определение вибрации автомобиля при холостом ходе двигателя»	2
Общие положения	2
Параметры вибрации	5
Методика экспериментального определения виброизоляции подвески силового агрегата автомобиля	6
Количественный и качественный анализ вибрации	6
Методика определения уровня локальной вибрации на рулевом колесе автомобиля.....	8
Крепление акселерометра и погрешности, возникающие при измерении вибрации двигателя	10
Калибровка акселерометров	12
Обработка результатов измерения вибрации	13
Вопросы	16
Литература	16
Содержание.....	17

Редактор

Технический редактор

ЛР №

от

г.

Подписано в печать

Формат 60x84/16

Печать офсетная.

Усл. печ. л.

Уч.-изд.л.

Тираж экз.

Заказ

Цена р.

Ротапринт МАДИ(ТУ). 125829, Москва, Ленинградский проспект, 64