

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЛИЯНИЯ МОМЕНТА ЗАЖИГАНИЯ И ВПРЫСКА, А ТАКЖЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЦИЛИНДРОВ АВТОМОБИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ НА ВЕЛИЧИНУ БОКОВЫХ УСКОРЕНИЙ БЛОКА ЦИЛИНДРОВ

*Кривцов С.Н., Деньгин И.Д., Данилов В.А., Шипицын А.Г., Ваганов З.И.
Иркутский национальный исследовательский технический институт, Иркутск*

Ключевые слова: диагностика двигателя, боковое ускорение блока, холостой ход, дизельный двигатель, бензиновый двигатель, впрыск топлива, зажигание.

Аннотация. С увеличением пробега возрастает изношенность компонентов двигателя. Это может приводить к нарушению стабильности работы двигателя и снижению его эксплуатационных свойств и характеристик. Для контроля технического состояния двигателя нами предложен экспресс метод диагностики, основанный на регистрациях боковых ускорений блока двигателя по средствам акселерометра. Проведенные экспериментальные исследования позволили оценить влияние впрыска топлива, момента зажигания и герметичности ЦПГ на показания бокового ускорения блока.

RESULTS OF AN EXPERIMENTAL STUDY TO DETERMINE THE INFLUENCE OF IGNITION AND INJECTION TIMING, AS WELL AS THE PERFORMANCE OF AUTOMOBILE ENGINE CYLINDERS ON THE MAGNITUDE OF LATERAL ACCELERATIONS OF THE CYLINDER BLOCK

*Krivtsov S.N., Dengin I.D., Danilov V.A., Shipitsyn A.G., Vaganov Z.I.
Irkutsk National Research Technical Institute, Irkutsk*

Keywords: engine diagnostics, lateral acceleration of the block, idling, diesel engine, gasoline engine, fuel injection, ignition.

Abstract. As the mileage increases, the wear and tear on engine components increases. This can lead to disruption of engine stability and a decrease in its performance properties and characteristics. To monitor the technical condition of the engine, we have proposed an express diagnostic method based on recording the lateral accelerations of the engine block using an accelerometer. The experimental studies carried out made it possible to evaluate the influence of fuel injection, ignition timing and tightness of the CPG on the readings of the lateral acceleration of the block.

Введение

Двигатели внутреннего сгорания до сих пор остаются основной силовой установкой автомобилей и спецтехники. В процессе эксплуатации происходит изменение технических характеристик двигателей, что не лучшим образом сказывается на эксплуатационных свойствах всех узлов автомобиля: потеря мощности, повышенная вибрационная нагрузка, неравномерность работы двигателя и т.д. Это неизбежно влияет и на комфорт вождения автомобиля. Поэтому закономерен интерес многих исследователей к определению вибраций кузова и силового агрегата автотранспортных средств [1].

Возникновение повышенной вибрации и нестабильность работы силового агрегата может возникать по причине нарушения технического его состояния, вызванного нарушением работоспособности цилиндров (пропуски зажигания, потеря компрессии и т.д.), а также изменения демпфирующих свойств подвески двигателя. Вследствие этого, нами предлагается метод, основанный на измерениях ускорений блока цилиндров (прежде всего боковых, вызванных действием реактивного момента) [1].

Поскольку на формирование бокового ускорения блока цилиндров влияет большое количество факторов, необходимо провести исследование по выявлению влияния на него некоторых неисправностей, в частности нарушения работоспособности цилиндров и изменения угла опережения зажигания (впрыска).

Теоретические предпосылки

Рассмотрим процесс формирования бокового ускорения блока цилиндров двигателя при его работе. Для этого составим расчетную схему сил и моментов, действующих на блок цилиндров рисунок [1].

Основными силами считаются силы давления газов; силы, направленные вдоль оси шатуна; силы инерции; силы, действующие на поршень и боковая сила, действующая на стенку цилиндров. Все силы, действующие в двигателе, изменяются как по углу поворота, так и по времени. [1]

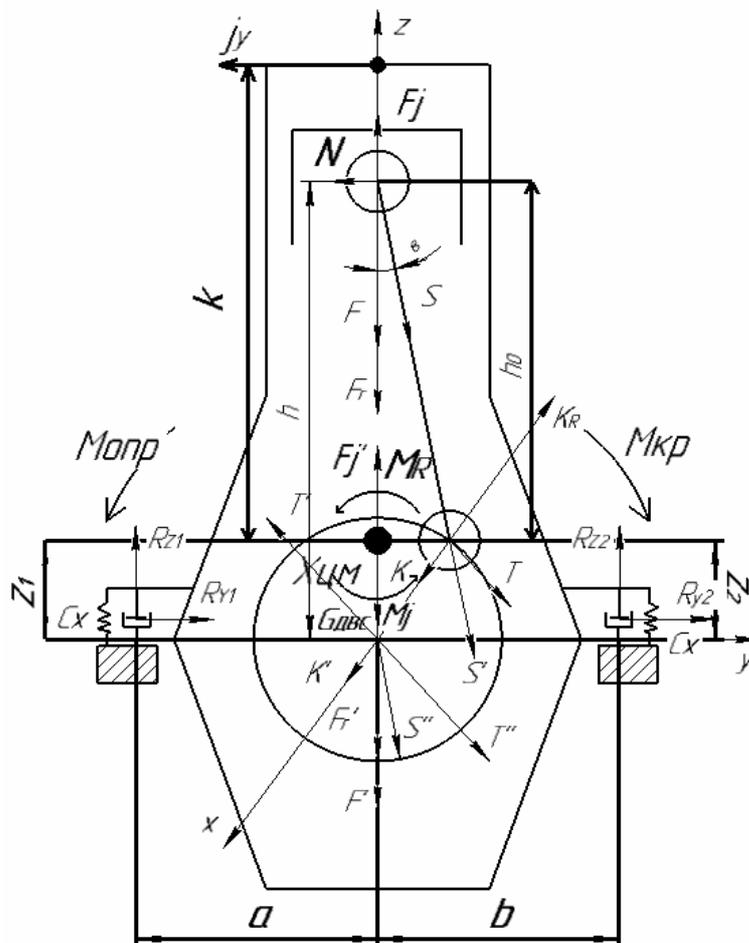


Рис. 1. Расчетная схема процесса формирования бокового ускорения блока цилиндров, вызванного действием реактивного момента

Основной силой формирующей боковое ускорение является боковая сила, направленная перпендикулярно движению поршня [2, 3]:

$$N = F \cdot \operatorname{tg} \beta, \quad (1)$$

где F – суммарная сила, приложенная к оси поршневого пальца, $\operatorname{tg} \beta$ – угловая составляющая отклонения оси шатуна в плоскости его качения в сторону от направления оси цилиндра.

Крутящий момент на коленчатом валу формируется следующим образом:

$$M_{кр} = FR \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos \beta}, \quad (2)$$

где R – радиус кривошипа, φ – угол поворота кривошипа, отсчитываемый от направления оси цилиндра в сторону вращения коленчатого вала, β – угол отклонения оси шатуна в плоскости его качения в сторону от направления оси цилиндра

В свою очередь, благодаря действию нормальной (боковой) силы N возникает опрокидывающий момент, направленный противоположно крутящему:

$$M_{опр} = N \cdot h + F \alpha, \quad (3)$$

где: N – боковая сила, α – величина дезаксиала, h – высота подъема поршня.

На формировании бокового ускорения двигателя так же оказывают влияние реакции, возникающие в опорах двигателя: $R_{z1}; R_{z2}; R_{x1}; R_{x2}$ под действием силы тяжести и моментов возникающих в двигателе.

В дальнейшем производим вычисление суммы моментов формирующих боковое ускорение блока:

$$\sum M_{Хцм} = N \cdot h_0 + R_{z2} \cdot b + R_{y2} \cdot z_2 + R_{y1} \cdot z_1 - R_{z1} \cdot a - J \varepsilon, \quad (5)$$

где $R_{z1}; R_{z2}; R_{x1}; R_{x2}$ – реакции, возникающие в опорах двигателя, a, b – плечи, от центра масс до опор двигателя, J – суммарный момент инерции двигателя, ε – угловое ускорение блока.

Следовательно, угловое ускорение блока цилиндров двигателя при колебании блока цилиндров относительно центра масс может быть найдено следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{J} (N \cdot h_0 + R_{z2} \cdot b + R_{y2} \cdot z_2 + R_{y1} \cdot z_1 - R_{z1} \cdot a). \quad (6)$$

В свою очередь линейное боковое ускорение блока можно определить следующим образом:

$$j_y = \varepsilon \cdot k, \quad (7)$$

где k – плечо, формирующие боковое ускорение блока от центра масс до точки измерения.

В качестве примера, рассмотрим один из самых распространенных типов двигателя – четырехцилиндровый рядной компоновки с расстановкой действующих сил и моментов в виде схемы (рис. 2).

Для данного типа силовой установки в плоскости XZ силы инерции первого порядка и их моменты полностью уравниваются $M_{i1} = 0$, силы инерции второго порядка для всех цилиндров равны, направлены в одну сторону и зависят от частоты вращения коленчатого вала, а их моменты так же равны 0 [4].

Материалы и методы

Для измерения боковых ускорений блока цилиндров был разработан приборный комплекс, структурная схема которого представлена на рисунке 2,а. Он содержит трехкоординатный акселерометр, устанавливаемый на блок цилиндров (например, на клапанную крышку двигателя по центру), аналого-цифровой преобразователь (осциллограф), который синхронизируется с углом поворота коленчатого вала при помощи соединения одного из каналов АЦП с датчиком положения коленчатого/распределительного вала или сигнального провода форсунки/свечи зажигания, а так же ноутбук на который выводится полученные данные рисунок 2,б.

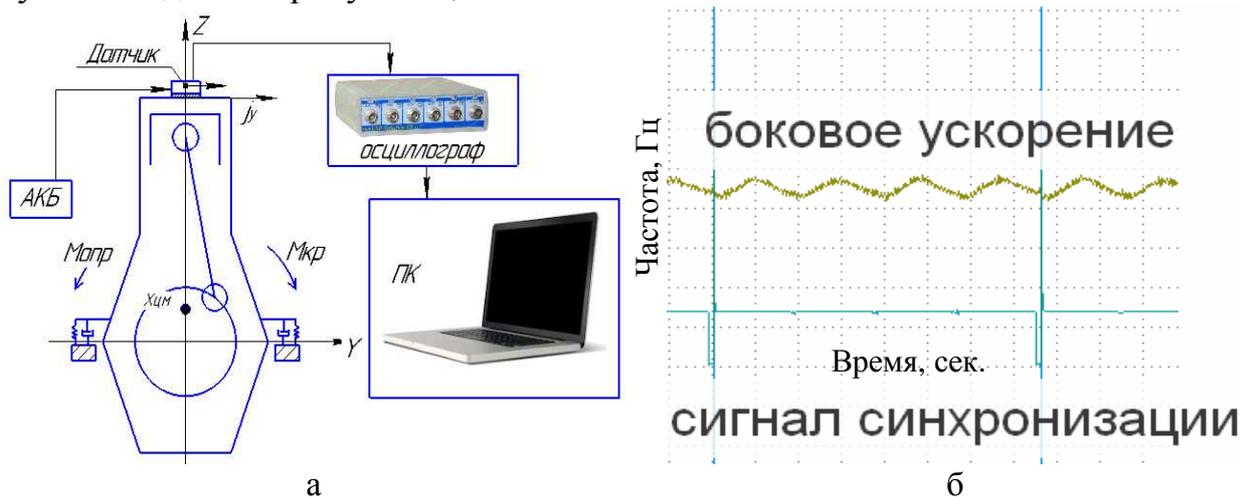


Рис. 2. а) структурная схема измерительного комплекса; б) внешний вид данных получаемых при работе приборного комплекса

В качестве оборудования для проведения экспериментов использовались двигатели внутреннего сгорания, установленные в лаборатории диагностики кафедры «Автомобильного транспорта» ИрННТУ. Бензиновый двигатель производства Honda модели B20 рисунок 3,а и дизельный двигатель производства Nissan модели TD27 рисунок 3,б. В таблице 1 приведены основные технические характеристики используемых двигателей.



Рис. 3. Двигатели внутреннего сгорания применяемы при проведении экспериментальных исследований: а) B20 Хонда (бензиновый); б) TD27 Ниссан (дизельный)

Табл. 1. Характеристики двигателей внутреннего сгорания используемых для проведения экспериментов

Характеристика	Nissan TD27	Honda B20B
Конструкция блока цилиндров	Рядная	Рядная
Топливо	дизельное	бензин
Рабочий объем, см ³	2663	1972
Число цилиндров	4	4
Диаметр цилиндра, мм	96	84
Ход поршня, мм	92	89
Степень сжатия	22	9,6
Мощность, кВт	62,5 (при 4000 об/мин)	126 (при 5400 об/мин)
Крутящий момент, Н·м	216 (при 2400 об/мин)	180 (при 4800 об/мин)

Полученные в ходе экспериментов данные обрабатывались с помощью специально разработанного нами программного обеспечения, позволяющего усреднять, фильтровать данные, а также осуществлять их экспорт во внешние приложения, например, MatLab и Excel [6].

Результаты и обсуждения

Для оценки влияния выбранных факторов на показания бокового ускорения блока был произведен ряд поисковых экспериментов. Так на двигателе Honda B20 произвели измерения ускорений при работе на холостом ходу рисунок 4. Максимальное положительное боковое ускорение блока цилиндров при таком режиме работы не превышает $2,1 \text{ м/с}^2$, а амплитуда (размах) полученных ускорений не более $3,5 \text{ м/с}^2$.

В дальнейшем было произведено отключение 4 цилиндра посредством отсоединения высоковольтного провода свечи зажигания. Реакцией на это послужило значительное снижение до $0,9 \text{ м/с}^2$ в области положительных значений бокового ускорения блока на участке графика отвечающего за 4й цилиндр и увеличение ускорения до $2,5 \text{ м/с}^2$ на остальных цилиндрах в области отрицательных значений. Такое поведение обуславливается возросшей вибрационной составляющей.

Так как данный тип двигателя сохраняет работоспособность на двух цилиндрах, произвели отключение высоковольтного провода третьего цилиндра, что позволило получить значения бокового ускорения блока при работе на двух цилиндрах рисунок 4. На графике видно, что значения бокового ускорения блока цилиндров от реактивного момента при работе третьего и четвертого цилиндра практически совпадают в области положительных значений с нормальной работой двигателя, однако значительно выросло ускорение блока на участках, характеризующих работу первого и второго цилиндров, а так же на всей области отрицательных значений. Это обуславливается перераспределением цилиндрических нагрузок и значительно возросшей неравномерностью хода двигателя.

На двигателе Honda B20 были также сымитированы ранние и поздние углы опережения зажигания (рис. 5).

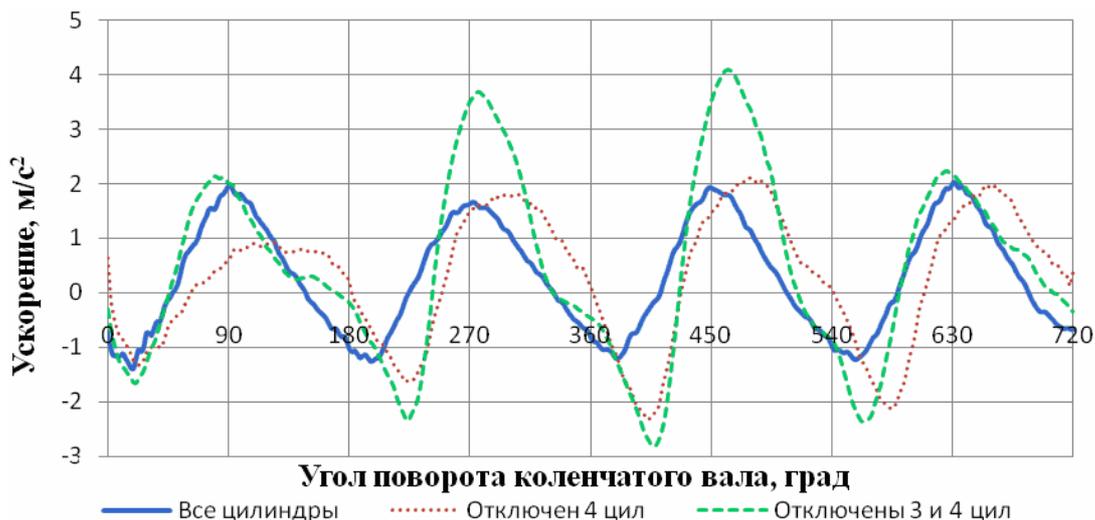


Рис. 4. График ускорений двигателя при работе на холостом ходу с исправной и неисправной системой зажигания на двигателе Honda B20

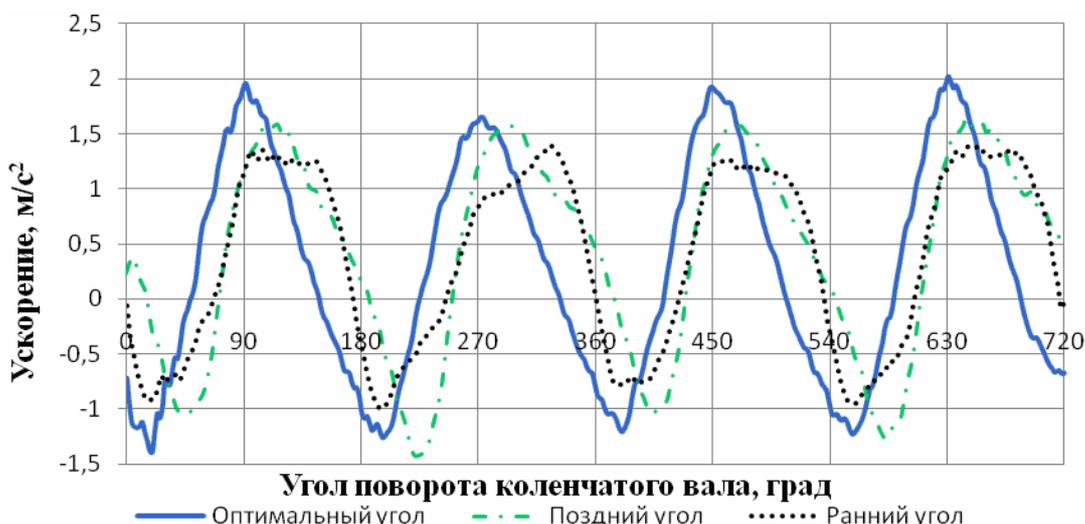


Рис. 5. График ускорений двигателя на холостом ходу при изменении углов опережения зажигания на двигателе Honda B20

При чрезмерно раннем угле опережения зажигания в целом общая неравномерность бокового ускорения несколько снизилась и изменилась ее фаза и форма, а в случае позднего момента зажигания – осталась практически неизменной по амплитуде, но сместилась по фазе. В связи с этим требуется выполнить дополнительные исследования с жесткой привязкой к углу поворота коленчатого вала по большему количеству угловых меток.

Аналогичные испытания были проведены на дизельном двигателе TD27. Величины боковых ускорений блока цилиндров также определялись при работе на холостом ходу, с отключением одного и с отключением двух цилиндров, а также изменением угла опережения впрыска. Отключение цилиндров производилось путем отключения подачи топлива в соответствующие цилиндры, а изменение момента впрыска – поворотом корпуса ТНВД относительно блока цилиндров в крайние положения.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 6 и 7. При отключении цилиндра (или группы цилиндров), как и у бензинового двигателя, возрастает значительная неравномерность работы и, как следствие, бокового ускорения блока цилиндров вследствие перераспределения цилиндрических нагрузок.

Например, при отключении любых двух цилиндров происходит снижение амплитуды ускорения блока на графике в области положительных значений бокового ускорения в фазе, соответствующей по углу поворота такту рабочего хода этих цилиндров, а положительная амплитуда у работоспособных цилиндров увеличивается. Данное обстоятельство позволяет сделать предварительный вывод о значительном влиянии на положительную амплитуду бокового ускорения газовых сил. Причем закономерно, что для дизельных двигателей это влияние сильнее.

Результаты экспериментального исследования направленные на определения влияния угла опережения впрыска на показания ускорения блока рисунок 7 говорят о том, что при изменении угла опережения впрыска на дизельном двигателе такого типа не оказывает значительного влияния на показания бокового ускорения блока.

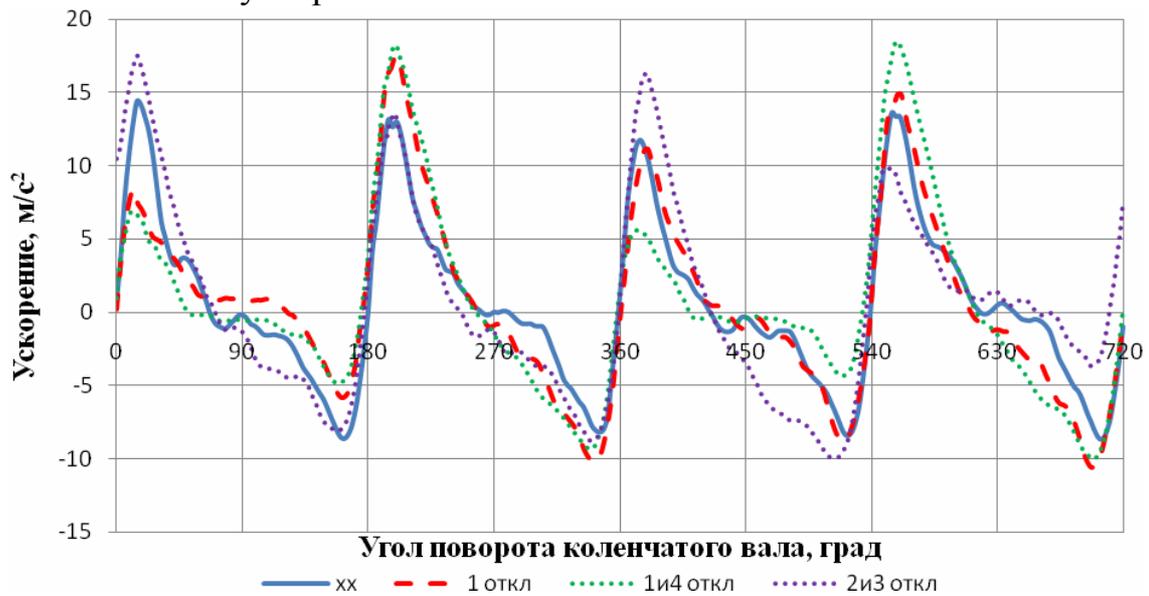


Рис. 6. График зависимости боковых ускорений блока цилиндров двигателя при работе на холостом ходу по углу поворота коленчатого вала на двигателе TD 27 при отключении цилиндров

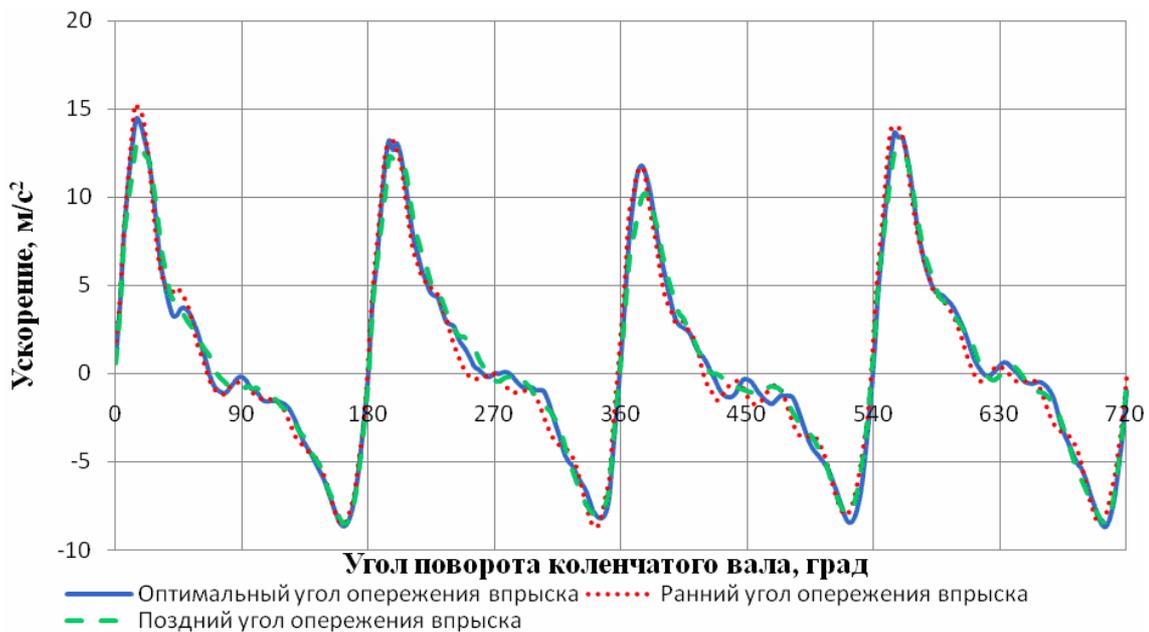


Рис. 7. График зависимости боковых ускорений блока цилиндров двигателя при работе на холостом ходу по углу поворота коленчатого вала на двигателе TD 27 при изменении углов впрыска топлива

Заключение

Проведенные эксперименты по оценке влияния момента зажигания и впрыска, а также работоспособности цилиндров автомобильного двигателя на величину боковых ускорений блока цилиндров позволили заключить, что:

– угол опережения зажигания в бензиновом двигателе внутреннего сгорания и двигателя работающего на дизельном топливе не оказывает значительного влияния на показания бокового ускорения блока цилиндров;

– нарушение рабочего процесса цилиндра или нескольких цилиндров оказывает значительное влияние на показания бокового ускорения блока вне зависимости от типа используемого топлива на двигателе, причем для дизельного двигателя чувствительность много выше;

– значения боковых ускорений качественно и количественно отражают информацию о равномерности работы цилиндров двигателя и в дальнейшем могут быть использованы при диагностировании.

Список литературы

1. Авдонькин Ф.Н. Теоретические основы эксплуатации автомобилей. – М.: Транспорт, 1985. – 214 с.
2. Кривцов С.Н. Методологические основы диагностики автомобилей с дизельными двигателями, оснащенными аккумуляторными топливоподающими системами: Дисс. ... докт. техн. наук. – Иркутск: Иркутский национальный исследовательский технический университет, 2017. – 441 с.
3. Кузнецов А.Г. Динамическая модель дизеля // Автомобильная промышленность. – 2010. – №2. – С. 30-33.
4. Федотов А.И. Диагностика автомобиля: учебник для вузов. – Иркутск.: Изд-во ИрГТУ, 2012. – 468 с.
5. Кривцов С.Н., Деньгин И.Д. Результаты экспериментального исследования метода диагностики двигателя на основе анализа бокового ускорения блока двигателя // Безопасность колесных транспортных средств в условиях эксплуатации. Материалы 116-й Международной научно-технической конференции. – Улан-Удэ: Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления, 2023. – С. 93-98.
6. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2022680578 РФ. Программа для обработки и фильтрации экспериментальных данных Filtering KYD / Кривцов С.Н., Яковчук П.С., Деньгин И.Д. – Заявка № 2022680041 от 28.10.2022; зарег. 02.11.2022.

Сведения об авторах:

Кривцов Сергей Николаевич – д.т.н., профессор;

Деньгин Игорь Димитриевич – аспирант;

Данилов Владимир Александрович – студент;

Шипицын Артем Геннадьевич – студент;

Ваганов Захар Игоревич – студент.