

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
Центральный ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»

На правах рукописи

Ашишин Алексей Александрович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ АНАЛИЗА ВОЗМУЩЕНИЙ
ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
И СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ ИХ УРАВНОВЕШЕННОСТИ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Специальность 05.04.02. – Тепловые двигатели

Москва - 2011

Работа выполнена на кафедре автомобилей и двигателей Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования Московский государственный индустриальный университет (ФГБОУ ВПО МГИУ)

Научный руководитель - кандидат технических наук, профессор
Гусаров Владимир Васильевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Тольский Владимир Евгеньевич
кандидат технических наук, доцент
Краснокутский Андрей Николаевич

Ведущее предприятие - АМО ЗИЛ

Защита состоится «__» _____ в __ часов на заседании диссертационного совета Д 217.014.01 при Государственном научном центре Российской Федерации – Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт» по адресу: 125438, Москва, Автомоторная ул., 2. Электронная почта: admin@nami.ru

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ».

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять по вышеуказанному адресу.

Автореферат разослан «__» _____ 2011 г.
Телефон для справок: 8 (495) 456-40-40.

Ученый секретарь диссертационного совета, к.т.н., ст. научный сотрудник
<http://www.nami.ru>
<http://vak.ed.gov.ru>

 А.Г. Зубакин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. При конструировании современных автомобилей всё больше внимания уделяется проблеме снижения уровня вибрации и шума. Одним из основных источников вибрации и шума, является двигатель внутреннего сгорания (ДВС), в котором во время работы возникают неуравновешенные силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс (ВПДМ), моменты от них и реактивный крутящий момент (РКМ). Эти возмущения носят переменный характер и вызывают на опорах силового агрегата (СА) соответствующие реакции и как следствие – его колебательные движения. Существуют различные способы снижения уровня вибрации СА.

Выбор схемы кривошипно-шатунного механизма (КШМ) во многом определяет вибрационные свойства двигателя. Оптимизация конструкции КШМ позволяет снизить уровень вибрации. В настоящее время предъявляются всё более жесткие требования к уравновешенности СА, используются более сложные схемы КШМ, например, со смещенными шатунными шейками, применяются дополнительные уравновешивающие устройства. Разработаны новые схемы размещения балансирных валов – со смещением, что позволяет дополнительно снижать возмущения от РКМ. Одновременно применяются способ гашения реакций от внутренних возмущений ДВС в его подвеске (опорах). Но такой способ эффективен только на малых частотах вращения коленчатого вала двигателя, на средних и высоких частотах свойства подвеса СА практически не влияют на параметры его вибрации, т.к. частота действия возмущений в этом случае существенно превышает собственную частоту колебаний СА на опорах. Поэтому важно, чтобы уже на стадии выбора схемы КШМ были предусмотрены варианты максимально возможного уравновешивания.

В настоящее время недостаточно исследовано влияние различных конструктивных и режимных факторов ДВС на его уравновешенность, особенно возмущений от РКМ. Отсутствуют единые критерии, пригодные как для оценки возмущений от инерционных сил и моментов, так и от РКМ. Отсутствует методика уравновешивания V-образных 6-ти цилиндровых ДВС без использования балансирных валов. Отсутствуют расчетные методики оптимизации схем размещения балансирных валов с учетом дополнительного уравновешивания РКМ. Поэтому решение таких задач является актуальным.

Цели работы: разработка метода количественной оценки возмущающего действия неуравновешенных силовых факторов ДВС для решения широкого круга задач по уравновешиванию СА.

Для достижения целей работы сформулированы следующие **задачи:**

- 1) предложить универсальные критерии, пригодные для оценки всех видов возмущений в двигателях;
- 2) оценить неуравновешенность поршневых двигателей разных схем КШМ от РКМ с помощью предложенных критериев;
- 3) разработать методику оптимизации некоторых схем КШМ с использованием предлагаемых критериев;

4) экспериментально доказать эффективность применения предлагаемых критериев при оценке виброактивности ДВС.

Объект исследований. Поршневые двигатели внутреннего сгорания с различными схемами КШМ.

Предмет исследований. Периодические возмущения поршневых ДВС и способы их снижения в различных схемах КШМ.

Методы исследования. В работе использованы: методы моделирования рабочих процессов поршневых двигателей, методы аналитической механики, математический анализ, теория вероятностей, инженерный эксперимент, компьютерное моделирование.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) предложены универсальные критерии, позволяющие количественно оценивать и сравнивать между собой значения возмущений от различных по характеру действия и физической природе силовых факторов, вызывающих вибрацию СА;

2) разработан метод количественной оценки возмущений в двигателях с различными параметрами и схемами КШМ на основе использования разработанных критериев;

3) предложены новые способы оптимизации уравновешенности двигателей схем R2 и V6 с помощью применения разработанных критериев;

4) установлены закономерности возмущающего действия РКМ для разных схем КШМ от режимов работы и различных конструктивных параметров двигателей;

5) предложен экспериментальный способ оценки возмущений от РКМ с использованием специальной электронной аппаратуры.

Практическая ценность. Разработанный метод оценки возмущений на базе предложенных критериев может эффективно применяться для оптимизации конструкции двигателя в части его уравновешенности на стадии проектирования.

Выполненные работы позволяют оценить влияние возмущений от РКМ на общую уравновешенность двигателя, а также оценить степень влияния различных конструктивных и режимных факторов двигателя на величины различных возмущений. Благодаря этому уже на стадии проектирования конструкции ДВС подбирается такая совокупность значений его параметров, которая обеспечивала бы наилучшую его уравновешенность.

Реализация работы. Разработанные критерии оценки возмущений и метод, реализованный в программе расчета, дополняют курсы дисциплин «Динамика ДВС», «Конструирование ДВС», что позволяет поднять на современный уровень профессиональные знания выпускников вузов по специальности «140501 - Двигатели внутреннего сгорания».

Основные положения, выносимые на защиту:

1) критерии оценки возмущений от различных по характеру действия и физической природе силовых факторов, вызывающих вибрацию СА;

2) методика количественной оценки возмущений от сил инерции ВПДМ, их моментов и РКМ в двигателях с различными параметрами и схемами КШМ;

3) методики уравнивания двигателей R2 и V6 на основе применения разработанных критериев;

4) методика экспериментальной оценки возмущений от РКМ.

Апробация работы. Основные результаты и основные положения по теме диссертационной работы докладывались и обсуждались на: заседании кафедры автомобилей и двигателей ГОУ МГИУ; VII, VIII Международных научно-практических конференциях ЮНЕСКО «Молодые ученые – промышленности, науке и профессиональному образованию: проблемы и новые решения», МГИУ, 2008, 2009 гг.; Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию кафедры поршневых двигателей МГТУ им. Н.Э. Баумана «Двигатель-2007», Москва, 2007 г.; Конференциях «Проектирование колесных машин и двигателей внутреннего сгорания», МГИУ, 2009, 2010 гг.; Конференции «Участие молодых ученых, инженеров и педагогов в разработке и реализации инновационных технологий», МГИУ, 2009 г.; Международной научно-технической конференции «Научные проблемы развития ремонта, технического обслуживания машин, восстановления и упрочнения деталей», ГНУ ГОСНИТИ, 2009 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 9 печатных работ, в том числе 3 публикации в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы. Работа содержит 139 страниц печатного текста, 17 таблиц, 92 рисунка, 109 наименований списка литературы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы ее цель и основные задачи, изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации приведён обзор некоторых методов оценки и критериев, используемых при анализе уравновешенности поршневых двигателей внутреннего сгорания.

Исследованию возмущений в ДВС и решению задач по их снижению, разработке различных критериев и методов анализа виброактивности СА посвящены работы ученых: Бруевича Н.Г., Григорьева Е.А., Гусарова В.В., Доброгаева Р.П., Истомина П.А., Каца А.М., Кер Вильсона, Найденко О.К., Неймана И.Ш., Попыка К.Г., Сегалья В.Ф., Семёнова М.В., Симакова Ф.Ф., Тольского В.Е., Штейнвольфа Л.Й., Яманина А.И. и многих других учёных.

В результате проведенного анализа сделаны следующие выводы: существуют различные критерии и методы анализа уравновешенности многорядных ДВС, но отсутствует универсальный единый количественный критерий оценки различных по физической природе возмущений, что затрудняет решение вопросов обеспечения наилучшей уравновешенности при выборе схем проектируемых двигателей. В частности, существуют проблемы оценки

возмущающего действия РКМ. Дифференциальный учёт «вклада» каждого фактора возмущения в общую виброактивность СА затруднён.

В рамках анализа вибрационного состояния СА, в качестве факторов его вызывающих, достаточно учитывать только силы инерции ВПДМ, их моменты и РКМ.

Во второй главе предложены комплексные критерии оценки возмущений в поршневых ДВС, а также показаны особенности их вычислений в различных случаях.

Предлагается следующее допущение: СА представляется телом в свободном, взвешенном состоянии, без учета опор. Для анализа высокочастотных возмущений такое представление достаточно корректно.

Внутри тела (рис. 1 а) действует переменная по величине и направлению неуравновешенная периодическая сила $P(t)$ и момент $M(t)$, представляемые в виде проекций на оси координат. Максимальные возмущения от действия этих факторов, вызывающих колебания СА, определяются величиной максимального импульса силы L_{Pmax} и импульса силы момента L_{Mmax} за период, вычисляемые по времени t или по углу поворота коленчатого вала φ :

$$\begin{aligned}
 L_{PmaxX} &= \int_{t_2}^{t_1} P_X dt; L_{MmaxX} = \int_{t_2}^{t_1} M_X dt; L_{PmaxX} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{P_X}{\omega} d\varphi; L_{MmaxX} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{M_X}{\omega} dt; \\
 L_{PmaxY} &= \int_{t_2}^{t_1} P_Y dt; L_{MmaxY} = \int_{t_2}^{t_1} M_Y dt; L_{PmaxX} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{P_Y}{\omega} d\varphi; L_{MmaxX} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{M_Y}{\omega} dt; \\
 L_{PmaxZ} &= \int_{t_2}^{t_1} P_Z dt; L_{MmaxZ} = \int_{t_2}^{t_1} M_Z dt; L_{PmaxX} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{P_Z}{\omega} d\varphi; L_{MmaxX} = \int_{\varphi_2}^{\varphi_1} \frac{M_Z}{\omega} dt;
 \end{aligned} \quad (1)$$

где t_1 и t_2 – соответственно время начала и окончания максимального за период возмущающего действия проекций силы P и момента M на соответствующие оси координат, с; φ_1 и φ_2 – соответственно угол поворота коленчатого вала, при котором начинается и оканчивается максимальное за цикл возмущающее действие силовых факторов, град.

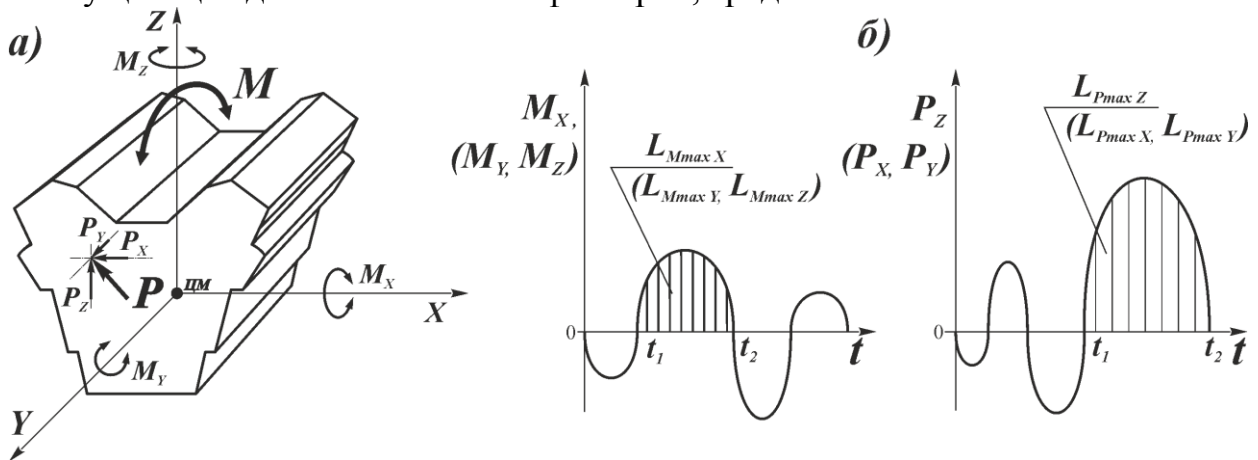


Рис. 1. Возмущения, действующие на тело (СА): а) схема действия возмущающих факторов; б) проекции изменения величины возмущающих факторов P и M по времени t на соответствующие оси координат ($P_X, P_Y, P_Z, M_X, M_Y, M_Z$); ЦМ – центр масс

Для количественной оценки периодических возмущений с учетом массовых и габаритных характеристик СА предлагается в качестве комплексного критерия энергия возмущения e от действия максимального импульса силы L_{Pmax} и импульса силы момента L_{Mmax} за период. Уравнения энергии от проекций возмущающей переменной силы P и момента M имеют вид:

$$\begin{aligned} e_{PX} &= \frac{L_{Pmax X}^2}{2M_{CA}}; & e_{MX} &= \frac{L_{Mmax X}^2}{2I_{CA X}}; \\ e_{PY} &= \frac{L_{Pmax Y}^2}{2M_{CA}}; & e_{MY} &= \frac{L_{Mmax Y}^2}{2I_{CA Y}}; \\ e_{PZ} &= \frac{L_{Pmax Z}^2}{2M_{CA}}; & e_{MZ} &= \frac{L_{Mmax Z}^2}{2I_{CA Z}}, \end{aligned} \quad (2)$$

где M_{CA} – масса СА, кг; I_{CA} – момент инерции СА относительно соответствующей оси, проходящей через центр масс СА, кг·м²; L_{Pmax} – максимальный импульс силы за период ее действия, Н·с; L_{Mmax} – максимальный импульс силы момента за период его действия, Н·м·с.

Суммарная энергия от рассматриваемых возмущений, проекций силы P и момента M :

$$e = e_{PX} + e_{PY} + e_{PZ} + e_{MX} + e_{MY} + e_{MZ} \quad (3)$$

Предлагаемый критерий возмущений e , соответствует энергии, сообщенной телу (СА) от максимальных за период импульсов L_{Pmax} , L_{Mmax} .

Представленный критерий позволяет оценивать возмущения не только от гармонически меняющихся по величине и направлению инерционных сил и моментов, но и от действия не гармонически меняющегося РКМ, а также количественно сравнивать возмущения от разных по физической природе факторов, таких как инерционные силы (моменты) разных порядков и РКМ.

Используя предлагаемые критерии, решили задачу по определению оптимальной величины дополнительной массы нащечных противовесов одноцилиндрового двигателя при частичном уравнивании силы инерции 1-го порядка. Выявлено, что оптимальный дисбаланс дополнительного противовеса должен быть в два раза меньше дисбаланса от ВПДМ. При установке оптимального дополнительного противовеса, возмущения от силы инерции 1-го порядка, оцениваемые величиной энергии возмущения $e_{PI on}$, уменьшаются в два раза: $e_{PI on} = 0,5e_{PI}$, где e_{PI} – энергия возмущения СА от действия неуравновешенной силы инерции 1-го порядка.

Если возмущение имеет негармонический характер, то величину его импульса следует вычислять по величине первообразной функции D_P силы P :

$$D_P = \int_0^t P dt. \quad (4)$$

Максимальный импульс возмущения от действия силы P за период будет определяться из выражения:

$$L_{Pmax} = D_{Pmax} - D_{Pmin}, \quad (5)$$

где D_{Pmax} и D_{Pmin} – максимальное и минимальное значения первообразной функции возмущающей силы за период ее действия.

Для случаев действия негармонического возмущающего момента, максимальный импульс силы момента следует вычислять аналогично:

$$L_{Mmax} = D_{Mmax} - D_{Mmin}, \quad (6)$$

где D_{Mmax} и D_{Mmin} – максимальное и минимальное значения первообразной функции возмущающего момента за период его действия.

Вычисление возмущений с помощью предлагаемых критериев от неуравновешенных гармонических сил инерции и их моментов и от негармонического РКМ выполняли численным методом в специально разработанных программах.

При сравнительном анализе возмущений в определенном выбранном (исследуемом) поле изменения нагрузки и скоростных режимов подобных двигателей использовали параметр условной энергии возмущений E для поля режимов без учета массово-габаритных показателей СА:

$$E = \sum_{i=1}^N \frac{(L_{max i})^2}{N}, \quad (7)$$

где $L_{max i}$ – импульс силы (силы момента), вычисленный для i -го режима работы, Н·м (Н·м·с); N – выбранное общее число учитываемых режимов.

Параметр условной энергии возмущений E удобно использовать как сравнительную меру, например, при анализе и оптимизации заданной конструкции ДВС, т.к. с его помощью оценивается возмущающее действие сил инерции или РКМ, а также влияние некоторых конструктивных факторов двигателя без учета массы и размеров исследуемого двигателя.

Предлагаемый оценочный критерий позволяет осуществлять сравнительную количественную оценку различных возмущений ДВС между собой. Из равенства энергии возмущений СА от действия сил e_p и моментов e_M можно найти значения приведенных импульсов:

$$L_{Pmax np} = L_{Pmax} \sqrt{\frac{I_{CA}}{M_{CA}}}, \quad L_{Mmax np} = L_{Mmax} \sqrt{\frac{M_{CA}}{I_{CA}}}. \quad (8)$$

Таким образом можно напрямую количественно сравнивать возмущения от действия импульсов сил $L_{Pmax np}$ со значениями импульсов сил моментов L_{Mmax} или приведенных импульсов сил моментов $L_{Mmax np}$ – с импульсами сил L_{Pmax} .

В третьей главе произведен анализ характера возмущающего действия переменного крутящего момента (РКМ) в различных типах ДВС на основе использования предлагаемых критериев.

Возмущения от РКМ оценивали параметром L_{Mmax} для типичных автомобильных бензиновых двигателей с заданными конструктивными параметрами (ход поршня $S=90$ мм, диаметр цилиндра $D=90$ мм, степень сжатия $\epsilon=9$, удельная масса поршневого комплекта $m'_n=120$ кг/м², удельная масса шатунной группы $m'_{ш}=150$ кг/м²) на девяти разных скоростных режимах от $n=1500$ мин⁻¹ до $n=6000$ мин⁻¹ с равными интервалами, и при девяти раз-

ных нагрузочных режимах от $p_i=0,12$ МПа до $p_i=1,11$ МПа (на 81 режиме работы). Такой анализ возмущающего действия РКМ выполнен для наиболее распространенных компоновок КШМ: R2, R3, R4, R5, R6, V6 (с неравномерным чередованием рабочих ходов), V8.

Оценили влияние числа и расположения цилиндров для сравниваемых конструкций двигателей, исключив влияние геометрических характеристик СА и его массы ($I_{CA}=idem$). Задавали одинаковые характеристики рабочих процессов, режимы работы и массы элементов КШМ. Порядок работы цилиндров выбирали таким образом, чтобы обеспечить равномерное чередование рабочих ходов (кроме двигателя V6).

Некоторые результаты проведенных расчетов представлены на графиках (рис. 2). Выявлено, что у всех типов исследуемых двигателей, сильные возмущения от РКМ имеют место на малых оборотах и высоких нагрузках. Влияние изменения скоростного режима на возмущения РКМ в различных компоновках КШМ различно.

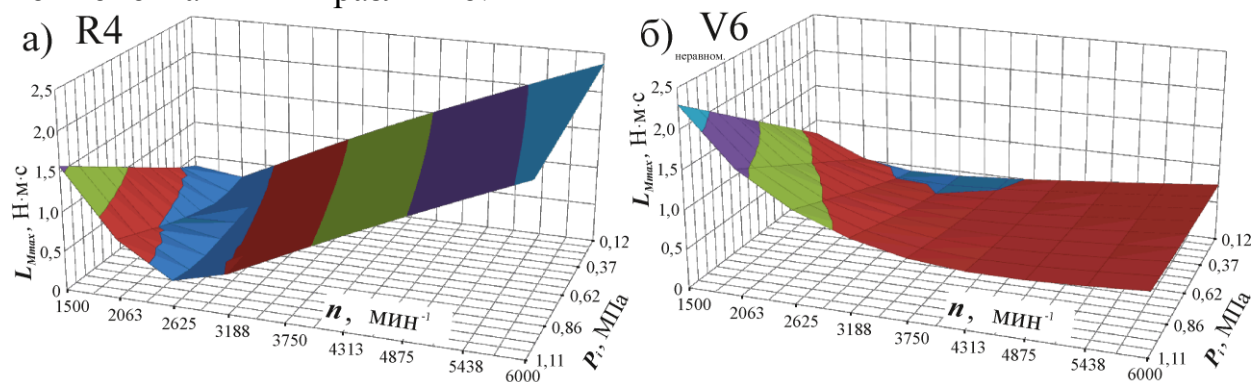


Рис. 2. Возмущение от действия РКМ на разных скоростных и нагрузочных режимах у подобных бензиновых ДВС ($S=90$ мм, $D=90$ мм, $\varepsilon=9$, $m'_n=120$ кг/м², $m'_{ш}=150$ кг/м²) отличающихся только схемой КШМ:

а) R4; б) V6 с неравномерным чередованием рабочих ходов

Общая сравнительная оценка возмущающего действия РКМ для двигателей разных конструктивных схем (таблица 1) выполнена по значению условной энергии возмущений E . Полученные результаты показывают, что при учёте всех режимов и заданных параметров самое большое возмущающее действие от РКМ имеют рядные двух- и четырёхцилиндровые двигатели.

Таблица 1

Значения условной энергии возмущений E от действия РКМ для подобных бензиновых двигателей ($S=90$ мм, $D=90$ мм, $\varepsilon=9$, $m'_n=120$ кг/м², $m'_{ш}=150$ кг/м²) различных схем КШМ для поля типичных режимов работы ($n=1500 - 6000$ мин⁻¹, $p_i=0,12 - 1,11$ МПа)

Тип ДВС	R2	R3	R4	R5	R6	V6 (неравног.)	V8 ($\gamma=90^\circ$)
$E, (\text{Н}\cdot\text{м}\cdot\text{с})^2$	2,31	1,21	1,82	0,48	0,30	0,8	0,10

Выполнен сравнительный анализ влияния некоторых конструктивных факторов КШМ в различных компоновках ДВС на величину возмущений от действия РКМ. Диапазон изменения каждого конструктивного фактора (D, S ,

m'_n, m'_{us} , рабочий объем цилиндра $V_{нц}$) задавали с учетом конструкций современных автомобильных двигателей. Остальные параметры у всех исследуемых типов двигателей задавали одинаковыми.

В результате анализа различных схем подобных двигателей получен широкий спектр данных по влиянию различных факторов на возмущения от РКМ в исследуемых компоновках КШМ. Результаты исследования влияния массы поршневого комплекта в быстроходных и тихоходных двигателях показаны на рис. 3. Неуравновешенность от действия РКМ зависит от выбранного поля режимов работы ДВС. В тихоходных двигателях ($n \leq 2500$ мин⁻¹) при увеличении массы поршневой группы происходит снижение возмущений от РКМ в большинстве анализируемых компоновок КШМ.

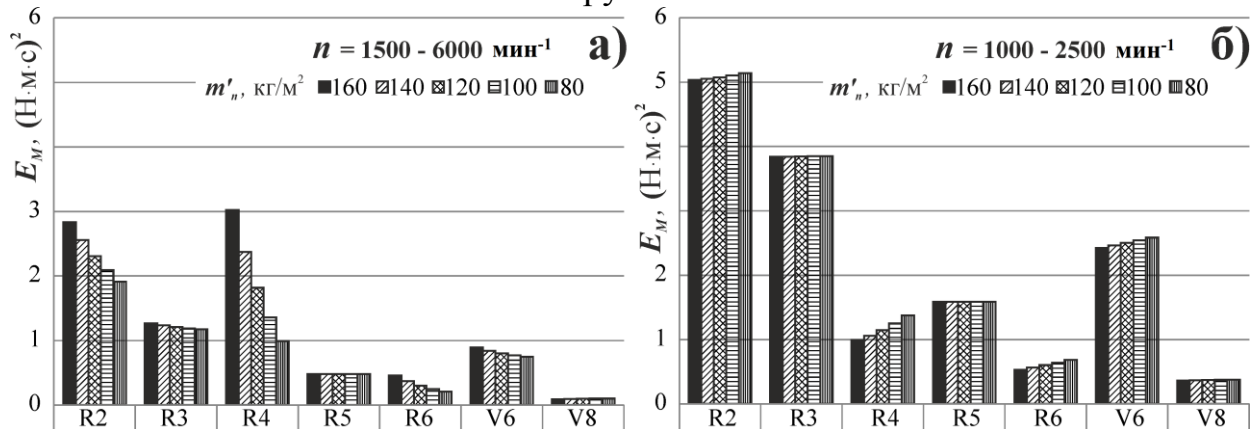


Рис. 3. Влияние изменения удельной массы поршня m'_n на возмущения от РКМ оцениваемых величиной параметра E_M , в бензиновых двигателях различных компоновок КШМ: а) быстроходных; б) тихоходных

В результате использования предложенных критериев можно создавать математические модели для L_{Mmax} путем выполнения численного эксперимента по разработанной методике в специальных программах. В рамках исследования протекания РКМ в различных компоновках КШМ, для каждой схемы определены зависимости:

$$L_{Mmax} = f(n, p_i, m, D, S),$$

где m – удельная масса возвратно-поступательно движущихся частей, кг/м².

В результате получены регрессионные модели вида:

$$L_{Mmax\ cх} = b_1 + b_2 \cdot n + b_3 \cdot p_i + b_4 \cdot m + b_5 \cdot D + b_6 \cdot S + b_7 \cdot n^2 + b_8 \cdot p_i^2 + b_9 \cdot m^2 + b_{10} \cdot D^2 + b_{11} \cdot S^2 + b_{12} \cdot n \cdot p_i + b_{13} \cdot n \cdot m + b_{14} \cdot n \cdot D + b_{15} \cdot n \cdot S + b_{16} \cdot p_i \cdot m + b_{17} \cdot p_i \cdot D + b_{18} \cdot p_i \cdot S + b_{19} \cdot m \cdot D + b_{20} \cdot m \cdot S + b_{21} \cdot D \cdot S,$$

где коэффициенты b_i определены для каждой исследуемой компоновки ДВС.

Полученные данные могут быть использованы на стадии проектирования и доводки конструкции поршневых двигателей для снижения их неуравновешенности. Для некоторых схем КШМ с учетом размеров ДВС и заданного поля режимов работы можно найти оптимальное значение масс КШМ, обеспечивающих наилучшую уравновешенность от действия РКМ.

В четвертой главе представлено решение задач по минимизации различных возмущений в некоторых схемах КШМ поршневых двигателей с использованием разработанной методики оценки возмущений.

Для двигателя R2 проведена оптимизация уравнивающего механизма, включающего два балансирных вала. В анализе, рассмотрена схема уравнивания сил инерции 1-го порядка ΣP_{j1} (рис. 4), где в качестве оптимизируемого параметра рассматривается величина смещения балансирных валов h . Особенностью данной схемы является уравнивание ΣP_{j1} с помощью трех масс, две из которых располагаются на двух балансирных валах, и одна на коленчатом валу. За счет смещения балансирных валов возникает дополнительный гармонический момент $M_{c\delta\delta}$ (рис. 5), действующий в той же плоскости, что и переменный крутящий момент M_k и при некоторых условиях снижающий его возмущающее действие. В результате, на опоры СА передаются возмущения от действия суммарного момента M_Σ .

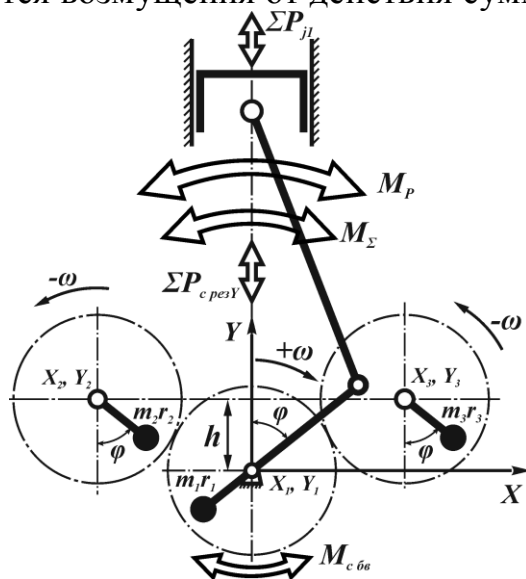


Рис. 4. Схема уравнивания сил инерции первого порядка ΣP_{j1} и частичного уравнивания РКМ M_p для двигателя типа R2:
 $\Sigma P_{cpезY}$ – проекция результирующей центробежной силы для уравнивания ΣP_{j1} ;
 $M_{c\delta\delta}$ – момент центробежных сил балансиров;
 M_Σ – результирующий момент действующий на опоры СА

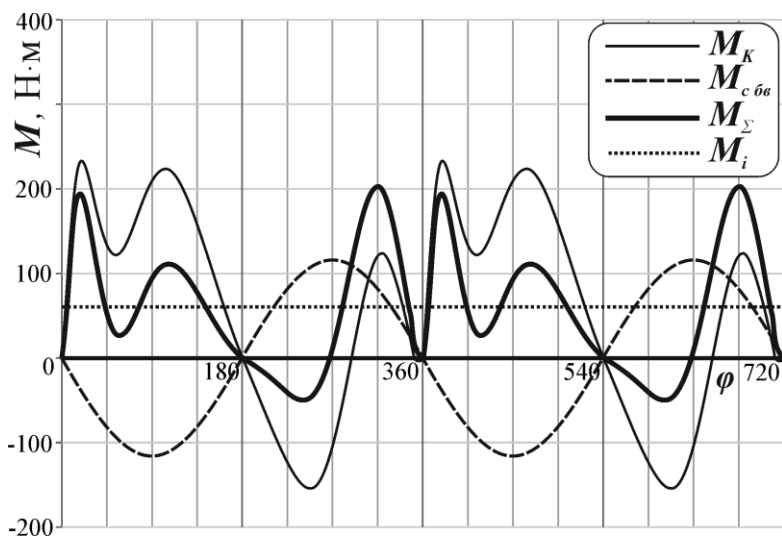


Рис. 5. Моменты, действующие в рассматриваемом двигателе R2 с механизмом уравнивания на режиме работы $n=4000 \text{ мин}^{-1}$, $p_i=1,0 \text{ МПа}$: M_i – средний индикаторный момент; $M_{c\delta\delta}$ – центробежный момент от смещенных балансирных валов; M_Σ – суммарный момент передающийся на опоры СА (совместное действие M_k и $M_{c\delta\delta}$)

Расчет оптимальной величины смещения h выполнен для каждого задаваемого режима работы двигателя из условия минимизации максимального импульса возмущения L_{Mmax} от действия суммарного момента M_Σ . Конструктивные параметры ДВС, задаваемые для расчета возмущений, соответствуют данным двигателя ВАЗ-1113. При оптимальном смещении балансирных валов возмущения от РКМ существенно уменьшаются на многих режимах работы. Но так как автоматическое изменение смещения балансирных

валов h на разных режимах работы двигателя практически затруднительно реализовать, была найдена оптимальная величина смещения $h_{opt\Sigma}$, соответствующая минимуму значения параметра E_M (7) для поля режимов работы ($n=1000 - 6000 \text{ мин}^{-1}$, $p_i=0,2 - 1,0 \text{ МПа}$) которая составила: $h_{opt\Sigma}=26,5 \text{ мм}$.

Выполненный анализ показал возможность существенного снижения возмущений от РКМ при установке балансирных валов с определенным смещением. При оптимальном фиксированном смещении оси валов снижение возмущений от РКМ составило 20%.

Произведен анализ возможностей уравнивания с учетом снижения возмущений РКМ в V-образных 6-ти цилиндровых ДВС с углом развала цилиндров 90° и тремя коленами, расположенными под углом 120° . Недостатком такой схемы КШМ является неравномерные интервалы чередования рабочих ходов, вследствие этого большее возмущающее действие РКМ и в связи с этим, худшая уравновешенность двигателя. Обеспечить равномерное чередование рабочих ходов в схеме V6 можно при использовании коленчатого вала со смещенными шатунными шейками (рис. 6). В таком случае уравнивание момента от сил инерции 1-го порядка, возможно, только с помощью применения балансирного вала. При этом кривая крутящего момента более равномерна, соответственно меньше и возмущения от РКМ.

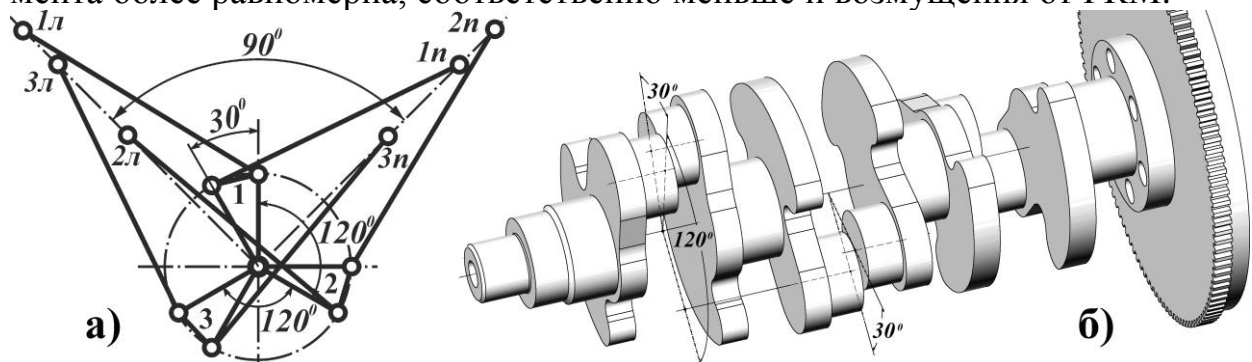


Рис. 6. КШМ двигателя V6: а) схема КШМ V-образного 6-ти цилиндрового ДВС с равномерным чередованием рабочих ходов; б) коленчатый вал со смещенными шатунными шейками V-образного 6-тицилиндрового ДВС

Разработана методика частичного уравнивания суммарного момента от сил инерции 1-го порядка ΣM_{j1} ВПДМ в двигателях типа V6 без применения балансирного вала, естественным способом уравнивания – дополнительными нащечными противовесами. В существующих методах анализа отсутствуют методики вычисления параметров таких противовесов.

Проведена оптимизация уравновешенности для двух вариантов двигателей V6: дизельного ($n=1000 - 2200 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=16,5$, $S=140 \text{ мм}$, $D=130 \text{ мм}$, $m'_n=290 \text{ кг/м}^2$, $m'_{ш}=300 \text{ кг/м}^2$), и бензинового ($n=1000 - 3200 \text{ мин}^{-1}$, $\varepsilon=10$, $S=84 \text{ мм}$, $D=89,9 \text{ мм}$, $m'_n=140 \text{ кг/м}^2$, $m'_{ш}=160 \text{ кг/м}^2$). Выполнили количественную оценку возмущающего действия РКМ для сравниваемых вариантов ДВС: 1 – с неравномерными интервалами рабочих ходов (3-х коленным валом и цельными шатунными шейками колен), 2 – с равномерными интервалами рабочих ходов.

Установлено, что для двигателей V6 работающих на частотах до 3200 мин⁻¹ и равными интервалами между рабочими ходами и 3-х коленным валом, эффективно применять способ естественного уравнивания дополнительными противовесами коленчатого вала и при этом обойтись без установки балансирного вала. Суммарное возмущение от действия частично уравновешенного момента от сил инерции 1-го порядка будет меньше, чем возмущение от РКМ при неравномерном чередовании рабочих ходов.

Проанализирована уравнишенность ДВС схемы V6 с разрезными шатунными шейками, обеспечивающими равномерное чередование рабочих ходов при разных углах развала цилиндров γ . Уравнивание момента ΣM_{j1} во всех случаях рассматривали без применения балансирного вала, только естественным способом – с помощью нащечных противовесов. Оценка разных возмущений проведена для пяти вариантов схем КШМ, при этом задавались соответствующие значения угла смещения шатунной шейки колена вала двигателя δ (рис. 7) обеспечивающие равномерное чередование рабочих ходов при определенном значении угла развала цилиндров γ : 1) $\gamma=60^\circ, \delta=60^\circ$; 2) $\gamma=70^\circ, \delta=50^\circ$; 3) $\gamma=80^\circ, \delta=40^\circ$; 4) $\gamma=90^\circ, \delta=30^\circ$; 5) $\gamma=100^\circ, \delta=20^\circ$.

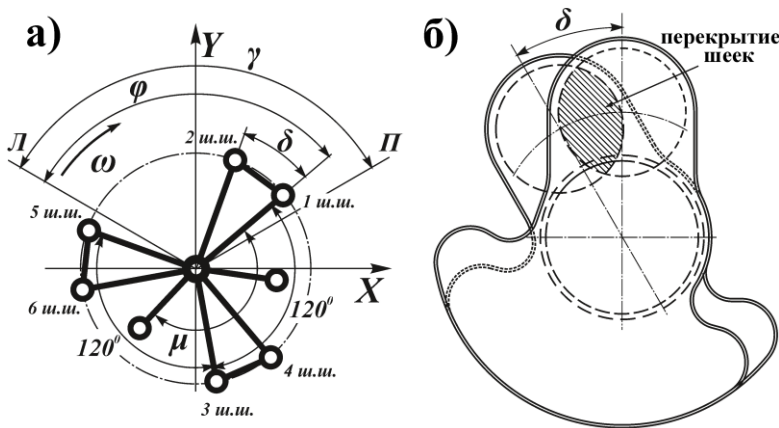


Рис. 7. Схема 3-х коленного вала с разрезными шатунными шейками двигателя V6; $L, П$ – оси цилиндров левого и правого ряда; φ – текущий угол поворота кривошипа; γ – угол развала цилиндров; δ – угол смещения шатунной шейки; μ – угол установки дополнительного противовеса

Для рассматриваемых вариантов схем двигателей количественно оценены возмущения от действия неуравновешенных моментов от сил инерции 1-го и 2-го порядков (ΣM_{j1} и ΣM_{j12}), а также рассчитаны значения параметров дополнительных нащечных противовесов коленчатого вала, которые в максимальной мере уменьшают возмущения от действия ΣM_{j1} .

Расчет параметров нащечных противовесов выполнен исходя из условия минимизации величины остаточного импульса возмущения $L_{Mmax\text{рез}}$ от совместного действия центробежного момента нащечных противовесов $M_{с\text{пр}}$ и момента от сил инерции 1-го порядка ΣM_{j1} .

Некоторые результаты выполненного анализа представлены в виде годографов безразмерных моментов от сил инерции (рис. 8).

Разработаны регрессионные МНК полиномиальные модели для рассматриваемых возмущений: безразмерный импульс силы суммарного момента от сил инерции 1-го порядка $L_{Mmax\text{ }j1\text{ }бр} = -5 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma^2 + 0,695 \cdot \gamma + 81,456$; безразмерный импульс силы суммарного момента от сил инерции 2-го порядка $L_{Mmax\text{ }j2\text{ }бр} = -6 \cdot 10^{-5} \cdot \gamma^2 + 0,0919 \cdot \gamma + 10,745$; безразмерный импульс

силы результирующего момента (от совместного действия $\Sigma M_{j1 \text{ бр}}$ и $M_{c \text{ пр бр}}$)
 $L_{M_{\text{max рез бр}}} = -9 \cdot 10^{-4} \cdot \gamma^2 + 1,3495 \cdot \gamma - 77,639$.

Установлено, что при углах развала цилиндров порядка 80° возмущения, вызываемые действием частично уравновешенного суммарного момента от сил инерции 1-го порядка и неуравновешенного момента от сил инерции 2-го порядка, близки по величине и чем меньше угол развала γ , тем эффективнее уравновешивающее действие нащечных противовесов.

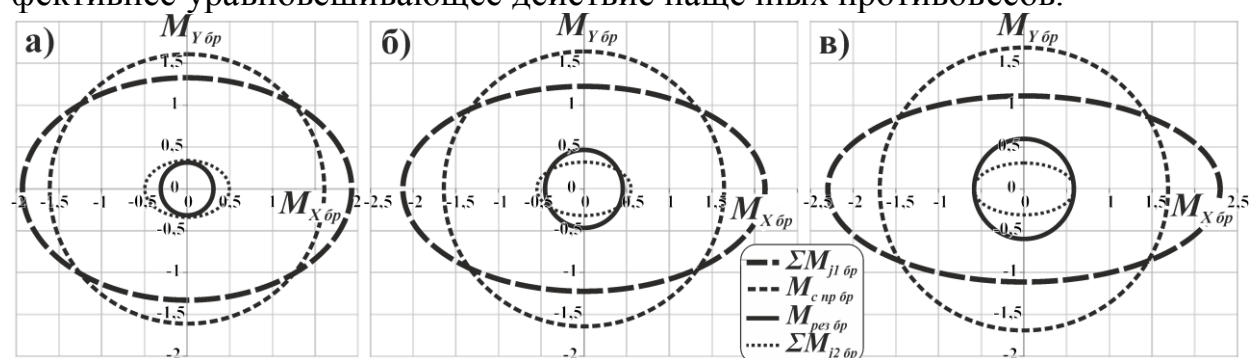


Рис. 8. Лиссажу-графы безразмерных моментов от сил инерции первого $\Sigma M_{j1 \text{ бр}}$ и второго порядка $\Sigma M_{j2 \text{ бр}}$, центробежного от дополнительного противовеса $M_{c \text{ пр бр}}$ и результирующего $M_{\text{рез бр}}$ ДВС V6 со смещенными шатунными шейками и равномерным чередованием рабочих ходов при разных углах развала цилиндров: а) $\gamma=80^\circ$, $\delta=40^\circ$; б) $\gamma=90^\circ$, $\delta=30^\circ$; в) $\gamma=100^\circ$, $\delta=20^\circ$

Выполненный анализ показывает возможность существенного снижения виброактивности двигателей типа V6 со смещенными шатунными шейками без применения балансирных валов, естественным способом – только с помощью нащечных противовесов.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, проведенных в лаборатории двигателей кафедры автомобилей и двигателей ФГБОУ ВПО МГИУ.

Целью исследований являлось получение экспериментальных данных по возмущающему действию РКМ в поршневом двигателе схемы R4 на разных режимах работы и сравнению их с результатами теоретического анализа для подтверждения корректности разработанных теоретических способов анализа и эффективности применения разработанных критериев оценки возмущений.

Задачи, решаемые при проведении экспериментальных исследований включали: разработку экспериментальной установки, позволяющей измерять возмущения двигателя; разработку методики проведения исследования; разработку методов и программ анализа экспериментальных данных. Основная задача экспериментальных исследований заключалась в определении и фиксировании значений виброускорений двигателя на тормозном стенде при различных скоростных и нагрузочных режимах, путем измерения ускорений остова двигателя в поперечной плоскости с помощью датчика (рис. 9). Переменное ускорение остова двигателя прямо пропорционально значениям разности крутящего и среднего индикаторного момента:

$$da_{\partial} = d(M_k - M_i) \cdot \frac{h_{\partial}}{I_{CA X}}, \quad (9)$$

где da_{∂} – текущее значение ускорения, м/с^2 ; $d(M_k - M_i)$ – текущее значение разности крутящего и среднего индикаторного момента, $\text{Н}\cdot\text{м}$; $I_{CA X}$ – момент инерции двигателя вокруг оси X , кг ; h_{∂} – расстояние от центра датчика до оси коленчатого вала двигателя, м .

Стенд для испытаний и замеров всех основных параметров работы двигателей оборудовали необходимым комплексом приборов и приспособлений. Испытуемый двигатель Caterpillar 3114 (дизельный R4, $V_h=4,4$ л, $N_e=76$ кВт при $n_N=2400$ мин^{-1} , $\varepsilon=16$, $S=127$ мм, $D=105$ мм, $m'_n=300$ кг/м^2 , $m'_{uc}=400$ кг/м^2) связан карданным валом с установкой для испытания мощности с электромашинным динамометром SAK-N 670. Изменение нагрузки на двигатель достигается изменением тормозного момента P_T создаваемого электродвигателем моторного стенда.

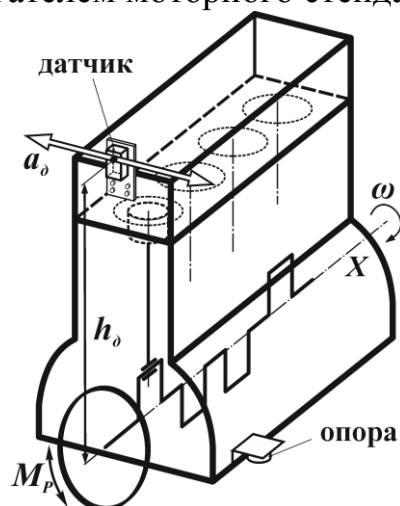


Рис. 9. Схема расположения датчика ускорений на двигателе для измерения возмущений от действия РКМ; h_{∂} – расстояние от оси коленчатого вала до центра корпуса датчика, мм ; a_{∂} – ускорения остова работающего двигателя измеряемое датчиком в месте его расположения

Для замера возмущений от РКМ использовали датчик ускорений MMA7261Q и модуль аналого-цифровой преобразователь АЦП E14-440. Датчик прикреплен к двигателю так, чтобы фиксировать значения его текущих ускорений в поперечной плоскости (рис. 9).

Измерение ускорений остова ДВС выполнили на 15-ти режимах работы исследуемого двигателя: на пяти заданных скоростных режимах (1000, 1350, 1700, 2050, 2400 мин^{-1}) задавали определенную нагрузку: 0% (холостой ход), 50% от максимально выбранной нагрузки, и 100% максимальной выбранной нагрузки. На каждом режиме измеряли все основные параметры испытуемого двигателя: крутящий момент, мощность, часовой и удельный эффективный расход топлива и др. Время измерения ускорений (запись данных с датчика в постоянную память с определенной частотой) на каждом режиме составило 10 – 15 с, что соответствует измерению ускорений колебаний от нескольких сот циклов (периодов) результирующего крутящего момента. На разных скоростных режимах задавались такие частоты записи данных, чтобы на периоде изменения РКМ T фиксировать 300 значений ускорений.

В ходе обработки экспериментальных данных получены кривые изменения ускорений остова двигателя по времени на заданных режимах работы (рис. 10). Возмущения от действия РКМ оценивали величиной условного

импульса $L_{M\text{ усл}}$, т.е. по величине максимального размаха первообразной D функции ускорения остова ДВС за период действия T результирующего крутящего момента:

$$L_{M\text{ усл}} = D_{\max} - D_{\min}; \quad (10)$$

$$D = \int_0^{k_{f\delta}} a_{\delta} \cdot dk, \quad (11)$$

где $k_{f\delta}$ – текущее значение массива считанных показаний датчика при заданной частоте f_{δ} ; a_{δ} – текущее значение ускорения измеренного датчиком на заданном режиме измерения.

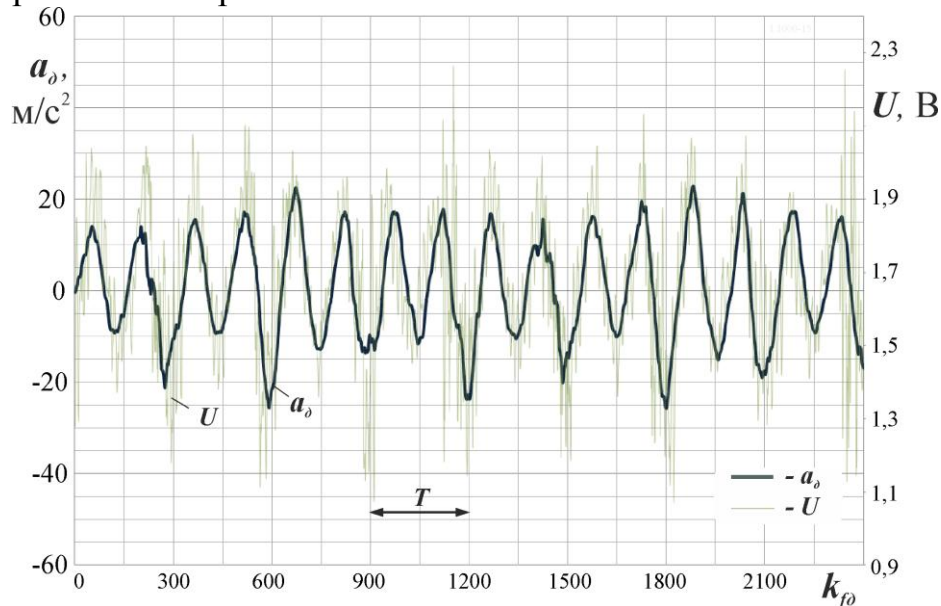


Рис. 10. Фрагмент оциллограммы виброускорений a_{δ} двигателя САТ-3114 в плоскости перпендикулярной оси коленчатого вала на режиме: $n=1000 \text{ мин}^{-1}$ при $P_T=15 \text{ кг}$; U – напряжение датчика, В; $k_{f\delta}$ – текущее значение массива считанных показаний датчика при частоте $f_{\delta}=10 \text{ кГц}$; T – период результирующего крутящего момента – соответствует количеству считанных показаний датчика $k_{M\kappa}=300$

При обработке результатов испытаний использованы исходные положения математической статистики, для каждого режима подсчитаны значения $L_{M\text{ усл}}$ и соответствующие статистические показатели. Для учета угловой скорости вращения коленчатого вала, при которой были выполнены замеры ускорений, значения рассчитанных условных импульсов $L_{M\text{ усл}}$ приведены ко времени их действия:

$$L_{M\text{ пр}} = A \cdot L_{M\text{ усл}}. \quad (12)$$

где $A = 1000/n$; n – частота вращения коленчатого вала, мин^{-1} .

В результате экспериментальных исследований была получена характеристика возмущений РКМ в поле режимов (рис. 11 б). Для сравнения результатов экспериментальных исследований с теоретическими данными выполнен соответствующий теоретический анализ действия РКМ для параметров испытуемого двигателя. В результате анализа получены данные возмущений $L_{M\max}$ (рис. 11 а) для поля режимов соответствующего данным экспе-

римента. Величина нагрузки определялась значением среднего индикаторного давления в цилиндре p_i . Характер возмущений от РКМ в двигателе САТ-3114 типичен для двигателей таких компоновок (см. рис. 2 в).

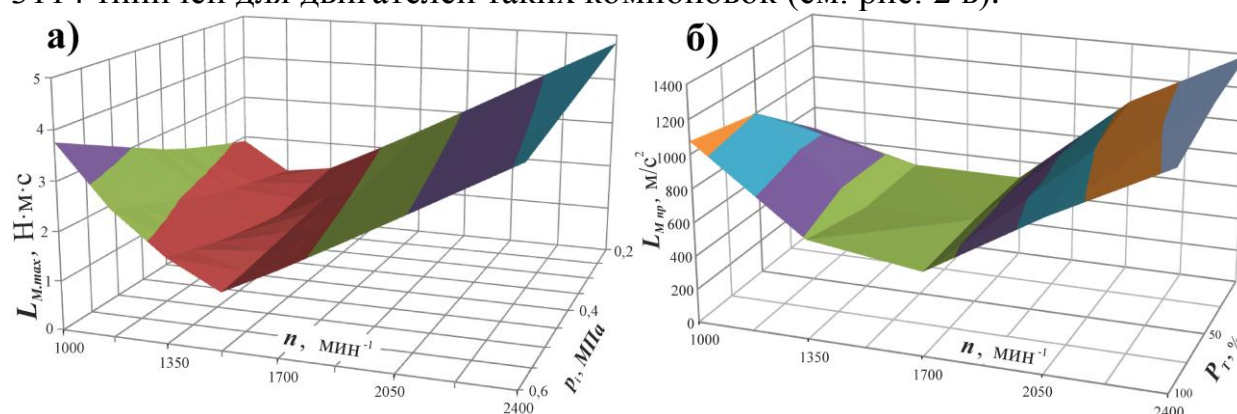


Рис. 11. Диаграмма величин импульсов возмущений РКМ испытуемого двигателя САТ-3114 в исследуемом поле режимов: а) диаграмма импульсов полученная в результате теоретического анализа возмущений РКМ L_{Mmax} ; б) диаграмма приведенных импульсов полученная в результате обработки данных экспериментальных исследований возмущений от РКМ L_{Mnp}

Полученные диаграммы сравнили по относительному изменению возмущений на различных режимах (таблица 2). За основной приняли режим, соответствующий максимальному возмущению от РКМ. Экспериментальная характеристика возмущений подобна теоретически найденной, режимы работы соответствующие максимальным и минимальным возмущениям РКМ совпадают. Необходимо заметить, что $L_{Mmax} = c \cdot L_{Mnp}$, где c – некоторая постоянная величина (определяемая массово-габаритными характеристиками испытуемого ДВС). Общая ошибка по всем режимам составила 5,8%, и объясняется как некоторыми неточностями принятой модели для определения газовых сил в теоретическом расчете, так и неточностями считывания и обработки сигналов ускорений при экспериментальном исследовании.

Таблица 2

Относительное изменение возмущений от РКМ (%) в поле режимов двигателя САТ-3114 при теоретическом и экспериментальном исследовании

частота вращения к. вала, мин ⁻¹	нагрузка, %		100		50		0	
	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.	теор.	эксп.
1000	78,0	76,9	55,0	71,4	39,3	47,3		
1350	35,7	42,1	24,2	35,2	28,7	35,6		
1700	35,4	35,3	43,2	36,2	51,5	35,4		
2050	60,1	63,8	67,7	70,6	75,8	75,2		
2400	85,3	88,7	92,6	96,2	100,0	100,0		

Предлагаемый критерий оценки возмущений, в основе которого определяется максимальный за цикл импульс силы (импульс силы момента) позволяет достоверно оценивать фактические возмущения работающего двигателя.

ОБЩИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика количественной оценки возмущений поршневых ДВС. В качестве основных критериев оценки возмущений предложены параметры максимального импульса L_{max} и энергии e . Такие критерии наиболее полно отражают суть возмущающего действия и позволяют решать широкий круг задач, направленных на улучшение уравновешенности поршневых ДВС различных схем КШМ.

2. Выявлен характер влияния некоторых конструктивных факторов поршневых ДВС (массы поршневого и шатунного комплекта, диаметра цилиндра и хода поршня, литража) различных схем КШМ на их уравновешенность от действия РКМ с помощью предлагаемых критериев. Разработаны регрессионные многофакторные модели зависимости возмущений РКМ от конструктивных параметров ДВС. С помощью таких моделей уже на стадии проектирования СА можно добиться его минимальной неуравновешенности.

3. С помощью предлагаемых критериев проведена сравнительная оценка возмущений РКМ в некоторых конструкциях ДВС и установлен характер их действия в поле режимов работы. Получен широкий спектр новых результатов, например влияние изменения массы поршневого комплекта двигателя на возмущения от переменного крутящего момента. Можно отметить, что в двигателях R5 такое влияние отсутствует. В двигателях R4 на малых скоростных режимах ($1000 - 2000 \text{ мин}^{-1}$) увеличение массы ВПДМ ведет к снижению возмущений от РКМ. Увеличение хода поршня S и диаметра цилиндра D , а также и литража всегда ведет к возрастанию возмущений от РКМ, но эта зависимость определяется схемой КШМ с учетом интервалов между рабочими ходами, поля рабочих режимов и рядом конструктивных параметров.

4. На основе предлагаемых критериев разработана программа и методика минимизации возмущений в ДВС типа R2 с помощью особого расположения уравновешивающих валов. Найдена величина оптимального смещения оси балансирных валов, обеспечивающая минимальное значение энергии возмущений РКМ в поле типичных режимов работы ДВС. Разработана соответствующая математическая модель. При этом снижение возмущений от РКМ составляет 20%.

5. Разработана методика снижения возмущений от инерционных моментов для двигателей V6 (с равномерным чередованием рабочих ходов) с помощью предлагаемых критериев без использования балансирных валов, а только за счет нащечных противовесов коленчатого вала. При таком частичном уравновешивании момента от сил инерции 1-го порядка достигается снижение его возмущений так, что остаточное возмущение сопоставимо с возмущениями от РКМ.

6. Для двигателей V6 с разными углами развала цилиндров и равномерным чередованием рабочих ходов получены математические модели зависимости возмущений частично уравновешенного момента сил инерции 1-го порядка, неуравновешенного момента сил инерции 2-го порядка от угла

развала цилиндров. Такие модели позволяют находить наиболее уравновешенные схемы двигателей без применения балансирных валов.

7. Разработана методика экспериментального исследования возмущений в поршневых двигателях на основе применения предлагаемых критериев и проведены экспериментальные исследования возмущений от РКМ дизеля Caterpillar-3114 в заданном поле режимов. Результаты испытаний подтвердили возможности корректной оценки уравновешенности двигателя от различных возмущающих факторов с помощью разработанных критериев. Относительная погрешность измерений по всему полю режимов составила около 6%.

Основные положения диссертации отражены в 9 печатных работах. В том числе 3 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

1. Ашишин А.А. Новый способ оценки внутренних возмущений поршневых автомобильных ДВС [Текст] / А.А. Ашишин, В.В. Гусаров // Машиностроение и инженерное образование, №1. –М.:, 2009. – С. 15-21.

2. Ашишин А.А. Метод количественной оценки виброактивности автотракторных ДВС [<http://www.gosniti.ru/forms/t105.doc>] / А.А. Ашишин, В.В. Гусаров, А.А. Мылов // Труды ГОСНИТИ. Том № 105.

3. Ашишин А.А. Влияние износа прецизионных пар топливной аппаратуры на работу дизельного двигателя [Текст] / А.А. Ашишин, А.А. Мылов // Грузовик, №3, 2010.

4. Ашишин А.А. Разработка новых методов анализа виброактивности поршневых двигателей внутреннего сгорания [Текст] / А.А. Ашишин // Доклады на конференции посвященной 50-летию МГИУ. –М.:, 2009 – С. 53-59.

5. Ашишин А.А. Анализ и расчет уравновешивания поршневых двигателей [Текст] / А.А. Ашишин, В.В. Гусаров, А.А. Мылов // Вестник РГАЗУ, 2009.

6. Ашишин А.А. Уравновешивание ДВС конструктивной схемы V-6 [Текст] / А.А. Ашишин, В.В. Гусаров, А.А. Мылов // Вестник РГАЗУ, 2009.

7. Ашишин А.А. Анализ уравновешенности 6-ти цилиндровых V-образных поршневых ДВС с углом развала цилиндров 90 градусов [Текст] / А.А. Ашишин // Сборник научных докладов VI научно-практической конференции, –М.:, 2006. -С. 38-43.

8. Ашишин А.А. Новый способ анализа и расчёта уравновешивания поршневого двигателя типа R2 [Текст] / В.В. Гусаров, А.А. Ашишин, // Журнал «Известия МГИУ», –М.:, 2006.

9. Ашишин А.А. Уравновешивание ДВС конструктивной схемы V-6 без использования балансирных валов [Текст] / В.В. Гусаров, А.А. Ашишин // Сборник докладов, посвященный конференции в МГТУ им. Баумана «Двигатель-2007», –М.:, 2007.