

УДК 62-752.2

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ
ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С РАЗЛИЧНЫМИ
ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ**

COMPUTER SIMULATION OF INTERNAL COMBUSTION
ENGINE VIBRATIONS WITH DIFFERENT CHARACTERISTICS
OF VIBRATION INSULATORS

**Кравченко Александр Л.¹, Гончарко А.А.¹, Кравченко
Алексей Л.¹, Колесникович А.Н.¹, Хитриков С.В.¹,
Насковец А.М.²**

¹Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси,
г. Минск, Республика Беларусь

²ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга
«БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», г. Жодино, Республика Беларусь
Aliaksandr Krauchonak¹, A. Hancharka¹, Aliaksei Krauchonak¹,
A. Kalesnikovich¹, S. Khitrikov¹, A. Naskovets²

¹The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy
of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²JSC “BELAZ” – the management company of the holding
“BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Belarus

Разработана динамическая модель системы поддрессирования двигателя внутреннего сгорания, валидированная по результатам натурных испытаний. Проведено исследование вибронегруженности двигателя с различными характеристиками виброизоляторов на установившихся скоростях вращения коленчатого вала. Приведены результаты расчета вертикальных виброускорений и среднеквадратичных вертикальных виброускорений для различных значений жесткости виброизоляторов и оборотов двигателя, соответствующих максимальному моменту двигателя и номинальной мощности.

The dynamic model of the system of compression of the internal combustion engine was developed, verified according to the results of full-scale tests. The article conducts a study of the engine vibration load with different characteristics of vibration insulators at fixed rotational speeds of crankshaft. The results of vertical vibration acceleration and root

mean square of vertical vibration acceleration for various stiffeners of vibration insulators and engine revolutions corresponding to the maximum engine torque and rated power are given.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, вибрация, ДВС, виртуальный стенд, виброизолятор, ADAMS.

Keywords: computer simulation, vibration, ICE, virtual stand, vibration insulator, ADAMS.

ВВЕДЕНИЕ

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) является одним из источников вибрационной нагруженности несущих систем автомобиля и рабочего места водителя. Уровень вибрационных нагрузок определяет комфортабельность и долговечность несущих систем автомобиля. Виброизоляторы ДВС являются упругодемпфирующими элементами, позволяющими снизить передачу вибрационных нагрузок на несущие системы автомобиля и рабочее место водителя, следовательно, выбор параметров виброизоляторов является важной и актуальной задачей при проектировании новой конкурентоспособной техники.

В работах [1, 2] рассмотрены математические модели виброизоляторов и даны рекомендации по выбору их конструкций и материалов. В работе [3] рассмотрены вопросы моделирования ДВС с целью получения неуравновешенных сил и моментов на режимах частичных и полных нагрузок на всем диапазоне рабочих частот вращения коленчатого вала. Вращение коленчатого вала при этом моделировалось от действия газовых сил на поршни с учетом трения в цилиндропоршневой группе. Данные исследования проведены без учета виброизоляторов, с жестким креплением блока цилиндров двигателя в центре тяжести.

В работе [4] приведены исследования вибрации линейки дизельных двигателей Wärtsilä. Показаны точки измерений для двигателей и вспомогательного оборудования. Приведены допустимые уровни вибрации, обоснованные нормативными документами ISO 8528-9 [5], ISO 10816-6 [6].

В работе [7] рассматривается создание расчетной модели ДВС «виртуальный двигатель» на разных уровнях от индикаторной диаграммы до численной модели, учитывающей газодинамические процессы, тепловые нагрузки. На заключительном этапе «виртуаль-

ный двигатель» интегрируется в модель транспортного средства для анализа влияния его работы на различные системы (подвеску, рулевое управление, несущие системы). Концепция «виртуального двигателя» позволяет значительно уменьшить время и стоимость разработки двигателя.

Математическое компьютерное моделирование позволяет оценить параметры исследуемой системы с использованием виртуальной модели на этапе ее проектирования, без изготовления, что значительно сокращает время и материальные ресурсы. Виртуальные модели могут быть мультифизическими, например при моделировании систем ДВС зачастую необходимо совмещать моделирование механики, газодинамики, электротехники и систем управления. Такие задачи решаются в режиме совместного моделирования (cosimulation), где каждая подмодель двигателя, соответствующая определенному направлению физики, решается в соответствующей программе. Например, задачи динамики в программе ADAMS, прочности и гидрогазодинамики в программе ANSYS, систем управления в Matlab Simulink и т. д.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка виброн нагруженности двигателя внутреннего сгорания с различными характеристиками виброизоляторов на основе компьютерного моделирования. В связи с этим решены следующие задачи:

- разработана динамическая модель ДВС, включающая все основные узлы, влияющие на виброн нагруженность;
- проведено моделирование работы ДВС на различных частотах вращения коленчатого вала и выбранных характеристиках виброизоляторов;
- проведена оценка вертикальных ускорений корпуса двигателя с применением виброизоляторов с различными параметрами жесткости.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Объектом исследования является дизельный двигатель ЯМЗ-845.10, 12-цилиндровый с V-образным расположением цилиндров устанавливаемый на карьерные самосвалы [8].

В табл. 1 приведены технические характеристики двигателя, являющиеся исходными данными для динамической модели.

Таблица 1 – Основные технические характеристики двигателя

Наименование параметра	Значение
Номинальная мощность, кВт (л.с.)	537 (730)
Скорость вращения при номинальной мощности, об/мин	2100
Максимальный крутящий момент, Н·м (кгс·м)	2745 (280)
Скорость вращения при максимальном крутящем моменте, об/мин	1300-1500
Максимальная скорость вращения холостого хода, об/мин	2350
Масса маховика, кг	43
Масса двигателя, кг	2050
Главные моменты инерции двигателя, кгм ²	
I_{xx}	172,35
I_{yy}	458,53
I_{zz}	358,53

Двигатель установлен на 4 виброизолятора.
 Схема установки виброизоляторов ДВС (рис. 1).

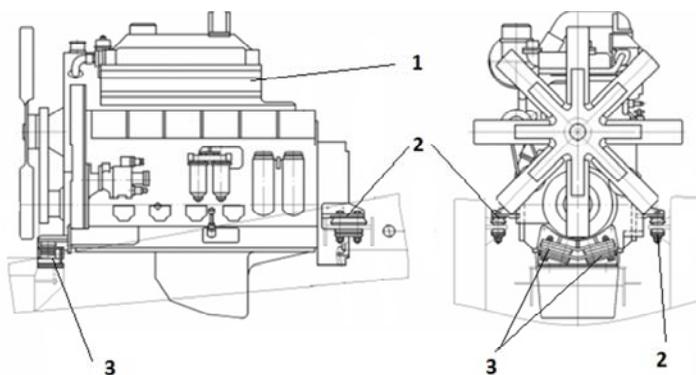


Рисунок 1 – Расположение виброизоляторов двигателя:
 1 – двигатель; 2 – задние виброизоляторы; 3 – передние виброизоляторы

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВС В ADAMS.

В программе компьютерного моделирования ADAMS разработана динамическая модель системы поддрессирования ДВС, которая включает описание характеристик следующих элементов: блока цилиндров исследуемого двигателя внутреннего сгорания, маховика, виброизоляторов, виртуального стенда. На рис. 2 представлен общий вид динамической модели в сборе.

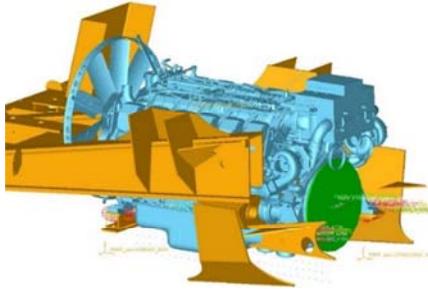
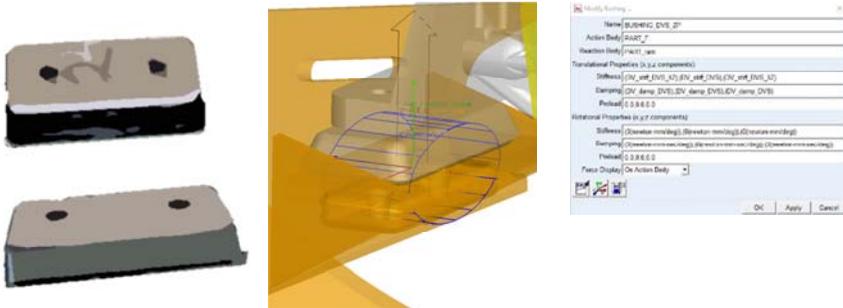


Рисунок 2 – Общий вид динамической модели

Виброизоляторы смоделированы математическим элементом BUSHING, с возможностью задания коэффициентов жесткости и демпфирования по всем шести степеням свободы (рис. 3).



Виброизолятор

Отображение модели
элемента BUSHING

Окно интерфейса BUSH-
ING с задаваемыми
параметрами

Рисунок 3 – Моделирование виброизолятора

Неуравновешенность установки и работы двигателя моделируется введением дисбаланса вращающихся частей двигателя [9].

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВС С РАЗЛИЧНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ.

Моделирование проводилось на режимах работы ДВС со скоростями вращения коленчатого вала 1500 об/мин и 2100 об/мин, в соответствии с табл. 1, соответствующими максимальному моменту

двигателя и номинальной мощности. При этом использовались различные характеристики вертикальной жесткости (1000 Н/мм, 3000 Н/мм, 5000 Н/мм) и демпфирования (100 Н·с/мм, 300 Н·с/мм, 500 Н·с/мм) виброизоляторов.

Валидация разработанной модели двигателя проводилась по данным натурных испытаний испытательного центра УГК «БЕ-ЛАЗ». Сопоставлялись расчетные и экспериментальные значения СК виброускорений при установившемся режиме работы ДВС при вышеуказанных оборотах коленчатого вала в точке расположения вибродатчика на корпусе блока цилиндров (рис. 4). Отличие расчетных и экспериментальных значений СК виброускорений не превысило 10 %

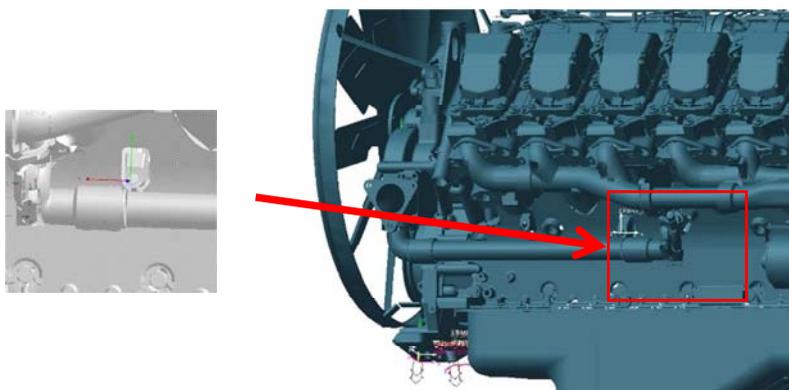


Рисунок 4 – Расположение вибродатчика на ДВС

Результаты моделирования в точке расположения измерителя на двигателе при исследуемых скоростях вращения коленчатого вала двигателя с вертикальной жесткостью 3000 Н/мм и демпфированием 100 Н·с/мм, представлены на рис. 5.

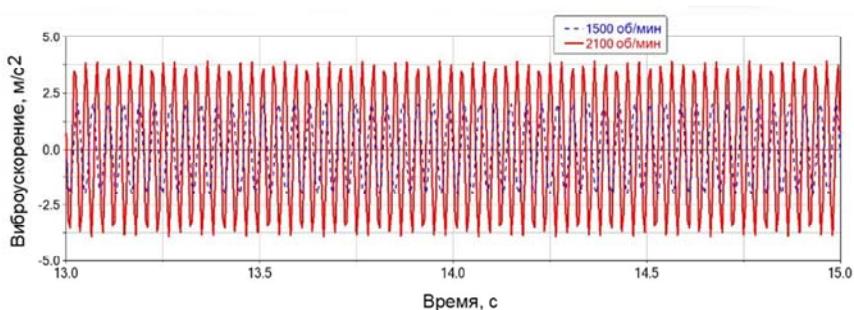


Рисунок 5 – Графики изменения вертикальных ускорений при различных скоростях вращения коленчатого вала в точке расположения измерителя на двигателе

По результатам моделирования рассчитаны значения среднеквадратичных (СК) вертикальных виброускорений для вариантов с различными жесткостями виброизоляторов при оборотах коленчатого вала 1500 и 2100 об/мин. Валидация динамической модели системы подрессоривания ДВС выполнена по результатам натуральных испытаний виброизоляторов с жесткостью 3000 Н/мм. На рис. 6 представлена диаграмма СК вертикальных виброускорений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была разработана и валидирована по результатам натуральных испытаний динамическая модель системы подрессоривания двигателя внутреннего сгорания карьерного самосвала. Валидация модели проведена по результатам натуральных испытаний с виброизоляторами жесткостью 3000 Н/мм. Отличия значений СК виброускорений полученных при виртуальных испытаниях от натуральных не превышает 10%.

Проведено моделирование работы двигателя со скоростями вращения коленчатого вала 1500 об/мин и 2100 об/мин при номинальной мощности и максимальном крутящем моменте с различными характеристиками виброизоляторов. Анализ результатов моделирования показал, что с увеличением жесткости виброизоляторов в четыре раза (с 1000 Н/мм до 5000 Н/мм) значения СК виброускорений на корпусе ДВС в вертикальном направлении возрастают на 51 % при 1500 об/мин и на 43 % при 2100 об/мин.

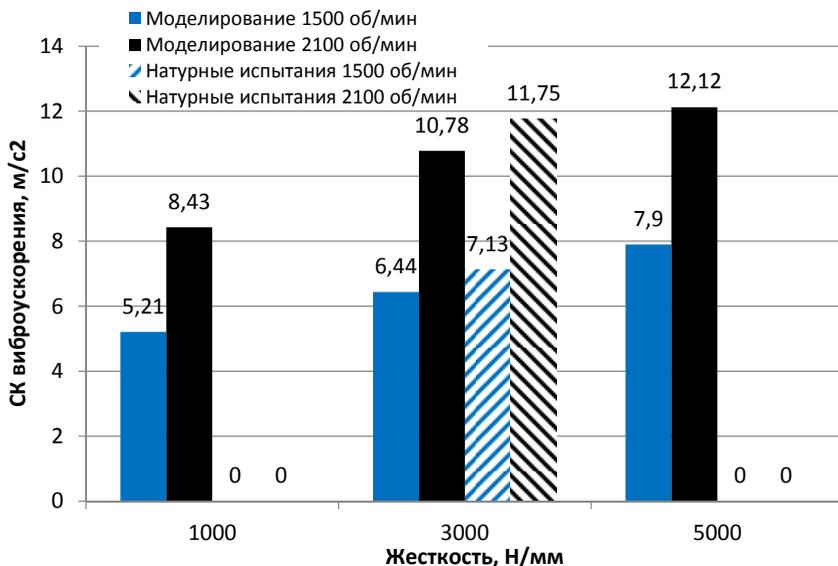


Рисунок 6 – Диаграмма СК вертикальных виброускорений на корпусе ДВС при различных значениях жесткости виброизоляторов

ЛИТЕРАТУРА

1. Гордеев, Б. А. Математические модели адаптивных виброизоляторов мобильных и стационарных объектов: монография / Б. А. Гордеев, В. И. Ерофеев, А. С. Плехов. – Н. Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2017. – 124 с.
2. Гордеев, Б. А. Математические модели виброзащитных систем: монография / Б. А. Гордеев. – Н. Новгород : ННГАСУ, 2018. – 168 с.
3. Бутин, Д. А. Модель динамического воздействия поршневого двигателя внутреннего сгорания для расчетного анализа вибрации автомобиля / Д. А. Бутин, С. А. Сергиевский // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2021. – №2. – С. 60–67.
4. Örn, J. Vibration guideline for large diesel engines / J. Örn. – Vaasa, 2014. – 42 с.
5. ISO 8528-9 Электроагрегаты генераторные переменного тока с приводом от двигателя внутреннего сгорания. Часть 9. Измерения вибрации и оценка вибрационного состояния.

6. ISO 10816-6 Вибрация механическая. Оценка состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 6. Машины с возвратно-поступательным движением номинальной мощностью свыше 100 кВт.

7. Гвоздев, А. С. Моделирование конструкции, кинематических и динамических процессов «виртуального ДВС» / А. С. Гвоздев, В. С. Мелентьев // Авиационная и ракетно-космическая техника Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 5 (36). – С. 181–186.

8. Двигатель ЯМЗ-845.10. Дополнение к руководству 850.3902150 РЭ Двигатели ЯМЗ-850.10, ЯМЗ-8501.10.

9. Гвоздев, А. А. Динамическая сбалансированность коленчатого вала - залог долговечной работы двигателя / А. А. Гвоздев // Владимирский Земледелец. – 2015. – №3–4. – С. 43–46.

Представлено 16.05.2024