

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ДРУЖБЫ НАРОДОВ ИМЕНИ ПАТРИСА ЛУМУМБЫ»

На правах рукописи

НОВИКОВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО
НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО
ВАЛА**

Специальность: 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Ощепков П.П.

Москва - 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Перечень принятых сокращений и условных обозначений.....	5
Введение.....	7
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ.	13
1.1. Анализ состояния двигателя на основании данных о компрессии.....	15
1.2. Диагностика двигателя при помощи анализатора герметичности цилиндров (АГЦ).....	16
1.3. Метод диагностирования ДВС с помощью технических эндоскопов (визуально-оптический метод контроля).....	21
1.4. Диагностика двигателей по шумам и вибрациям.....	23
1.5. Диагностика двигателя по анализу пробы масла.....	26
1.6. Диагностирование двигателя при помощи считывания данных с бортового компьютера и неравномерности вращения коленчатого вала.....	27
1.7. Диагностирование ДВС по анализу отработавших газов.....	30
1.8. Техническая диагностика методом индицирования.....	33
1.9. Преимущества и недостатки методов диагностирования.....	37
Выводы по главе 1.....	41
Задачи исследования.....	42
ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА	43
2.1. Теоретическое обоснование влияния конструктивных и режимных параметров, характеризующих неисправности двигателя внутреннего сгорания, на крутящий момент двигателя	43
2.2. Анализ конструктивных и режимных параметров, влияющих на удельную тангенциальную силу.....	48
2.3. Анализ влияния отклонений суммарной удельной тангенциальной силы на неравномерность вращения коленчатого вала двигателя.....	52
2.4. Алгоритм проведения расчетных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на колебания удельной тангенциальной силы и неравномерность вращения коленчатого вала.....	56

2.5. Анализ технических средств, необходимых для определения неравномерности вращения коленчатого вала ДВС	60
Выводы по главе 2.....	72
ГЛАВА 3. РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ	74
3.1 Программа проведения расчетных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на колебания крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала	74
3.2 Расчетный анализ влияния доли снижения давления в 1-ом цилиндре на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических двигателей по разработанной программе в Excel.....	78
3.3 Расчетный анализ влияния изменения отклонения длины шатуна от нормы ($K_{ш}$) для 1-го цилиндра на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических двигателей по разработанной программе в Excel.88	
3.4 Расчетный анализ влияния изменения массы поршня (K_{mn}) поршневой группы на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических двигателей по разработанной программе в Excel.....	97
3.5 Расчетный анализ влияния отклонения угла кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$) на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических двигателей по разработанной программе в Excel.....	102
3.6 Расчетный анализ значений суммарной удельной тангенциальной силы с учетом влияющего параметра по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра	108
3.7 Расчетный анализ влияния исследованных параметров на неравномерность частоты вращения коленчатого вала.....	128
Выводы по главе 3.....	148
ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	153
4.1 Экспериментальная установка.....	153
4.2. Методика экспериментальных исследований.....	154
4.3. Программа экспериментальных исследований.....	157
4.4. Результаты экспериментальных исследований	159
4.4.1. Обработка экспериментальных данных для исправного двигателя.159	
4.4.2. Обработка экспериментальных данных для двигателя с отключенной подачей топлива в 1-м цилиндре.....	161

4.4.3. Сопоставление расчетных и экспериментальных исследований...	163
4.5. Перспективы развития метода оценки протекания рабочих процессов в двигателе по неравномерности частоты вращения коленчатого вала [35].	168
Выводы по главе 4.....	185
Заключение	187
Литература	190
Приложения	205

Перечень принятых сокращений и условных обозначений

СИМВОЛЫ

α	– коэффициент избытка воздуха;
$\bar{\varepsilon}_i$	– мгновенное ускорение коленчатого вала двигателя
$\bar{\omega}_i$	– мгновенная скорость вращения коленчатого вала
\bar{T}_m	– временной интервал между импульсами
ε	– геометрическая степень сжатия;
γ	– коэффициент остаточных газов;
η_i	– индикаторный коэффициент полезного действия;
η_t	– термический коэффициент полезного действия;
η_v	– коэффициент наполнения двигателя;
φ	– угол поворота коленчатого вала;
$\varphi_{ш}$	–угловой шаг или ширина зуба инкрементного колеса
$\lambda_{КШ}$	– отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;
n	– частота вращения коленчатого вала;
p	– текущее давление в цилиндре двигателя;
p_a	– абсолютное давление воздуха в цилиндре в начале такта сжатия;
p_i	– среднее индикаторное давление цикла;
p_k	– давление воздуха после компрессора;
p_r	– противодействие отработавших газов;
R	– универсальная газовая постоянная;
S_{II}	– ход поршня;
T_i	– период следования импульсов;
t, τ	– текущее время;
V	– текущий объем цилиндра двигателя;

- $D_{\text{ц}}$ - диаметр цилиндра
- $N_{\text{е_ном}}$ - номинальная мощность двигателя
- $n_{\text{ном}}$ - номинальная частота вращения
- $I_{\text{м}}$ - число импульсов на оборот углового отметчика
- dzn - число разрядов, регистрируемых цифровым запоминающим устройством
- n_1 - средний показатель политропы сжатия
- n_2 - средний показатель политропы расширения

АББРЕВИАТУРА

- ВВ – вредные вещества;
- ВМТ – верхняя мертвая точка;
- ДВС – двигатель внутреннего сгорания;
- КПД – коэффициент полезного действия;
- ЦПГ – цилиндро-поршневая группа;
- КС – камера сгорания;
- ОГ – отработавшие газы;
- ПКВ – поворот коленчатого вала;
- ДПКВ – датчик поворота коленчатого вала;
- КШМ – кривошипно-шатунный механизм;
- ОЗУ (Ram) – оперативное запоминающее устройство;
- ПЗУ (ROM) – постоянное запоминающее устройство;
- ЭБУ – электронный блок управления;
- град – градусы.

Введение

Актуальность темы исследования. Диагностирование неисправностей является одним из самых важных аспектов безотказной эксплуатации автотранспортных средств. Диагностика двигателя – это комплекс мероприятий по выявлению неисправностей двигателя, то есть определение, почему двигатель не функционирует должным образом.

Большинство современных методов диагностирования универсальны и их возможно применить как для диагностики бензиновых, так и для дизельных двигателей. Проблема поиска и устранения неисправностей по сей день является наиболее актуальной. Существует необходимость разработки новых методик диагностирования, которые позволят получить максимально достоверный результат при минимальных затратах времени, низкой квалификации персонала и незначительных изменениях в конструкции.

Современные автомобильные двигатели в своем подавляющем большинстве оснащаются специализированным бортовым компьютером – электронным блоком управления (ЭБУ), который, кроме своего основного назначения, осуществляет оперативную диагностику ДВС. Во многом эти функции тривиальны: обрыв электрической цепи датчика или исполнительного устройства, короткое замыкание цепи, выход регистрируемого параметра за предустановленные границы и т.п.

Современные электронные системы позволяют не только получать информацию, но и обрабатывать ее с высокой точностью и скоростью не только для управления тем или иным узлом транспортного средства, но также для диагностирования и ремонта, что активно разрабатывается и применяется различными производителями транспортных средств, а также производителями различных агрегатов. Тенденция развития систем мониторинга техники с минимальным участием человека наблюдается во всех областях и будущее за полностью автоматическими системами. Во всем мире исследователи решают

комплекс задач по обеспечению возможности определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания (ДВС) транспортных средств в режиме реального времени, что могло бы позволить более точно регулировать работу двигателей, а также прогнозировать необходимость обслуживания и ремонта того или иного узла двигателя. Одной из таких задач остается повышение точности методик диагностирования неисправностей, особенно основанных на косвенных измерениях, а также локализация неисправностей. Другой немаловажной задачей по определению технического состояния ДВС является проблема, связанная с определением показателей, характеризующих наличие неисправностей, при этом задача по определению влияния отклонения параметров в пределах допусков на производство отдельных узлов двигателя исследователями не ставилась. Этим объясняется актуальность проведенного исследования.

Таким образом, разработка алгоритма диагностирования с целью определения технического состояния двигателя без его остановки позволит расширить возможности электронных блоков управления, что обеспечит своевременное выявление причин возникновения неисправностей в том числе в тех случаях, когда прописанные заводом-изготовителем алгоритмы по диагностике не могут этого сделать.

Степень разработанности темы. Определение неисправностей в двигателях может быть осуществлено различными способами с использованием того или иного специализированного оборудования, которое, как правило, труднодоступно в силу своей стоимости, а также для применения того оборудования требуются специализированные навыки, что обуславливает использование такого оборудования и методик только на станциях технического обслуживания.

Транспортные средства, оснащенные электронным блоком управления при определении той или иной неисправности, сообщают водителю только информацию о наличии неисправности в работе ДВС, которая требует внимания, в виде зажженного индикатора «Проверьте двигатель» (Check engine) на приборной панели транспортного средства. А для того, чтобы узнать какая неисправность

была определена блоком управления, необходимо подключить диагностический сканер, который покажет зафиксированный код ошибки. Однако достаточное большое количество неисправностей потребуют проведения дополнительных действий и специализированного оборудования для выявления причины неисправности. Таким образом, разработка метода своевременного определения технического состояния двигателя при его эксплуатации по изменяющимся в процессе эксплуатации косвенным показателям, является актуальной задачей.

Цели и задачи исследований.

Целью исследований является разработка алгоритма определения технического состояния двигателя при установившемся режиме работы по неравномерности вращения коленчатого вала.

Для достижения указанной цели требуется решение следующих задач:

1. Определить косвенные показатели и режимы для проведения диагностики ДВС косвенным методом.
2. Провести теоретическое и расчетное обоснование значимости выбранных конструктивных и режимных параметров для оценки технического состояния двигателя по косвенным показателям.
3. Расчетным экспериментом определить взаимосвязь между неравномерностью частоты вращения коленчатого вала с техническим состоянием ДВС и разработать алгоритм поиска неисправного цилиндра.
4. Создать экспериментальную установку для проведения экспериментальных исследований по проверке предложенного метода оценки технического состояния двигателя.
5. Экспериментально проверить правомерность разработанного алгоритма диагностики по результатам регистрации мгновенной частоты вращения коленчатого вала.

Объектом диссертационного исследования является оценка технического состояния ДВС.

Предметом диссертационного исследования является взаимосвязь неравномерности частоты вращения коленчатого вала двигателя с техническим состоянием ДВС.

Методология и методы проведенных исследований. Достижение цели диссертационной работы путем решения задач исследования осуществлялось с использованием методов теоретического анализа, компьютерного моделирования исследований, а также собственных расчетно-аналитических и экспериментальных работ, основываясь на стандартизированных и специально разработанных методиках исследований.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Получены зависимости и количественные характеристики, связывающие отклонения конструктивных и режимных параметров с изменением протекания крутящего момента и частоты вращения.

2. Разработан алгоритм поиска неисправного цилиндра по косвенным показателям.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Получены уравнения, описывающие влияния отклонений давления в цилиндре, массы поршня, изменения длины шатуна, отклонения угла между осями кривошипов от номинального для одного цилиндра многоцилиндрового ДВС на крутящий момент.

2. Обосновано применение диагностических показателей для определения технического состояния двигателей и локализации неисправности.

3. В процессе работы над темой разработаны устройства определения мгновенной угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС, а также устройства регулирования состава горючей смеси, и получены патенты РФ № 137387, № 156397, № 156883, № 182134, № 189396.

4. Разработана система сбора и обработки экспериментальных данных, позволяющая локализовать неисправность и рассчитывать значение падения давления в цилиндре многоцилиндрового ДВС с использованием программного обеспечения (MS Excel) и получать информацию о техническом состоянии на различных режимах работы ДВС.
5. Разработана программа для расчета влияния отклонений различных конструктивных и режимных параметров на неравномерность вращения коленчатого вала.
6. Теоретически и экспериментально доказана возможность диагностирования технического состояния двигателей по разработанному алгоритму.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается современными методами математической обработки результатов экспериментов с использованием программного обеспечения MS Excel 2016, достаточным объемом экспериментальных данных, высокой степенью их сходимости с результатами расчетных исследований, а также положительными результатами апробации.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях Инженерного факультета РУДН в 2012, 2013 и 2014 гг., Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2013», посвященной 100-летию юбилею первого ректора РУДН профессора С.В. Румянцева, (г. Москва, 2013 г.), Всероссийском семинаре в МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2014 г.), Всероссийском семинаре в МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва, 2022 г.), Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «ВГЛТА» (г. Воронеж, 2014 г.), VIII^й Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2015», (РУДН, г. Москва, 2015 г.), Международной научной конференции «International congress of scientists, Moscow, Russia» (г. Москва, 2017 г.), Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова (г. Москва, 2019 г.), заседаниях кафедры теплотехники и тепловых двигателей РУДН, Москва, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг., заседаниях

департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, Москва, 2017, 2018, 2019 гг.

Реализация результатов работы. Теоретические и расчетные результаты проведенного исследования используются при выполнении научно-исследовательских работ, применяются в учебном процессе департамента машиностроения и приборостроения инженерной академии Российского университета дружбы народов, а также при подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров. Кроме того, рассмотренные в диссертационной работе положения учитываются при проектировании двигателей внутреннего сгорания на предприятии ООО «МОТОР КОМ», а также при проведении учебных занятий по дисциплине «Методы испытаний ДВС» в РУДН.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 17 научных работ, в том числе 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 1 - в издании, входящем в международные базы данных, 7 - патентов РФ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, содержит 265 страниц, 113 рисунков, 24 таблицы, 4 приложения, библиография включает 136 наименований литературы.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ

Известные методы технического диагностирования силовых агрегатов транспортных средств можно разделить на субъективные – как правило основанные на визуальном контроле и тактильных ощущениях диагноста, и на объективные – заключающиеся в использовании измерительных приборов, при этом конечный результат диагностирования может быть получен прямым или косвенным методом измерения [53-62]. Также большую роль играют и встроенные системы самодиагностики ДВС, но они определяют только состояние цепи до управляемых электроникой систем и проводят сравнение входящих сигналов с ожидаемыми, которые хранятся в ПЗУ контроллеров. Информацию от блока управления диагност может получить, подключившись к нему, например, с помощью диагностического сканера, что по кодам ошибок позволяет определить до 62% нарушений в работе двигателя, а остальные неисправности возможно локализовать только при проведении более глубокой диагностики. Таким образом, исследование новых алгоритмов по определению технического состояния, позволяющих выявлять неисправности в процессе эксплуатации, не прекращается. Особенное место занимает увеличение количество диагностируемых параметров тех систем ДВС, которыми электроника не управляет [63-74]. Широкий выбор оборудования для диагностики ДВС (специализированные сканеры и мотортестеры) позволяет значительно сократить время на проведение диагностических операций, например, мотортестеры применяются при диагностировании различных систем, просмотра сигналов от датчиков, по показаниям которых блок управления корректирует работу двигателя [75-83, 86].

Любые методики определения технического состояния имеют свои преимущества и недостатки, что будет рассмотрено далее, и напрямую связаны с профессиональными навыками диагноста.

В РУДН или с участием сотрудников РУДН проводились исследования технического состояния двигателей на различных режимах работы, а также были разработаны методики и приборы для определения технического состояния ДВС [125-134].

В настоящее время исследованием и совершенствованием методик диагностирования транспортных средств и их узлов и агрегатов занимаются многие отечественные организации, например, РУДН, ВИМ (ГОСНИТИ), РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, НИИАТ, МАДГТУ (МАДИ), БГАУ, МГТУ им. Баумана, СибФТИ, ВолГТУ, СибИМЭ, ЮурГАУ, Саратовский ГТУ, ИрНИТУ, ПАО «КАМАЗ» и другие. Из зарубежных компаний можно выделить автопроизводителей, а также компании, занимающиеся разработкой устройств для автомобилей и средств диагностики, например, Volkswagen, Mercedes, Ford Motor Company, Toyota, General Motors, Mitsubishi, Iveco, Caterpillar, MAN, MTU, Wärtsilä, Diesel&Turbo, Denso, Ono Sokki, Bosch, Shenk, Maha, Delphi, Snap-On и другие.

Огромный вклад в исследования и совершенствование технического диагностирования двигателей внутреннего сгорания и других агрегатов транспортных средств внесли: Н.Н. Патрахальцев, С.В. Гусаков, С.Н. Девянин, А.И. Яманин, А.Н. Гоц, Е.А. Григорьев, А.С. Дорохов, С.М. Гайдар, А.А. Александров, В.А. Чечет, Н.С. Ждановский, И.Р. Ахметзянов, С.Н. Ольшевский, С.Н. Кривцов, А.В. Николаенко, В.М. Лившиц, Б.В. Павлов, В.А. Змановский, А.П. Болдин, В.М. Михлин, А.М. Лукин, С.В. Путинцев, И.В. Возницкий, А.А. Отставнов, М.И. Левин, Л.В. Мирошников, В.Н. Луканин, Н.А. Иващенко, Л.В. Грехов, В.И. Сидоров, В.А. Лашко, А.А. Обозов, А.Ю. Коньков, Г.П. Панкратов, Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский, Г.В. Крамаренко, А.С. Гребенников и их последователи.

1.1. Анализ состояния двигателя на основании данных о компрессии

Метод анализа компрессии в цилиндре долгое время был наиболее распространенным методом анализа состояния цилиндропоршневой группы. Компрессометр устанавливают на место форсунки или на место свечи зажигания и по его показаниям оценивают в каком состоянии находится кривошипно-шатунный механизм [1, 88]. Так, например, вследствие неравномерности износа верхней части гильз цилиндров с формированием конусности и эллипсности увеличивается утечка рабочего заряда на такте сжатия через зазор пары гильза-кольцо и снижается величина степени сжатия. Следствием уменьшения фактической степени сжатия является ухудшение сгорания рабочей смеси и очистки цилиндров от продуктов сгорания, что ведет к ухудшению работы двигателя [2, 3]. Кроме того, при увеличении зазоров часть несгоревшего топлива попадает в картер, разбавляя моторное масло, которое изменяет свои свойства, а именно увеличивается расход и снижается давление масла, увеличивая износ механизмов двигателя. На такой стадии эксплуатации ДВС нуждается в капитальном ремонте (рис. 1.1).

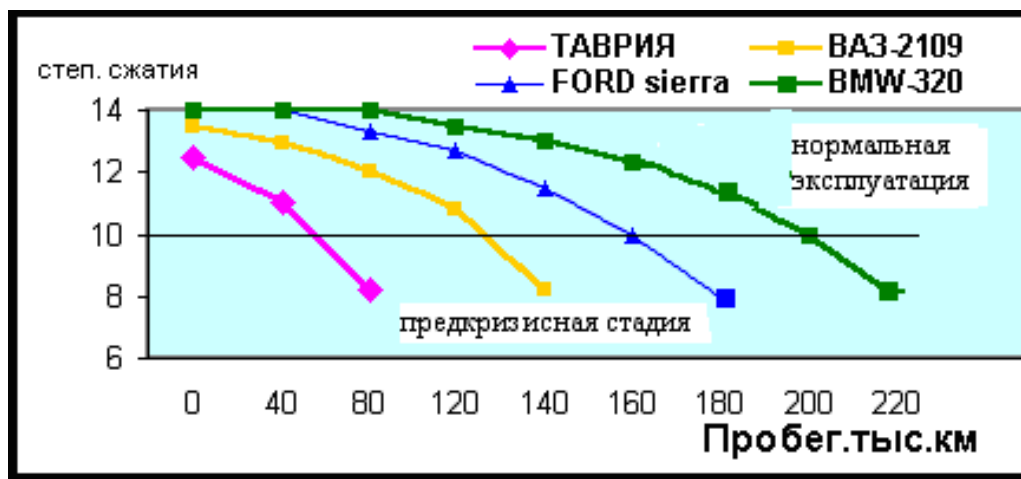


Рис. 1.1. Значение показаний компрессометра в зависимости от пробега автомобиля. [1]

Количество отработанных моточасов двигателем зависит от качества его изготовления и сборки, обкатки, режимов, на которых он эксплуатировался, от

качества топлива и моторного масла. Так, например, для большинства бензиновых двигателей, эксплуатирующихся на территории Российской Федерации, критичным является значение компрессии в цилиндре меньше 1 МПа. Эта величина является пороговым значением, при достижении которого двигатель эксплуатируется с быстрым ухудшением всех рабочих параметров (перерасход топлива, увеличивается расход масла на угар, снижение мощности и приемистости, повышение дымности и токсичности отработавших газов). Как видно на (рис. 1.1) среднестатистический пробег у автомобилей: Таврия - 40-60 тыс.км, ВАЗ-2109 - около 120 тыс.км, *FORD SIERRA* - 160 тыс.км, *BMW-320* –около 200-250 тыс.км.

Кроме того, если компрессия меньше 1 МПа, то в цилиндрах уменьшается температура, до которой разогревается топливная смесь при процессе сжатия. Для дизелей этот фактор является критичным, так как порог самовоспламеняемости для дизельного топлива составляет 300-400 °С и, соответственно, двигатель может не запуститься.

Для большинства современных бензиновых двигателей величина компрессии составляет 14 атм. При такой компрессии температура топливно-воздушной смеси перед ее воспламенением превышает 180 °С, что способствует лучшему испарению топлива (примерно 90 % топлива находится в газообразной фазе) и обеспечивает хорошие пусковые свойства и лучшую полноту сгорания.

1.2. Диагностика двигателя при помощи анализатора герметичности цилиндров (АГЦ).

Одним из самых интересных методов безразборной диагностики является метод, основанный на анализаторе герметичности цилиндров при помощи прибора АГЦ-2.

Принцип данного метода заключается в проведении измерения полного вакуума в цилиндре (P1) и величину остаточного вакуума (P2) с помощью

указанного выше прибора АГЦ-2. Измерения производятся без разборки двигателя через свечные или форсуночные отверстия во время работы двигателя на пусковом режиме [4]. Устройство прибора АГЦ-2 показано на рис. 1.2

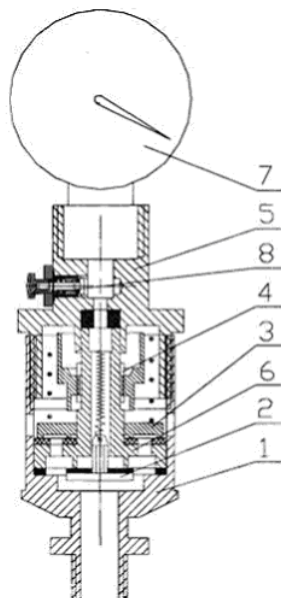


Рис 1.2. Прибор АГЦ-2. 1-нижняя часть корпуса; 2- запорный элемент; 3-подвижный элемент; 4-стопорная гайка; 5-верхняя часть корпуса; 6-корпус запорного элемента; 7-манометр разрежения; 8-стабилизирующий запорный элемент. [135]

Для нахождения полного вакуума (P_1) ДВС вращается от постороннего источника, например, стартера, проводятся замеры вакуума через свечное отверстие в цилиндре двигателя на такте расширения с помощью запорного элемента 2 (до этого надпоршневое пространство продувается на такте сжатия через стабилизирующий запорный элемент 8), что позволяет определить износ цилиндропоршневой группы, а также качество прилегания клапанов к их седлам. Однако этот параметр не позволяет оценить состояние поршневых колец, так как наличие масла сохраняет достаточно высокий вакуум в надпоршневом пространстве, что в свою очередь снижает достоверность измерений. Насколько сильно изношены поршневые кольца позволяет определить вторая величина:

остаточный вакуум (P2) - разрежение в конце такта расширения (остаточный вакуум) пропорционально утечке воздуха через кольца.

Полный вакуум (P1) (рис. 1.3) определяется установкой прибора в форсуночное отверстие (или отверстие свечи зажигания для двигателей с искровым зажиганием) и работой двигателя на пусковом режиме.

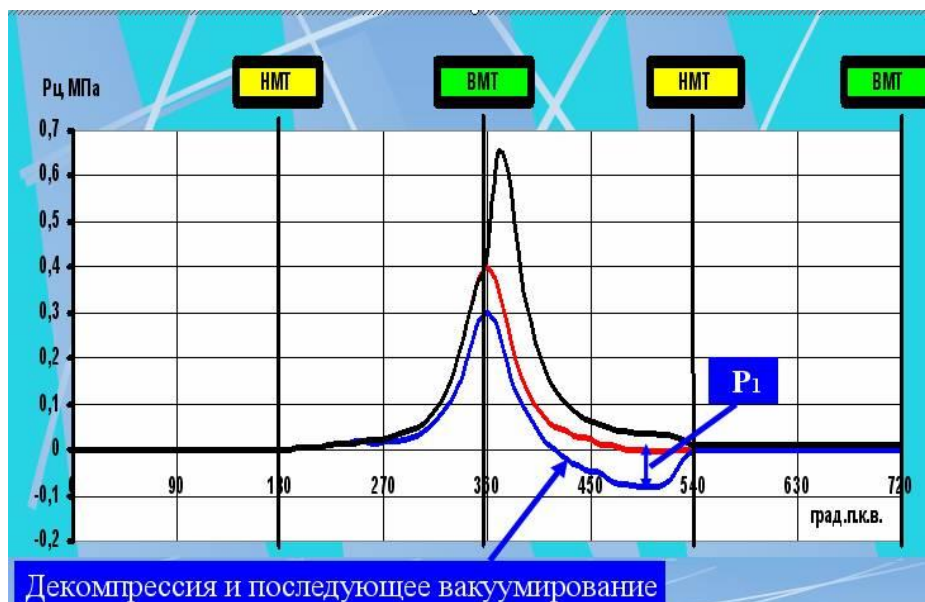


Рис. 1.3 Определение полного вакуума P1. [135]

Принцип измерения полного вакуума прибором АГЦ-2 показан на рис. 1.4. На такте сжатия воздух из цилиндра уходит в атмосферу, а на такте расширения воздух через вакуумный клапан поступает в цилиндр и прибор регистрирует значение полного вакуума.

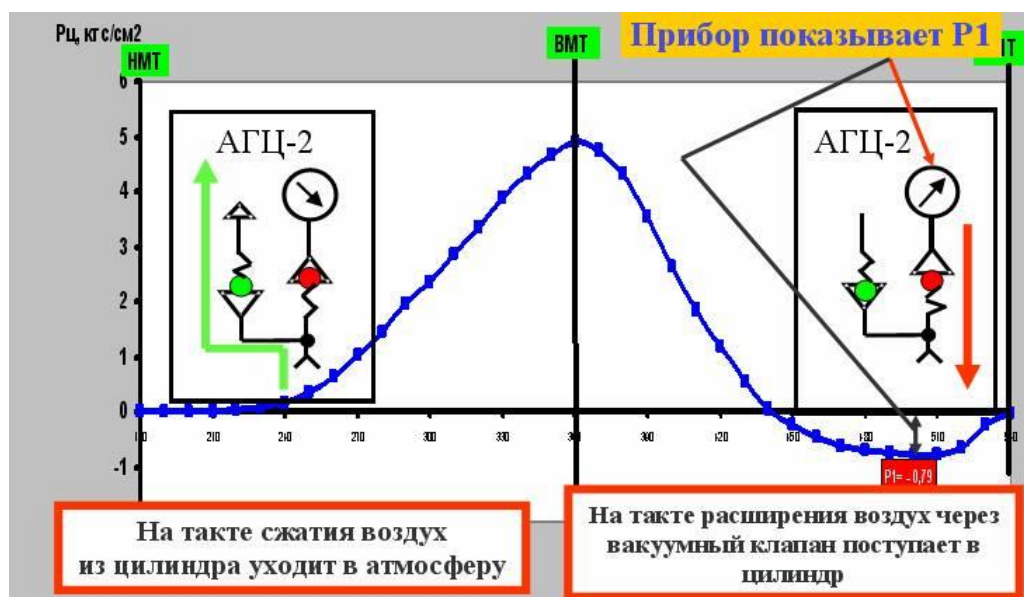


Рис. 1.4. Принцип измерения полного вакуума P1. [135]

Для оценки состояния поршневых колец необходимо измерить значение остаточного вакуума P2. Остаточный вакуум P2 определяется установкой прибора в свечное или форсуночное отверстие и работой двигателя на пусковом режиме (рис. 1.5).

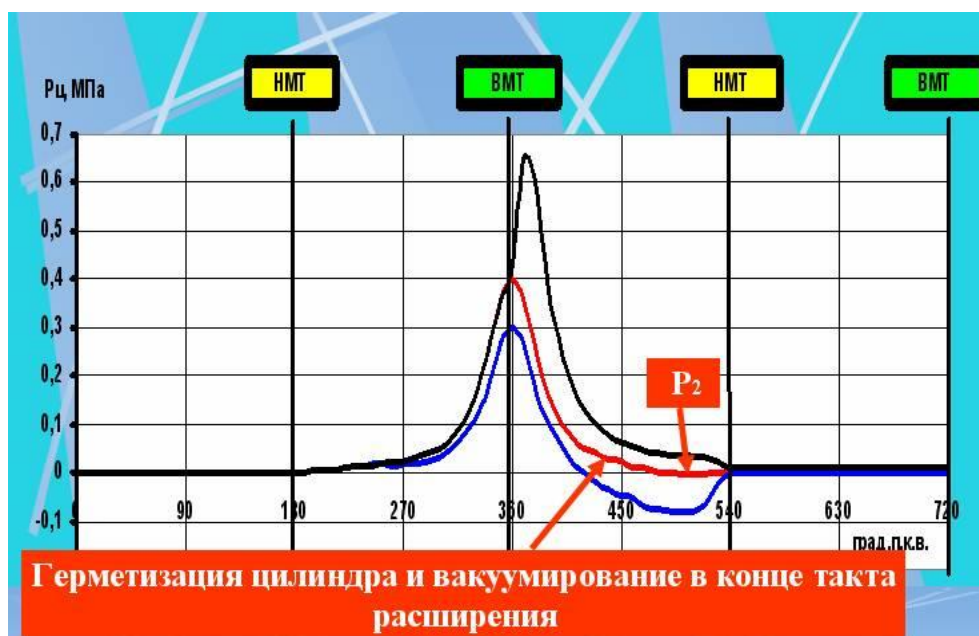


Рис. 1.5. Измерение остаточного вакуума P2. [135]

Принцип работы прибора при измерении остаточного вакуума P2 показан на рис. 1.6. В конце такта расширения через вакуумный клапан воздух подается в цилиндр и производится замер остаточного вакуума.

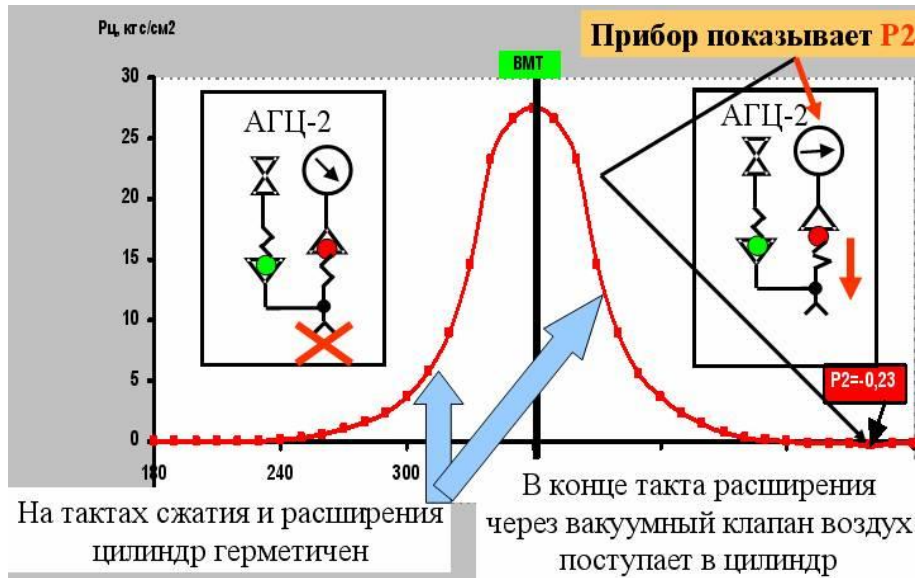


Рис. 1.6. Принцип измерения остаточного вакуума P2 [135]

Также к прибору прилагается таблица расшифровки значений, полученных при испытаниях (рис. 1.7).

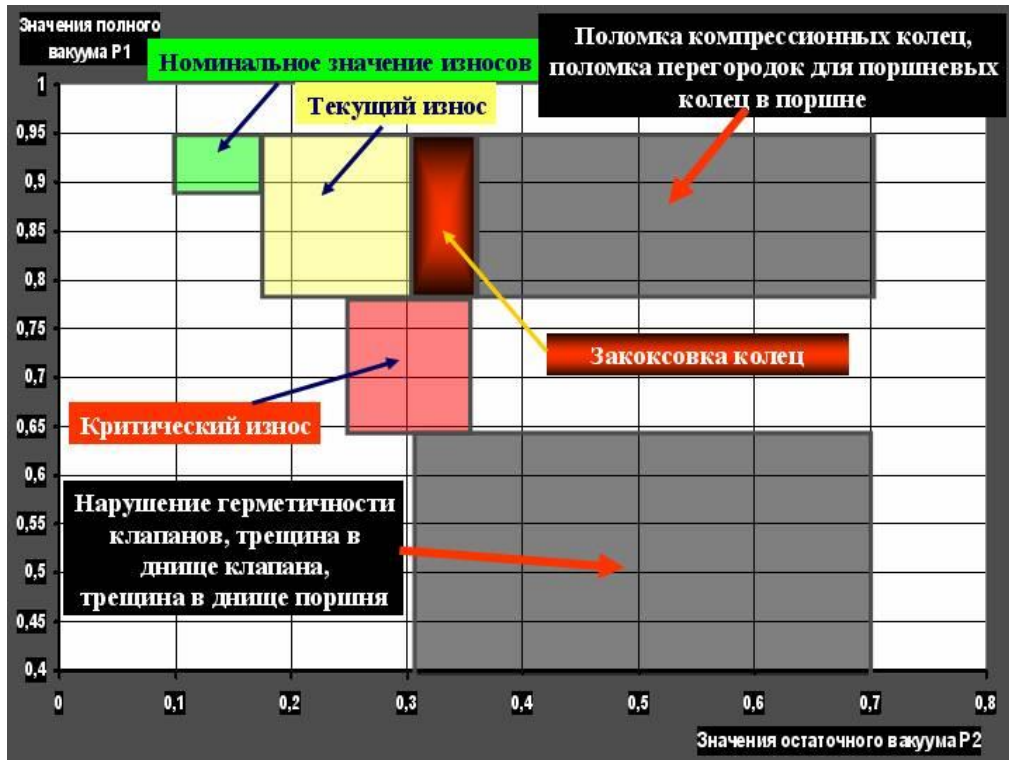


Рис. 1.7. Таблица расшифровки значений для дизельного ДВС. [135]

1.3 Метод диагностирования ДВС с помощью технических эндоскопов (визуально-оптический метод контроля)

Основной идеей визуально-оптического метода является возможность контроля через штатные отверстия (свечные или форсуночные) состояния камеры сгорания с помощью технического эндоскопа, и последующим анализе полученного изображения. Такой метод не получил широкого распространения среди малолитражных двигателей внутреннего сгорания, однако нашел себя в анализе состояния тепловозных ДВС.

Кроме того, благодаря эндоскопам определяется техническое состояние цилиндропоршневой группы двигателей, турбокомпрессоров, распределительных (раздаточных) редукторов, коллекторов, редукторов привода вспомогательных и других агрегатов, доступ к которым ограничен.

Чаще всего используются опто-волоконные эндоскопы с диаметром рабочей части жгута равным 4 мм. Результаты контроля регистрируются на цифровую фото-видеокамеру или непосредственно на персональный компьютер.

Наиболее ответственный узел двигателя – это его камера сгорания, образуемая цилиндром и поршнем, а также головкой блока цилиндров с впускными и выпускными клапанами. Этот узел в процессе работы двигателя подвергается механическим и температурным нагрузкам при воспламенении топливно-воздушной смеси. Результатом воздействия таких нагрузок является возникновение усталостных трещин, следов повышенного износа и чрезмерных отложений продуктов сгорания топлива (закоксованность), а также другие дефекты. Таким образом, возникает необходимость периодического контроля технического состояния деталей камеры сгорания.

При диагностировании визуальным-оптическим методом поршень контролируемого цилиндра устанавливается в положении нижней мертвой точки (НМТ) и через свечное или форсуночное отверстие вводится эндоскоп. Затем оценивается состояние внутренней поверхности цилиндра, головки поршня, состояние тарелок клапанов, а также доступные седла открытых клапанов. При таком методе диагностики требуется тщательный осмотр, хорошие знания конструкции, способность различать цвета поверхностей деталей для определения наличия дефектов [5].

Например, контроль цилиндра дизельного двигателя К6S310DR тепловоза ЧМЭЗ проводится следующим образом. Сперва проверяется работоспособности диагностической аппаратуры и демонтируют форсунку диагностируемого цилиндра. Рабочая часть эндоскопа через форсуночное отверстие вводится в камеру сгорания. Далее проводится круговой осмотр, необходимый для настройки требуемой освещенности и четкости изображения с помощью цифровых средств. Затем поворотную часть жгута органами управления изгибают на угол 90 градусов и опускают до головки поршня. Далее производится контроль поверхности головки поршня и гильзы цилиндра, изменяя кратность увеличения получаемого

изображения, переходя к контролю поверхностей головки блока и клапанов. Последнее контролируют поочередно, изменяя увеличение изображения и угол поля зрения. [5]

Помимо камеры сгорания эндоскопом возможно контролировать и другие труднодоступные детали и узлы двигателей, а именно картер, состояние шатунов и коленчатого вала по косвенным признакам отклонения от нормальной работы (наличия частиц металла, следов перегрева и пр.), а также нижней части поршня.

При диагностировании состояния двигателя технические эндоскопы зарекомендовали себя с лучшей стороны. Они отлично дополняют существующие диагностические приборы и расширяют возможности ремонтного производства. Однако этот метод достаточно сложен в использовании и требует специальной подготовки персонала мастерской. Обслуживающий персонал должен не только хорошо знать и понимать принцип работы дизельного двигателя, но и иметь опыт в работе с эндоскопом, в особенности при анализе изображения, полученного с помощью эндоскопа.

1.4 Диагностика двигателей по шумам и вибрациям

Методы виброакустической диагностики является оперативным безразборным методом определения состояния как агрегатов в целом, так и отдельных их частей [6]. Эти методы могут диагностировать начало развития неисправности, что позволяет провести анализ дальнейшего возникновения аварийной ситуации, а также спланировать время и необходимое количество работ по ремонту.

Динамика движения газов в ДВС, например, впуск свежего заряда, сгорание топливо-воздушной смеси, выпуск отработавших газов, а также удары сопрягающихся элементов конструкции в виду наличия определенных зазоров между ними или возникновение трения вследствие износа, а кроме того

неуравновешенность движущихся масс могут являться источником акустических колебаний (шумов и вибраций) в широком диапазоне частот. В виду того, что во время работы ДВС частоты накладываются друг на друга, кроме того и от других вспомогательных агрегатов, то необходимо проводить фильтрацию полученных данных, таким образом избавляясь от «помех». Подбор таких фильтров является достаточно трудоемким процессом и требует от исследователя достаточно глубоких знаний для окончательной расшифровки полученной информации [7].

Любой шум и вибрация являются колебательным процессом, распространяющимся в средах как волна (носит волновой характер). Таким образом, колебания могут улавливаться с помощью микрофонов либо с помощью пьезоэлектрических датчиков, определяющих ускорение среды. В некоторых случаях требуется дополнительная обработка сигнала в виде усиления, хотя современные осциллографы имеют встроенные усилители и достаточно чувствительны, чтобы уловить малейшие изменения напряжения.

Самым распространенным на станциях технического обслуживания прибором ввиду его простоты и невысокой стоимости является стетоскоп, воспринимающий вибрации стержнем и диафрагмой.

Для того, чтобы избежать искажений регистрируемых колебаний от двигателя в результате воздействий внешней среды, датчики устанавливаются на корпус исследуемого элемента конструкции, что позволяет снизить влияние посторонних факторов и повысить достоверность полученных результатов.

Анализ колебательного спектра позволяет разграничить колебания, от газодинамических процессов, колебания от трения и колебания ввиду повышенного зазора в сопряженных деталях, так как они отличаются по своим характеристикам (частоте, амплитуде, фазе и т.д.). Кроме того, интенсивность колебаний может изменяться в зависимости от режимов работы ДВС, что в некоторых случаях также позволяет использовать эти особенности для повышения достоверности результатов.

Наиболее исследуемой методикой виброакустической диагностики является сравнение полученного сигнала от источника с эталонным, при этом эталонный и определяемый получены на одинаковом нагрузочном и скоростном режиме работы ДВС. За уровень сравнения выбирается наибольшее или среднее значение колебательного процесса в исследуемом диапазоне. Современное усовершенствование этой методики заключается в использовании нейронных сетей, позволяющих исследовать изменения колебаний экспериментально, а также путем внесения неисправностей.

Повышение достоверности результатов диагностических мероприятий для сложного объекта возможно только при условии снижения влияния человеческого фактора, то есть путем повышения автоматизации процессов определения текущего технического состояния, обеспечивает выполнение следующих действий:

- многоканальный сбор виброакустической информации;
- экспресс-обработку информации с помощью быстродействующих спецпроцессов и ПК;
- формирование диагностических показателей, определяющих исправное и неисправное состояний;
- хранение в долговременной памяти эталонных значений;
- сравнение информации, поступающей в реальном времени с предысторией и с эталонами сохраненных значений для различных состояний;
- интерполяцию и экстраполяцию состояния объекта в признаковом пространстве;
- возможность сигнализировать о возможном возникновении неисправности, а также при приближении к предельно допустимым состояниям;
- управление оборудованием;
- преобразование диагностической и управляющей информации в удобочитаемый формат (например, в графическом виде на дисплее ПК);

-техническое документирование информации о текущем состоянии и прогнозе на будущее.

1.5 Диагностика двигателя по анализу пробы масла

Диагностирование двигателя по параметрам картерного масла позволяет определить скорость, с которой изнашиваются детали двигателя, качество работы систем фильтрации, герметичность масляной системы от других систем двигателя, например, от системы охлаждения или топливоподдачи, а также качество самого масла. Как правило, пробы масла отбираются через щуп уровня масла в необходимом количестве с целью определения в нем количества продуктов износа деталей двигателя, то есть определенных металлов, а также наличие топлива и воды в пробе масла и самой вязкости масла, на которую также влияют остаточная концентрация присадок. Таким образом, определив количественные значения указанных параметров и сопоставив их с определенными нормами, можно установить неисправную работу в сопряжениях деталей, а также неисправность систем фильтрации, неисправность уплотнений и необходимость замены масла на свежее.

Наличие большого количества продуктов износа (металлов) в пробе масла таких как Cr, Fe, Al, Pb и др. характеризует повышенный износ деталей двигателя, имеющих в своем составе указанные металлы, например, поршневые кольца, гильзы цилиндров, подшипники скольжения и качения и т.д. По количеству металлов в пробе возможно локализовать и предотвратить возможные отказы.

Спектральный анализ пробы масла позволяет наиболее полно определить количественный и качественный анализ элементного состава, содержащихся веществ в пробе [8, 123]. Качественный анализ позволяет определить присутствие металлов от изнашивающихся частей двигателя, а количественный определяет интенсивность изнашивания. Главным недостатком такой методики является

необходимость использования дорого лабораторного оборудования, что как правило не позволяет провести такого рода диагностику на месте.

Таким образом, зная темп изнашивания деталей двигателя, возможно заранее выявить отказ какой-либо системы, а также спрогнозировать ресурс работы двигателя.

1.6 Диагностирование двигателя при помощи считывания данных с бортового компьютера и неравномерности вращения коленчатого вала

Все современные автомобили оснащены электронным блоком управления (ЭБУ), который накапливает и сохраняет данные с датчиков во время эксплуатации в специальную область памяти. При появлении неисправности ЭБУ сохраняет показания со всех датчиков, что позволяет определить состояние двигателя в момент возникновения неисправности. Считывание информации, сохраненной в памяти ЭБУ, происходит при помощи подключения к диагностическому разъему специального диагностического устройства (сканера или ПК). Главным недостатком метода является низкая информативность, так как в основном проверяется состояния электрической цепей и датчиков [9].

Однако представляется, что некоторые данные, получаемые с датчиков могут быть использованы при проведении диагностических мероприятий, например, показания датчика вращения коленчатого вала. Попытки использования параметра отклонение мгновенной скорости вращения коленчатого вала поршневого ДВС от среднего его значения с целью диагностирования ДВС предпринимались различными исследователями [19, 20, 21, 22, 24]. Например, в работе [19] рассматривается методика анализа состояния двигателя по сигналам от датчика положения коленчатого вала и сигнала о моменте искрообразования в 1-м цилиндре с помощью программного обеспечения «USB Autoscope III» и специального алгоритма «CSS». Такая система позволяет определить техническое

состояние свечей зажигания, катушек зажигания, оценить состояние форсунок впрыска топлива, а также заменить такие приборы как компрессометр, стробоскоп для определения угла опережения зажигания, а также многое другое. А именно, с помощью указанного метода можно оценить статическую и динамическую компрессию для каждого из цилиндров, выявить неисправности в системе зажигания, оценить состояние топливных форсунок, получить характеристику подсистемы опережения зажигания, выявить биение задающего зубчатого диска, выявить пропущенные и согнутые зубья задающего зубчатого диска и т.д. Главным преимуществом такого метода является минимизация количества информации, запрашиваемой для анализа. Однако достигнуть высокой точности измерений невозможно, так, например, из-за ненадежного контакта в разъеме сигнал от датчика частоты вращения коленчатого вала будет искажен. На X-й Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей» [20], были рассмотрены методические предпосылки диагностирования дизеля по изменению мгновенной угловой скорости вращения коленчатого вала на режимах холостого хода и аппаратная реализация экспериментальных исследований, на двигателях Ярославского моторного завода (ЯМЗ), с целью обоснования комплекса диагностических параметров, их нормативных значений, алгоритма и технологии диагностирования. Преимуществом такого метода, видится простота съема показаний с двигателя, однако во многом, это преимущество является кажущимся. Эта методика позволяет диагностировать только пропуск воспламенения и неисправный цилиндр, что зачастую, при небольшом количестве цилиндров (≤ 6), может быть определено «на слух». Кроме того, возможность определения неисправности цилиндра по неравномерности вращения коленчатого вала была доказана экспериментально исследователями из Гдынского морского университета в Польше [21]. В патенте [22] рассматривается способ измерения неравномерности вращения коленчатого вала ДВС. Согласно данному способу, первичную обработку информации по измерению неравномерности вращения производят

путем сравнения информации за один временной интервал прохождения соседних маркировочных элементов с информацией за последующий временной интервал вычитанием второго значения из первого. С помощью этого способа возможно уменьшить угловой интервал измерения мгновенной угловой скорости до 1° поворота коленчатого вала, однако использование интерполяции не повышает точности регистрации, и получаемой информации возможно будет недостаточно для диагностирования причин отклонений в работе двигателя. Также по измеренной мгновенной скорости коленчатого вала можно оценить основные параметры процесса сгорания, как это было представлено на Мировом Конгрессе и Выставке SAE 2013 [23]. Так, например, использование альтернативных видов топлива в современных дизелях требует для достижения наивысшего КПД и минимизации выбросов вредных веществ, оперативного контроля процесса сгорания при работе на топливах, отличающихся физическими и химическими свойствами от стандартного дизельного топлива. Угол задержки воспламенения и максимальное давление в цилиндре позволяют оптимизировать параметры впрыска топлива в цилиндр при работе на различных альтернативных видах топлива. Использование для таких целей мгновенной скорости вращения коленчатого вала является привлекательным, поскольку параметр скорости уже заложен в электронный блок управления. Основываясь на моделях динамики трансмиссии, а также используя изменения мгновенной угловой скорости коленчатого вала, возможно оценить основные параметры процесса сгорания для одноцилиндровых и четырехцилиндровых дизельных двигателей. Однако эти способы не позволяют диагностировать состояние узлов двигателя, а лишь позволяют скорректировать момент подачи топлива в цилиндр.

В работе [24] рассматривается диагностирование мощных двадцатицилиндровых дизелей по неравномерности вращения коленчатого вала с использованием нейронных сетей. Датчик угловой скорости крепится к свободному концу коленчатого вала. По показаниям этого датчика моделируется динамика коленчатого вала. Так как двигатель имеет большое количество

цилиндров, существует вероятность скручивания коленчатого вала. Однако этот двигатель работает в диапазоне низких частот вращения, что исключает необходимость учитывать гибкость коленчатого вала. Нейронные сети используются при обработке сигналов, поступающих от датчика угловой скорости при нормальных условиях и при условии наличия неисправности. С помощью методики, описанной в работе [24], удалось диагностировать утечки топлива, обнаружить и локализовать неисправный цилиндр, а также приблизительно оценить степень неисправности цилиндра. Достоинством этого метода является использование искусственного интеллекта, но это в то же время является и недостатком, так как параметры вращения коленчатого вала снимаются на полностью исправном двигателе. Главным недостатком использования нейронных сетей является трудоемкость её обучения и отладки. Для обучения нейронной сети необходим большой объем первоначальных данных, а их применение или использование на каком-либо двигателе без предварительного обучения и отладки, связанных с определенной моделью двигателя, возможно только в случае использования нейронных сетей, настроенных на работу с различными двигателями. Однако в этом случае эффективность и точность прогнозирования может значительно снижаться. Также на основе нейронных сетей известны самообучающиеся системы по управлению и диагностированию ДВС. [112-114].

1.7 Диагностирование ДВС по анализу отработавших газов

Диагностирование двигателя по анализу отработавших газов является вспомогательным средством диагностирования, вследствие разнообразия возможных неисправностей, что делает сложным их выявление по газовому анализу. Поэтому диагностирование по анализу отработавших газов целесообразно использовать как обобщенный диагностический параметр.

Для анализа отработавших газов применяется прибор газоанализатор, определить состав газов, а также долю каждого газа в пробе. По принципу действия различают следующие газоанализаторы:

- термохимические;
- термокондуктометрические;
- электрохимические;
- магнитные;
- оптические.

На сегодняшний день большое количество применяемых газоанализаторов в промышленности являются одноканальными приборами, с помощью которых возможно измерить только один компонент. В отличие от промышленных приборов, газоанализаторы, применяемые при диагностировании двигателей внутреннего сгорания, определяют концентрацию 4-х компонентов отработавших газов: угарный газ (CO), оксид азота (NO_x), углеводороды (CH) и диоксида углерода (CO₂). Применяемые на сегодняшний день газоанализаторы можно разделить на две группы – устаревшие газоанализаторы и современные газоанализаторы.

К устаревшим газоанализаторам относятся морально устаревшие газоанализаторы, которые уже сняты с производства, но до недавнего времени ими оснащались станции технического обслуживания и посты экологического контроля. Главной и иногда единственной функцией таких газоанализаторов является определение концентрации выбросов угарного газа (CO). Главным недостатком таких приборов является низкая достоверность результатов измерения в силу того, что показания таких приборов сильно зависят от погодных условий (температура окружающей среды, барометрическое давление, влажность воздуха). Для компенсации таких влияний результаты измерений корректируют с помощью поправочных коэффициентов. Полученные итоговые результаты сравниваются с утвержденными значениями ГОСТ 31967-2012. Однако еще существуют дополнительные погрешности, связанные с погрешностями дополнительных

измерительных приборов (термометра, барометра, гигрометра). Погрешности дополнительных приборов суммируются и существенно уменьшают достоверность результатов замера.

В настоящее время используются приборы, основанные на принципе поглощения отработавшими газами инфракрасного излучения, при этом каждый тип газа имеет свой строго определенный диапазон длин волн, который он может поглощать. Необходимый спектр излучения получается с использованием узкополосных интерференционных оптических фильтров. Как правило, используются три спектральных канала, позволяющих определять концентрацию угарного газа, несгоревших углеводородов, а третий канал используется для сравнения происходящих изменений в системе. Несмотря на небольшую стоимость прибора, он позволяет добиться высокой точности измерений. Эти факторы позволяют использовать подобные приборы как для серийного производства двигателей, так и для использования их на станциях технического обслуживания.

С начала 70-х годов газоанализаторы начали активно применяться для контроля выбросов вредных веществ автотранспортом, что потребовало усовершенствование газоанализаторов для определения двух компонентов.

Дальнейшее усовершенствование прибора определялось постоянно ужесточавшимся контролем токсичности. Далее появились трехкомпонентные газоанализаторы, позволяющие измерять концентрацию двуокиси углерода CO_2 . Информация о количестве этого газа позволяет косвенно судить о полноте сгорания топлива [10, 11, 12, 13, 14].

Двухкомпонентные газоанализаторы при диагностике современных ДВС, оборудованных катализатором, имеют ограниченное применение. Некоторое время модели автомобилей снабжались специальным патрубком для отбора проб газов до катализатора, для использования двухкомпонентных приборов анализа. С появлением четырех- и пятикомпонентных газоанализаторов необходимость в этом отпала. Современные приборы рассчитаны на непрерывную работу в течении нескольких лет, что характеризует их высокую надежность. Кроме того, новейшие

приборы имеют множество дополнительных функций, таких как определение частоты вращения коленчатого вала двигателя, температуру масла, а также сохранение результатов замеров и передача их на персональный компьютер.

1.8 Техническая диагностика методом индицирования

По давлению газов в цилиндрах двигателя возможно определить как отклонения конструктивных, так и режимных параметров ДВС, что позволяет достаточно полно анализировать техническое состояние двигателя [91].

Все разнообразие методов индицирования можно разделить на две большие группы: прямое индицирование и косвенное индицирование. Ввиду невозможности использования датчика давления для прямого индицирования в некоторых современных двигателях (например, дизельные двигатели могут не иметь отверстий для свечей накала), необходимо применение косвенных методик по индицированию ДВС.

Наиболее известными фирмами, производящими датчики для прямого индицирования, являются американская фирма «Optrand» и австрийская фирма «AVL» (рис. 1.8). Для ДВС с принудительным воспламенением датчик давления совмещен со свечой зажигания «AVL» DPM-800 и предназначен для измерения давления с высокой точностью без нарушения или какого-то влияния со стороны датчика на процессы сгорания в цилиндре. Такая свеча имеет резьбу M10, M12, различную длину, а также 3, 5 и 7 различных тепловых диапазонов.



Рис. 1.8 Свеча зажигания с пьезодатчиком фирмы AVL. [15]

Встроенный в чувствительной части датчика пьезокристалл, а именно GaPO_4 (фосфат галия) позволяет с высокой точностью определять давление. Такой датчик может быть полезен не только при конструировании двигателей внутреннего сгорания, но и при чип-тюнинге и диагностике в ремонтных мастерских.

Главной целью разработки датчика фирмой «AVL» было достичь максимально длительный срок службы в условиях диагностики. Платиновые электроды являются компонентами свечей зажигания, которые имеют достаточную прочность для того, чтобы выдерживать температурные нагрузки в течение длительного времени [15, 16]. При проведении цикла испытания по 30 000 км свеча зажигания с пьезодатчиком не давала сбоев в работе, что характеризует высокое качество и надежность этих датчиков. Также благодаря модульной структуре конечный пользователь может при необходимости заменить любой компонент свечи-датчика.

Метод прямого индицирования является самым точным по определению давления в цилиндрах двигателя. Однако, как было сказано выше, не всегда есть возможность установить такое устройство с датчиком давления особенно в современный дизельный двигатель с непосредственным впрыском топлива. Кроме того, использование благородных металлов делает стоимость такого датчика очень высокой.

К наиболее распространённым методам косвенного индицирования относятся:

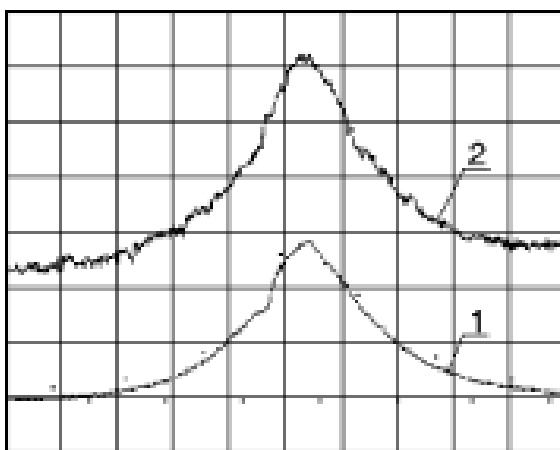
1. Давление в цилиндре определяется за счет обработки данных, полученных с тензометрических датчиков, устанавливаемых на уплотнительную прокладку газового стыка;
2. Давление в цилиндре определяется за счет обработки данных, полученных с вибрационных датчиков, заключающейся в сопоставлении давления в цилиндре и вибрации стенок цилиндра;

3. Давление в цилиндре определяется за счет использования данных по ускорению коленчатого вала двигателя.

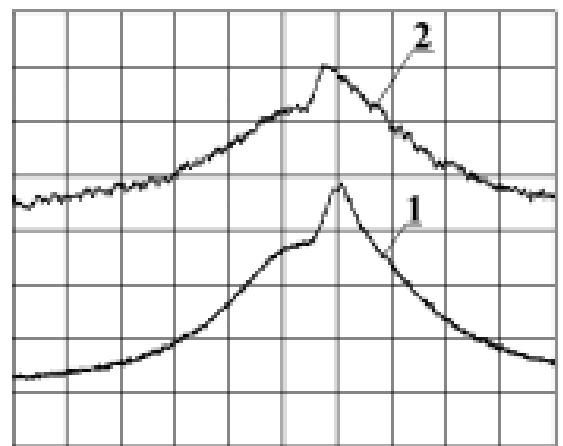
Так, фирма «Optrand» нашла и запатентовала способ определения давления и технического состояния ДВС, а также разработала и производит тензометрические датчики, устанавливаемые с инжектором, свечой зажигания или свечой накаливания. Подобные датчики состоят из тензорезистора, который взаимодействует со средой, оказывающей на него давление, соединительного проводника и оптически-электронного модуля.

Также давление в камере сгорания передается и на болты крепления головки блока цилиндров к блоку, что показывает анализ сил, действующих в остове двигателя. Сущность способа заключается в установке по головку болта или под гайку крепления головки тензометрических резисторов. Выходной сигнал тензорезистора поступает на усилитель и далее на аналого-цифровой преобразователь (АЦП) и обрабатывается компьютером [15, 16, 17].

Достаточно высокую достоверность такой методики показали исследователи из лаборатории ДВС МГТУ им. Баумана. Ими на базе двигателя 6ЧН12/14 была создана экспериментальная установка для проведения прямого и косвенного индицирования. Полученные показания представлены на рис. 1.9 [18]



а) 3Ч17,5/24



б) 6ЧН12/14

Рис.1.9. Индикаторные диаграммы, полученные прямым (1) и косвенным (2) методами [17]

Проведенные испытания показали, что среднее индикаторное давление косвенного метода несколько занижено в сравнении с давлением прямого метода, однако не превышает 5%, что является очень хорошим показателем. Значение среднего индикаторного давления p_i оказалось практически равным среднему индикаторному давлению, полученному при обработке индикаторных диаграмм, снятых с помощью прибора МАИ-2А. Это позволяет утверждать, что среднее индикаторное давление, полученное предлагаемым методом, находится ближе к действительному.

Кроме того, и результаты измерений, определяющие жесткость работы двигателя ($\partial P / \partial \varphi$), степень повышения давления $\lambda = P_z / P_c$ и максимальное давление сгорания P_z , при замерах косвенным методом также занижены в сравнении с прямым индицированием и также не превышают 5%. Также этот метод оказался наиболее предпочтительным для определения моментов самовоспламенения топлива и моментов достижения максимального давления сгорания относительно ВМТ, ввиду своей высокой точности. Так как система блок-крышка-шпилька является максимально жесткой, то изменение давления в цилиндре мгновенно воспринимается датчиком. Метод прямого индицирования дает задержку примерно на 1 градус ПКВ, что связано с дросселированием в индикаторном канале.

Проведенные исследования на двигателях доказывают, что такой метод косвенного индицирования в настоящее время является достаточно точным, а по некоторым показателям и превосходящим методы прямого индицирования, что позволяет рекомендовать его для использования в системах централизованного контроля и диагностики, при проведении технического обслуживания и регулирования ДВС. Главными достоинствами представленного метода являются:

-возможность использования при диагностировании как дизельных двигателей, так и с принудительным воспламенением;

-простота реализации, т.е. метод не требует серьезных конструктивных переделок в двигателе;

-большой ресурс датчиков, что позволяет проводить мониторинг двигателей.

1.9 Преимущества и недостатки методов диагностирования

Описанные выше методы диагностирования двигателей имеют ряд преимуществ и недостатков, которые будут рассмотрены далее.

Так, например, определение компрессии в цилиндрах является одним из наиболее доступных методов диагностирования технического состояния ДВС обладает следующими преимуществами:

- низкая стоимость оборудования;
- не требует высокой квалификации диагноста.

К недостаткам можно отнести:

- низкая информативность метода;
- требует остановки двигателя;
- требуется частичная разборка.

Анализатор герметичности цилиндров (АГЦ) обладает следующими преимуществами:

- позволяет косвенно оценить износ гильзы цилиндра и плотность прилегания клапана к седлу;
- низкие трудозатраты на проведение диагностических мероприятий.

При этом АГЦ обладает следующими недостатками:

- низкая достоверность измерений вследствие наличия масляной пленки на гильзе цилиндра и кольцах;
- требует остановки двигателя;

- требуется частичная разборка.

Визуально-оптический метод контроля также получил широкое распространение и зарекомендовал себя лучшим образом. С помощью эндоскопа, особенно имеющим видеокамеру высокой четкости (HD), возможно исследовать не только камеру сгорания двигателя, но и другие труднодоступные детали и узлы по косвенным признакам. В настоящее время подобные эндоскопы имеют относительно небольшую стоимость. Главным недостатком такого метода является требование высокой подготовки диагноста не только для обращения с эндоскопом, но и для анализа изображения, полученного с помощью этого эндоскопа. Кроме того, подобная методика требует остановки двигателя, а также частичной разборки исследуемых элементов.

Диагностирование ДВС по шумам и вибрациям является достаточно сложным в реализации методом вследствие искажения исходящих от двигателя шумов из-за влияния внешней среды. Таким образом, виброакустические датчики необходимо устанавливать вблизи источника шума, а также необходимо для каждого типа двигателей иметь эталонную характеристику по шуму для сопоставления. Однако методика имеет ряд преимуществ, заключающихся в возможности проведения диагностических мероприятий без остановки двигателя, обрабатывать информацию в режиме реального времени с возможностью прогнозирования выхода из строя того или иного узла.

По анализу пробы масла возможно определить повышенный износ в трущихся деталях по наличию частиц металлов в пробах масла. Такой метод является малоинформативным, а также чаще всего требует проведения лабораторных исследований проб масла, что не позволяет автоматизировать процесс диагностирования.

Анализ отработавших газов требует наличия специального дорогостоящего оборудования, которое позволяет определить несовершенство процессов сгорания в двигателе и может применяться в комплексе с другими методами диагностирования.

Индицирование ДВС может заменить собой методику измерения компрессии, так как при установке датчика давления может быть определено давление в цилиндре в течение цикла. К основным преимуществам индицирования относятся:

- универсальность, позволяющая проводить диагностику как дизельного, так и бензинового ДВС;
- простота реализации, т.е. метод не требует серьезных конструктивных переделок в двигателе;
- большой ресурс датчиков.

К недостаткам относятся:

- высокая стоимость датчиков давления за счет использования в них благородных металлов;
- не во всех двигателях есть возможность установки датчика давления;
- косвенные методы индицирования требуют проведения дополнительных расчетов, что отрицательно влияет на достоверность полученных результатов.

Считывание данных с бортового компьютера является одним из перспективных методов диагностирования, так как электронный блок управления связан с многими датчиками и исполнительными элементами двигателя. При этом, без дополнительных алгоритмов диагностирования блок управления определяет состояние электрических цепей и датчиков, сравнивая их показания с ожидаемыми. Однако современная электроника позволяет расширять функции по диагностированию состояния ДВС электронными блоками управления, записывая исполняемый алгоритм в память ЭБУ. Так, например, алгоритмы по диагностированию ДВС на основании данных с датчика неравномерности вращения коленчатого вала могут быть записаны в блок управления. Главным преимуществом диагностирования двигателя по неравномерности вращения коленчатого вала является простота получения показаний с двигателя без выведения исследуемого двигателя из работы, а также отсутствует необходимость в разборке элементов двигателя. Однако использования различных алгоритмов, то

есть проведение дополнительных расчетов, снижает точность определения необходимых параметров, а также в некоторых случаях требуется корректировка алгоритма для каждого типа двигателя.

Таким образом, наиболее перспективным методом диагностирования видится диагностирование с помощью электронного блока управления за счет использования новых алгоритмов обработки данных с датчиков, а также повышения точности этих датчиков.

Выводы по главе 1

1. Приведены различные методы диагностирования двигателей, используемые в настоящее время при проведении мероприятий по определению неисправностей двигателей внутреннего сгорания, которые имеют свои преимущества и недостатки. Сделанный анализ методов диагностирования ДВС показал, что не все известные методы позволяют:

- проводить работы без разборки двигателя;
- контролировать изменение показателей двигателя без его вывода из эксплуатации;
- оценивать работоспособность отдельных деталей, которые не включены в систему электронного управления двигателем.

2. В настоящее время электронные системы управления двигателями позволяют не только управлять работой двигателя, но и производить диагностирование отдельных систем и их элементов, установленных на двигателях, что позволяет модернизировать известные методы диагностирования, а также задавать для ЭБУ новые алгоритмы определения неисправностей с учетом сигналов от установленных на двигателе датчиков. Это позволяет проводить диагностические мероприятия косвенными методами, не вводя отдельных систем для диагностики. Таким образом, косвенная методика диагностирования необходима для исключения установки дополнительного оборудования с учетом информации и параметров, которые поступают от датчиков присутствующих на двигателе.

3. Локализация неисправности или предсказание возможного выхода из строя двигателя в следствие ухудшения каких-либо параметров позволяет своевременно запланировать и произвести ремонт неисправного узла, что уменьшает время простоя техники. Для этого целесообразно найти методику диагностирования, которая может анализировать техническое состояние ДВС в процессе эксплуатации и не требует демонтажа двигателя или отдельных его узлов.

Задачи исследования

Целью данной работы является разработка алгоритма определения технического состояния двигателя при установившемся режиме работы по неравномерности вращения коленчатого вала.

Для достижения указанной цели требуется решение следующих задач:

1. Определить косвенные показатели и режимы для проведения диагностики ДВС косвенным методом.
2. Провести теоретическое и расчетное обоснование значимости выбранных конструктивных и режимных параметров для оценки технического состояния двигателя по косвенным показателям.
3. Расчетным экспериментом определить взаимосвязь между неравномерностью частоты вращения коленчатого вала с техническим состоянием ДВС и разработать алгоритм поиска неисправного цилиндра.
4. Создать экспериментальную установку для проведения экспериментальных исследований по проверке предложенного метода оценки технического состояния двигателя.
5. Экспериментально проверить правомерность разработанного алгоритма диагностики по результатам регистрации мгновенной частоты вращения коленчатого вала.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

2.1. Теоретическое обоснование влияния конструктивных и режимных параметров, характеризующих неисправности двигателя внутреннего сгорания, на крутящий момент двигателя

Работу любого двигателя внутреннего сгорания можно охарактеризовать по следующим параметрам: N_e – эффективная мощность, M – крутящий момент, p_k – давление наддува (для двигателей с наддувом), t – температура, α – коэффициент избытка воздуха, η_e – эффективный КПД, η_M – механический КПД, g_e – эффективный удельный расход топлива, G_m – часовой расход топлива, ω – угловая скорость коленчатого вала, $\bar{\varepsilon}_i$ – угловое ускорение коленчатого вала и др. [87, 92]

Диагностирование двигателей внутреннего сгорания по неравномерности вращения коленчатого вала следует рассматривать с кинематики КШМ. Под кинематикой кривошипно-шатунного механизма (КШМ) подразумевается описание перемещения S_{Π} , скорости W_{Π} и ускорения J_{Π} поршня в функции угла поворота коленчатого вала φ при известных значениях радиуса кривошипа R и длине шатуна L . Перемещение может быть найдено по точной формуле

$$S_{\Pi} = R \left[(1 - \cos\varphi) + \frac{L}{R} (1 - \cos\beta) \right], \quad (1)$$

$$\text{где } \beta = \arcsin \left(\frac{R}{L} \sin\varphi \right).$$

или по более удобной для расчетов, приближенной [25]

$$S_{\Pi} = R \left[(1 - \cos\varphi) + 0,25 \frac{R}{L} (1 - \cos 2\varphi) \right], \quad (2)$$

точность, которой, тем не менее, достаточно для практических задач.

На рис. 2.1 показаны силы, действующие в КШМ.

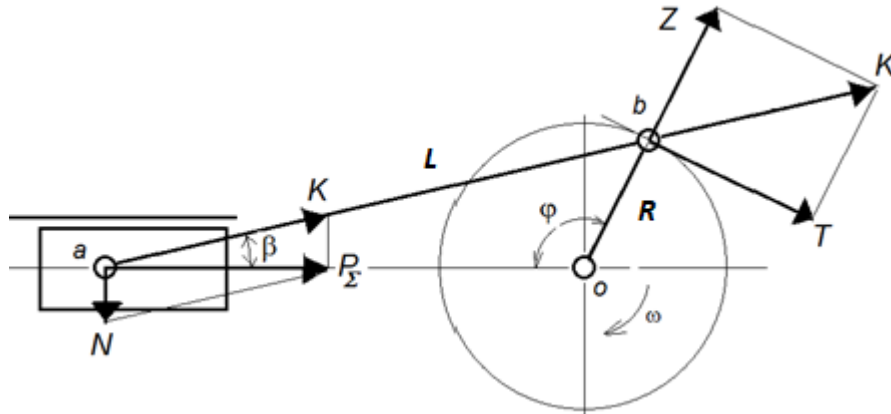


Рис. 2.1. Схема сил, действующих в деталях КШМ

Скорость и ускорение поршня при угловой скорости вращения кривошипа ω , находятся последовательным дифференцированием зависимости для перемещения

$$W_{\Pi} = \omega \cdot R \left[\sin\varphi + 0,5 \frac{R}{L} \sin 2\varphi \right], \quad (3)$$

$$J_{\Pi} = \omega^2 \cdot R \left[\cos\varphi + \frac{R}{L} \cos 2\varphi \right]. \quad (4)$$

При этом, угловая скорость вращения кривошипа ω может быть определена по зависимости [26, с. 78-79]

$$\omega = \int \frac{(T_{\Sigma} \cdot R - M_c)}{J_{\text{пр}}} dt \quad (5)$$

где $J_{\text{пр}}$ – момент сил инерции движущихся масс двигателя;

откуда

$$J_{\text{пр}} \frac{d\omega}{dt} = T_{\Sigma} \cdot R - M_c \quad (6)$$

Изображенная на рисунке 2.1 тангенциальная (перпендикулярная радиусу кривошипа) сила T определяет крутящий момент на валу двигателя $M_{кр}$. Как известно, для многоцилиндрового двигателя [27. стр. 171]

$$M_{кр} = T_{\Sigma} \cdot R \quad (7)$$

T_{Σ} зависит от многих факторов. Для оценки их влияния рассмотрим следующие зависимости для кривошипно-шатунного механизма.

Мгновенное значение тангенциальной силы T может быть определено по формуле [28, с. 581-582]

$$T = P_{\Sigma} \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \quad (8)$$

где P_{Σ} - суммарная сила, действующая на поршень,

φ – угол поворота кривошипа,

β – угол отклонения шатуна относительно оси цилиндра.

Суммарная сила $P_{\Sigma} = P_r + P_j$, действующая на поршень, складывается из силы, определяемой давлением рабочего тела

$$P_r = (p_z - p_0) F_n \quad (9)$$

где p_r – давление газов в цилиндре, действующее на поршень;

p_0 - давление, действующее на поршень со стороны картера (близкое по величине к атмосферному и может быть принято ему равным);

$F_n = \pi \cdot D_{ц}^2 / 4$ - площадь поршня;

$D_{ц}$ - диаметр цилиндра

и силы инерции деталей, движущихся возвратно-поступательно

$$P_j = -m_{пр} R \omega^2 \left(\cos\varphi + \frac{R}{L} \cos(2\varphi) \right) \quad (10)$$

где $m_{пр}$ - приведенная масса деталей (масса деталей группы поршня и часть массы деталей группы шатуна, отнесенная к оси поршневого пальца).

Таким образом, уравнение для расчета тангенциальной силы T с учетом приведенных выше факторов примет вид

$$T(\varphi) = \frac{((p_r - p_0)\pi D_{\text{ц}}^2/4 + (-m_{\text{пр}}R\omega^2(\cos\varphi + \frac{R}{L}\cos(2\varphi))))}{\cos\beta} \cdot \sin(\varphi + \beta) \quad (11)$$

Полученное уравнение (11) показывает, что характер изменения тангенциальной силы зависит от характера изменения давления в цилиндре p_r , от величины диаметра цилиндра $D_{\text{ц}}$, массы $m_{\text{пр}}$, приведенной к поршню, радиуса кривошипа R , угла поворота кривошипа φ , частоты вращения ω , длины шатуна L , от величины угла отклонения шатуна от оси цилиндра β .

Для многоцилиндрового ДВС значение суммарной тангенциальной силы определяется суммированием значения тангенциальной силы каждого цилиндра, сдвигая значения для каждого последующего цилиндра относительно значения для предыдущего цилиндра на угол поворота кривошипа между воспламенениями, и определяется по зависимости

$$\Sigma T(\varphi) = T_1(\varphi_0) + T_2(\varphi_0 + \Delta\varphi_2) + T_3(\varphi_0 + \Delta\varphi_3) + \dots + T_i(\varphi_0 + \Delta\varphi_i) \quad (12)$$

где i – число цилиндров двигателя.

На рисунках 2.2-2.4 приведены графики суммарной удельной тангенциальной силы для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей соответственно.

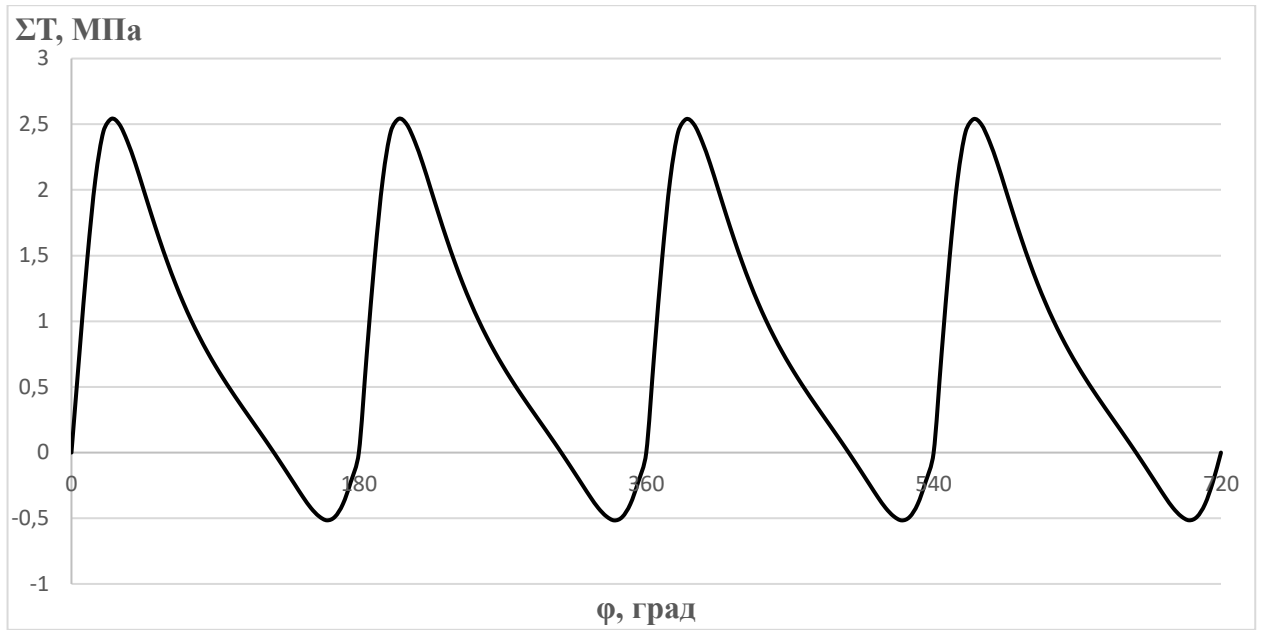


Рис. 2.2 Суммарная удельная тангенциальная сила 4-х цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала

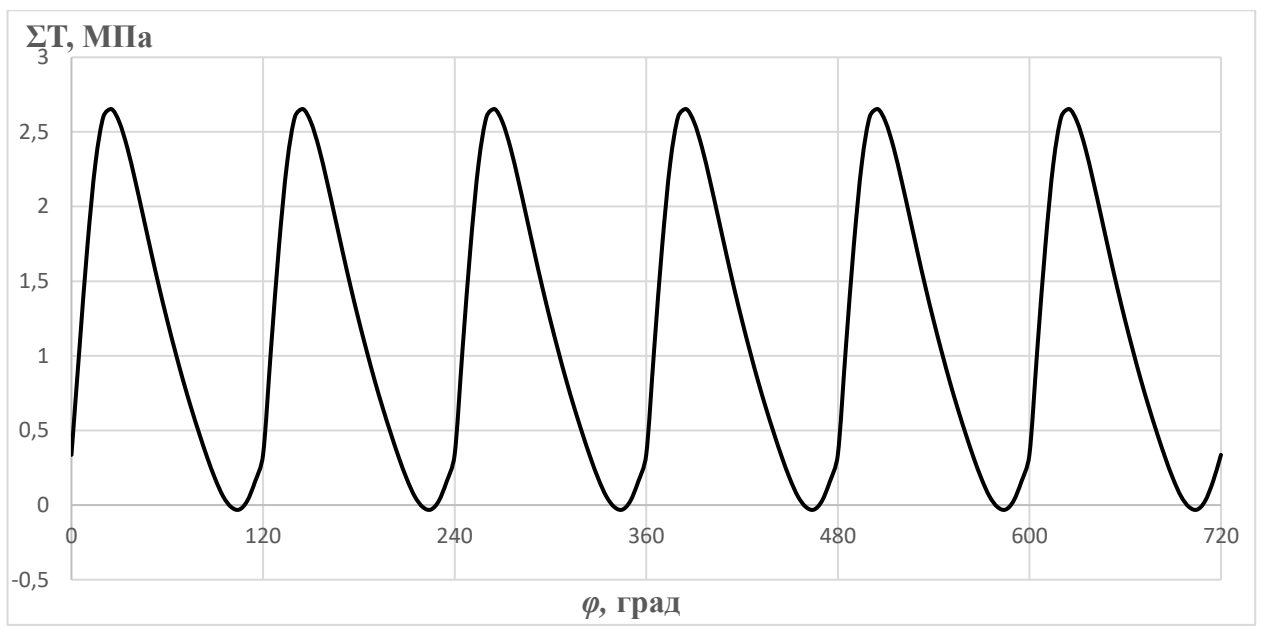


Рис. 2.3 Суммарная удельная тангенциальная сила 6-х цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала

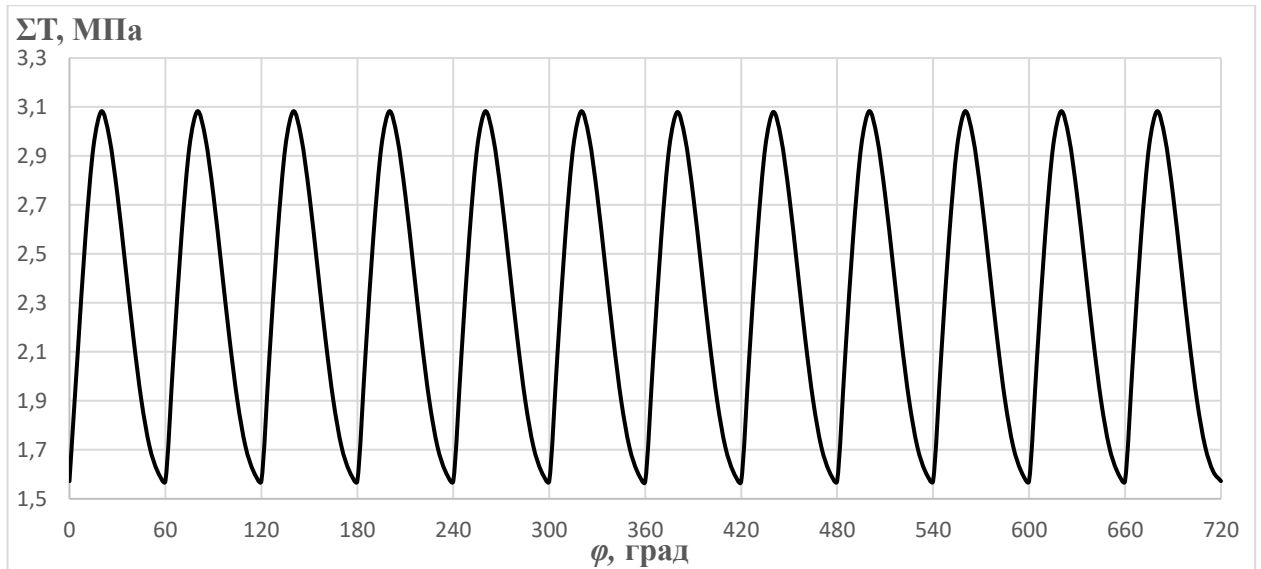


Рис. 2.4 Суммарная удельная тангенциальная сила 12-ти цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала

Как видно из уравнения (12) суммарная удельная тангенциальная сила для многоцилиндрового ДВС представляет с собой сумму удельных тангенциальных сил для каждого из цилиндров многоцилиндрового двигателя с учетом фазы ($\Delta\varphi_2 \dots \Delta\varphi_i$), которая зависит от положения кривошипа. При этом, каждая из удельных тангенциальных сил для каждого из цилиндров по уравнению (11) зависит от приведенных выше параметров (факторов), что в свою очередь также окажет влияние и на суммарную удельную тангенциальную силу. Степень такого влияния параметров на величину суммарной удельной тангенциальной силы необходимо исследовать, предпочтительным является исследование расчетным методом по программе.

Таким образом, процессы, протекающие в цилиндре двигателя, оказывают значительное влияние на удельную тангенциальную силу T , значения которой выбираются в качестве исследуемых.

2.2. Анализ конструктивных и режимных параметров, влияющих на удельную тангенциальную силу

Как указывалось в разделе 2.1, отклонения удельной тангенциальной силы при работе двигателя, исходя из приведенного уравнения (11), а также суммарной удельной тангенциальной силы по уравнению (12), зависят от характера изменения давления в цилиндре p_r , от величины диаметра цилиндра $D_{ц}$, массы $m_{пр}$, приведенной к поршню, радиуса кривошипа R , угла поворота кривошипа φ , частоты вращения ω , длины шатуна L , от величины угла отклонения шатуна от оси цилиндра β . Так как отношение радиуса кривошипа к длине шатуна R/L равно отношению $\sin\beta/\sin\varphi$, то отклонение длины шатуна L от нормы можно проанализировать, изменяя значение указанного соотношения R/L , равного λ_k .

Дальнейшее исследование отклонений удельной тангенциальной силы проводится для следующих параметров, в большей степени оказывающих на нее влияние:

- снижение давления в цилиндре (доля снижения давления K_{pr});
- неравномерность массы поршневой группы (доля снижения массы K_{mn});
- отклонение длины шатуна от нормы (через λ_k);
- угол отклонения кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$).

В процессе эксплуатации транспортного средства, оснащенного двигателем внутреннего сгорания, в реальных условиях некоторые из указанных параметров могут изменяться вследствие износа элементов конструкции таких, как износ цилиндропоршневой группы (износ компрессионных колец поршней), прогар прокладки головки блока цилиндров, а также вследствие появления твердых отложений на топливовпрыскивающей аппаратуре, а именно закоксованность соплового канала форсунок, или появление твердых отложений во впускных каналах двигателя или на клапанах системы газораспределения двигателя. Таким образом, к параметрам, изменяющимся в процессе эксплуатации, можно отнести снижение давления в цилиндре.

Однако некоторые параметры, влияющие на суммарную удельную тангенциальную силу, не изменяются в процессе эксплуатации, а могут быть заложены в допустимую погрешность изготовления элементов конструкции двигателей, а также ошибок, возникающих при сборке двигателя. К таким влияющим параметрам можно отнести снижение массы поршневой группы, отклонения длины шатуна от нормы и угол отклонения кривошипа от нормы. Однако как длина шатуна, так и угол кривошипа могут измениться вследствие механических повреждений, вызванных, например, гидроударом из-за попадания жидкости в цилиндры двигателя.

Алгоритм расчета влияния вышеприведенных параметров (факторов) на отклонения удельной тангенциальной силы предполагается следующим.

При снижении давления в цилиндре (K_{pr}):

$$P_{r\text{откл}} = P_r * (1 - K_{pr}) \quad (13)$$

где $P_{r\text{откл}}$ – давления газов в цилиндре, действующее на поршень, при наличии снижения давления в цилиндре;

P_r – давление газов в цилиндре, действующее на поршень;

$(1 - K_{pr})$ – доля снижения давления в цилиндре.

$$P_{\Sigma} = P_{r\text{откл}} + P_j \quad (14)$$

$$P_{ш} = P_{\Sigma} / \cos(\beta) \quad (15)$$

$$T = P_{ш} * \sin(\varphi + \beta) \quad (16)$$

При исследовании влияния снижения массы поршневой группы $K_{пр}$ в уравнении (13) принимается равным 0, а силы инерции с отклонением массы поршня от нормы $P_{j\text{откл}}$ для уравнения (14) определяются по следующей зависимости:

$$P_{j\text{откл}} = P_j * (1 - K_{мп}) \quad (17)$$

где $(1 - K_{мп})$ – доля снижения массы поршневой группы.

Таким образом, дальнейший расчет влияния снижения массы поршневой группы $K_{мп}$ на удельную тангенциальную силу определяется по уравнениям

$$P_{\Sigma} = P_{\text{откл}} + P_j * (1 - K_{мп}) \quad (18)$$

$$P_{ш} = P_{\Sigma} / \cos(\beta) \quad (19)$$

$$T = P_{ш} * \sin(\varphi + \beta) \quad (20)$$

Как указывалось выше, для исследования влияния отклонения длины шатуна L от нормы зададимся следующей зависимостью отклонения угла β шатуна от нормы:

$$\beta_{\text{откл}} = \arcsin\left(\frac{R}{L} * (1 - K_{ш}) * \sin\varphi\right) \quad (21)$$

где $R/L = \lambda_k$ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна;

$(1 - K_{ш})$ – доля отклонения длины шатуна от нормы.

При этом, расчет влияния отклонения длины шатуна от нормы на удельную тангенциальную силу определяется как

$$P_{ш} = P_{\Sigma} / \cos(\beta_{\text{откл}}) \quad (22)$$

и

$$T = P_{ш} * \sin(\varphi + \beta_{\text{откл}}) \quad (23)$$

Влияние угла отклонения кривошипа от нормы $\Delta\varphi$ на удельную тангенциальную силу может быть определен следующим образом:

$$T = P_{ш} * \sin\left(\varphi + \frac{\Delta\varphi}{57,3} + \beta\right) \quad (24)$$

Таким образом, на основании известных зависимостей из расчета кинематики и динамики двигателей внутреннего сгорания [29] заданы зависимости удельной тангенциальной силы от отклонений, которые проявляются при производстве деталей ДВС, а также при их износе в процессе эксплуатации.

2.3. Анализ влияния отклонений суммарной удельной тангенциальной силы на неравномерность вращения коленчатого вала двигателя

При диагностировании реального двигателя внутреннего сгорания по неравномерности вращения коленчатого вала подразумевается получение данных о такой неравномерности, что может быть охарактеризовано количеством импульсов I_m , поступающих, например, со штатного датчика положения коленчатого вала, которым оснащены большинство современных двигателей с электронными системами управления [114-118].

Для того, чтобы оценить влияние параметров, характеризующих неисправности, на неравномерность вращения коленчатого вала, необходимо по значениям удельных тангенциальных сил с отклонениями рассчитать мгновенную частоту вращения n .

Как известно [124], неравномерность мгновенной частоты вращения коленчатого вала зависит от приведенного к оси вращения коленчатого вала момента инерции J_{np} подвижных звеньев двигателя, при этом, колебания момента инерции складываются от колебаний момента инерции преобразующего механизма, который может быть найден по формуле

$$\theta_{\Pi} = \sum_{i=1}^n m_{\text{ПДМ}i} \left(\frac{V}{\omega}\right)^2 + \sum_{i=1}^n I_{\text{ш.ки}} + I_{\text{к.в.}} + \sum_{i=1}^m I_{\text{пzz}} \left(\frac{\omega_{\text{пз}}}{\omega}\right)^2 \quad (24.1)$$

Здесь θ_{Π} - приведенный момент инерции преобразующего механизма;

$m_{\text{ПДМ}i}$ - масса поступательно движущихся деталей;

V - скорости поршней;

ω - угловая скорость вала;

$I_{\text{ш.ки}}$ - момент инерции i -й массы шатуна, приводимой к кривошипу коленчатого вала;

$I_{\text{к.в.}}$ - момент инерции коленчатого вала;

$I_{пzz}$ - момент инерции звеньев, приводимых во вращение

$\omega_{пz}$ - угловые скорости приводимых от коленчатого вала двигателя звеньев.

Анализ приведенной зависимости показал, что значения момента инерции коленчатого вала $I_{к.в.}$ и момента инерции $I_{ш.ки}$ i -й массы шатуна, приводимой к кривошипу коленчатого вала не зависят от частоты вращения коленчатого вала и являются постоянными, а колебания момента инерции проявляются при изменении угловой скорости ω вращения коленчатого вала и, соответственно, изменении угловой скорости $\omega_{пz}$ приводимых от коленчатого вала звеньев (третье слагаемое), а также в следствие переменности скоростей V движения поршней по углу поворота коленчатого вала (первое слагаемое).

Для четвертого слагаемого отношение $\omega_{пz}/\omega$ имеет постоянного значение, так как передаточное отношение привода вспомогательных агрегатов от коленчатого вала двигателя (генератор, ТНВД, вентилятор и др.), как правило, не изменяется. Также для момента инерции масс вспомогательных агрегатов может быть принято допущение его постоянства по углу поворота.

Исходя из сказанного, колебания момента инерции преобразующего механизма складывается из колебаний момента инерции возвратно-поступательно движущихся деталей.

Так для 6-ти цилиндрового двигателя IVECO F4HE9687P*J101 значение первого слагаемого по углу поворота коленчатого вала изменяется в интервале от 0,023 до 0,0411 кг·м². Таким образом, если момент инерции маховика для IVECO равен 1,21 кг·м², то доля полученных значений моментов инерции поступательно движущихся деталей двигателей от значения момента инерции маховика составляют для 6-ти цилиндрового ДВС до 3,4%.

Как известно, относительная величина момента инерции маховика от суммарного момента инерции подвижных звеньев кривошипно-шатунного механизма составляет до 90%. Таким образом, исходя из вышесказанного, дальнейшее исследование неравномерности частоты вращения коленчатого вала

может быть проведено с учетом допущения постоянства суммарного момента инерции двигателя, приведенного к оси коленчатого вала, и равенстве его моменту инерции маховика.

При этом алгоритм расчета неравномерности частоты вращения предполагается следующим.

Пренебрегая силами трения в цилиндропоршневой группе и кривошипно-шатунном механизме ввиду их малости по сравнению с другими действующими силами, величину крутящего момента $M_{кр}$ можно записать в следующем виде [29, с. 18]

$$M_{кр} = T_{\Sigma} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D_{ц}^2 \cdot R \quad (25)$$

где $\frac{\pi}{4} \cdot D_{ц}^2$ - площадь поршня F .

Как известно из [27, с. 197-198] для установившегося режима работы двигателя

$$M_c = M_{ср} \quad (26)$$

где $M_{ср}$ – средний индикаторный крутящий момент двигателя.

Откуда, исходя из зависимостей (26) и (7), уравнение (6) примет вид

$$J_{пр} \frac{d\omega}{dt} = M_{кр} - M_{ср} \quad (27)$$

а

$$\frac{d\omega}{dt} = (M_{кр} - M_{ср})/J_{пр} \quad (28)$$

При этом, $\Delta M = M_{кр} - M_{ср}$ представляет собой функцию от времени t

$$\Delta M = f(t), \quad (29)$$

или функцию от угла поворота коленчатого вала φ

$$\Delta M = f(\varphi), \quad (30)$$

Из уравнения (28) следует, что

$$\omega = \int_0^{t_{\text{ц}}} \frac{d\omega}{dt} \cdot dt \quad (31)$$

где $t_{\text{ц}}$ - время одного цикла.

Представим уравнение (31) в следующем виде

$$\omega = \int_0^{t_{\text{ц}}} \frac{1}{J_{\text{пр}}} \cdot (M_{\text{кр}} - M_{\text{ср}}) \cdot dt \quad (32)$$

Как известно

$$\varphi = 6 \cdot n \cdot t \quad (33)$$

откуда

$$t = \frac{\varphi}{6 \cdot n} \quad (34)$$

Принимая

$$n = \text{const} = n_{\text{ср}} \quad (35)$$

И проинтегрировав выражение (34), получим

$$dt = \frac{1}{6 \cdot n_{\text{ср}}} \cdot d\varphi \quad (36)$$

Перейдем в уравнении (32) от времени к углу поворота коленчатого вала.

$$\omega = \int_0^{720^\circ} \frac{1}{J_{\text{пр}}} \cdot (M_{\text{кр}} - M_{\text{ср}}) \cdot \frac{1}{6 \cdot n_{\text{ср}}} \cdot d\varphi \quad (37)$$

или

$$\omega = \frac{1}{6 \cdot n_{\text{ср}}} \cdot \frac{1}{J_{\text{пр}}} \int_0^{720^\circ} (M_{\text{кр}} - M_{\text{ср}}) \cdot d\varphi \quad (38)$$

Перейдем от угловой скорости вращения ω к частоте вращения n

$$n = \frac{30\omega}{\pi} \quad (39)$$

Откуда

$$\omega = \frac{\pi n}{30} \quad (40)$$

Таким образом, частота вращения может быть найдена по формуле

$$n = \frac{30}{6 \cdot n_{cp} \cdot \pi} \cdot \frac{1}{J_{пр}} \int_0^{720^0} (M_{кр} - M_{ср}) \cdot d\varphi \quad (41)$$

Неравномерность частоты вращения при отсутствии влияющих факторов представлены на рис. 2.5

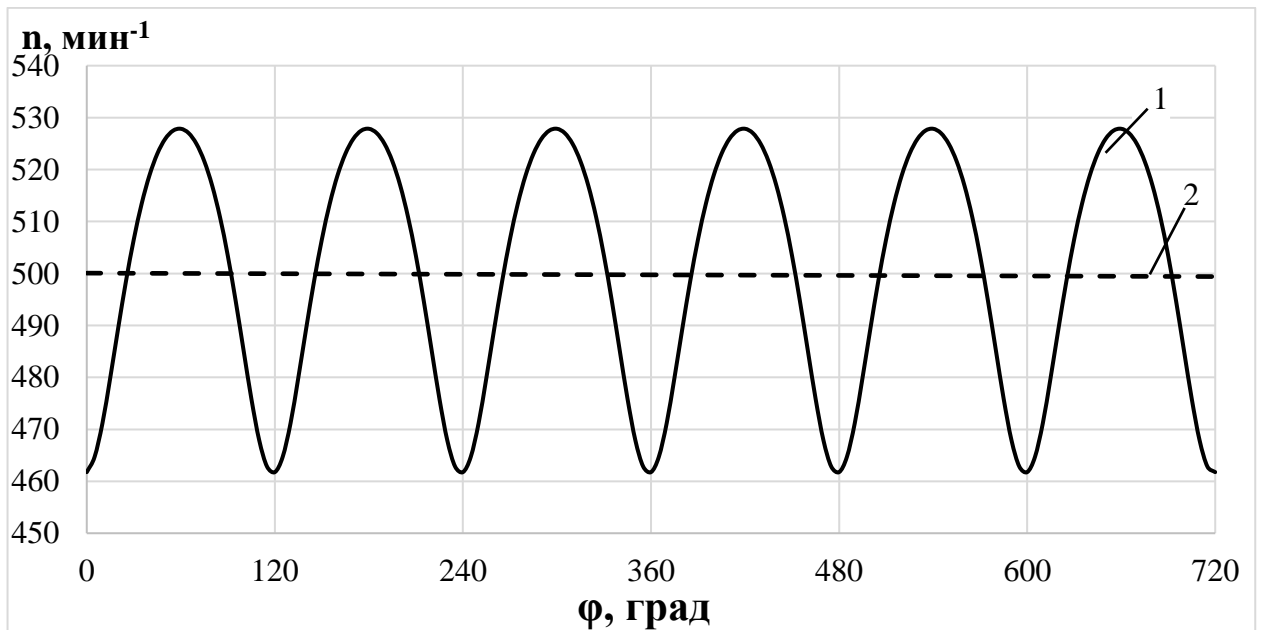


Рис. 2.5 Кривая 1 - неравномерность частоты вращения коленчатого вала 6-ти цилиндрического ДВС по углу поворота (φ) коленчатого вала;
2- среднее значение частоты вращения (n_{cp})

2.4. Алгоритм проведения расчетных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на колебания удельной тангенциальной силы и неравномерность вращения коленчатого вала

При проведении расчетных исследований влияния выбранных параметров на колебания удельной тангенциальной силы и неравномерности частоты вращения, можно выделить следующие этапы.

1. Необходимо задаться объектами исследования, то есть выбрать для двигателей с какими параметрами будут проводиться расчеты.
2. Провести для выбранных на первом этапе двигателей тепловой расчет, расчеты кинематики и динамики с целью получения значений сил при отсутствии каких-либо неисправностей в двигателях. При этом типовые расчеты можно проводить по известной методике, например, описанной в [30]. Таким образом, для расчета удельных тангенциальных сил необходимо задаться следующими исходными параметрами ДВС, приведенными в таблице 2.1:

Таблица 2.1

Исходные параметры для расчета удельных тангенциальных сил

Параметр	Описание параметра
N_e , [кВт]	Номинальная мощность двигателя
N , [мин-1]	Номинальная частота вращения
i	Число цилиндров
e_d	Степень сжатия действительная
P_r , [МПа]	Давление остаточных газов
P_a , [МПа]	Давление в цилиндре в начале сжатия
n_1	Показатель политропы сжатия
P_z , [МПа]	Действительное максимальное давление сгорания
n_2	Показатель политропы расширения

P_b , [Мпа]	Давление в конце расширения
D , [мм]	Диаметр цилиндра
S , [мм]	Ход поршня
h_m	Механический КПД
Тактность	2-тактный; 4-тактный
λ_k	Отношение радиуса кривошипа к длине шатуна R/L
m_n , [кг/м ²]	Удельная масса поршневой группы
$m_{ш}$, [кг/м ²]	Удельная масса шатуна
Расположение цилиндров	P - рядное; V - v-образное
Угол развала цилиндров, [град]	Угол между левым и правым рядами цилиндров
Порядок работы цилиндров	По порядку чередования вспышек начиная с 1-го цилиндра по направлению вращения коленчатого вала
Угол между кривошипами, [град]	Относительно оси коленчатого вала
Углы между вспышками, [град]	Начиная с 1-го цилиндра и далее по порядку работы между следующими цилиндрами

$D_M, [м]$	Диаметр маховика
$B_M, [м]$	Средняя толщина маховика

3. Провести расчет влияния на удельную тангенциальную силу каждого параметра (фактора) в отдельности по зависимостям (13-24), приведенным в разделе 2.2, в диапазоне рабочего цикла для 1-го цилиндра, исследуемых двигателей на режимах холостого хода при минимальной частоте вращения 500 мин^{-1} и номинальном режиме при частоте 3000 мин^{-1} .

4. Провести оценку влияния каждого параметра (фактора) по среднеквадратическому отклонению, представляющему собой сумму квадратов разностей суммарной удельной тангенциальной силы при наличии неисправности и суммарной удельной тангенциальной силы исправного двигателя

$$\sigma_{\Sigma \Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{\text{откл}}(\varphi) - T_{\text{без откл}}(\varphi))^2}{n}} \quad (42)$$

или запишем в виде

$$\sigma_{\Sigma \Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T(\varphi))^2}{n}} \quad (43)$$

Кроме того, в связи с тем, что значения суммарной удельной тангенциальной силы для исправного двигателя могут быть неизвестны, то оценку влияния каждого параметра (фактора) по среднеквадратическому отклонению предполагается проводить по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра, а за уровень сравнения выбирается среднее арифметическое по различным участкам и определяются отклонения от него по каждому участку. Исходя из сказанного выше, зависимость (42) примет вид:

$$\sigma_{\Sigma\Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{\text{откл}}(\varphi) - T_{\text{ср}}(\varphi))^2}{n}} \quad (44)$$

где $T_{\text{ср}}(\varphi)$ определяется следующим образом:

$$T_{\text{ср}}(\varphi) = \sum_{x=1}^i \frac{T_{\text{откл}}\left(\varphi + \frac{720}{i} \cdot (x - 1)\right)}{i} \quad (45)$$

5. Определить влияние каждого параметра (фактора) на мгновенную частоту вращения коленчатого вала по зависимостям (25, 28, 38, 39, 40, 41), приведенных в разделе 2.3, для одного из исследуемых двигателей.

2.5. Анализ технических средств, необходимых для определения неравномерности вращения коленчатого вала ДВС

Мировой парк автомобилей в большей степени составляют транспортные средства с электронными системами управления работой двигателя, при этом нормальное функционирование таких систем невозможно без контроля за различными параметрами отдельных систем. Управление системой зажигания или системой впрыска топлива, как правило, использует датчики положения коленчатого вала, установленные на носке коленчатого вала или со стороны маховика.

Таким образом, для получения данных мгновенной скорости вращения коленчатого вала при контроле рабочих процессов в ДВС возможно воспользоваться электромагнитным (рис. 2.6) или оптическим (рис. 2.7) датчиком углового положения коленчатого вала. [31, 32, 33]

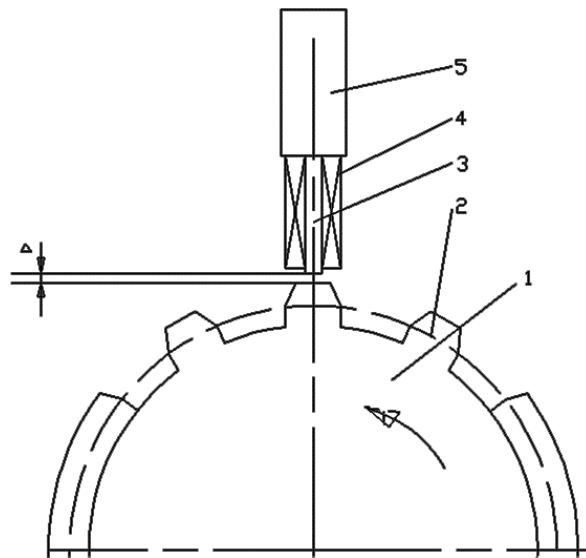


Рис 2.6. Схема работы индуктивного датчика, где 1 – колесо с зубчатым венцом, 2 – зуб, 3 – магнитопровод из магнитомягкого материала, 4 – индукционная катушка, 5 – постоянный магнит, Δ – зазор между зубом и магнитопроводом датчика. [35]

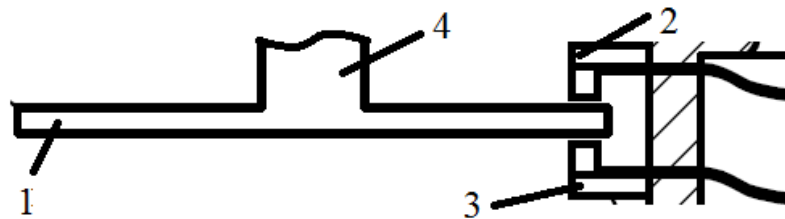


Рис. 2.7. Схема работы оптического датчика, где 1 – диск с метками, 2 – источник света, 3 – фотоэлемент, 4 – вал. [36]

Индукционная катушка электромагнитного датчика размещена вокруг постоянного магнита, полюс которого, со стороны, обращенной к объекту вращения, например, к зубчатому венцу маховика, имеет магнитопровод из магнитомягкого материала. Магнитопровод устанавливается с небольшим зазором относительно зубьев вращающегося зубчатого колеса (маховика). При перемещении зубьев относительно магнитопровода величина зазора Δ изменяется, что вызывает изменение магнитной индукции и появления двухполярного электрического импульса. Две пикообразных полуволны импульса расположены симметрично относительно оси, проходящей через нулевую точку, а нулевая точка

соответствует центру каждого зуба, что позволяет с большей точностью определить их положение (рис. 2.8). Амплитуда выходного сигнала датчика зависит от размера воздушного зазора между магнитопроводом и зубом, а также от скорости изменения магнитной индукции, на которую влияет скорость перемещения зуба.

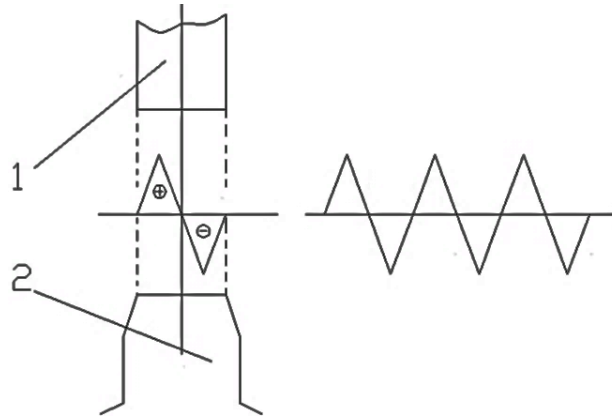


Рис. 2.8 Индуктивный датчик и связь его импульса с геометрическими параметрами зуба.
1-магнитопровод из магнитомягкого материала, 2-зуб. [35]

Сигнал с индуктивного датчика имеет форму, представленную на рис. 2.9. Этот импульс считывается и записывается для получения диаграммы угловых скоростей.

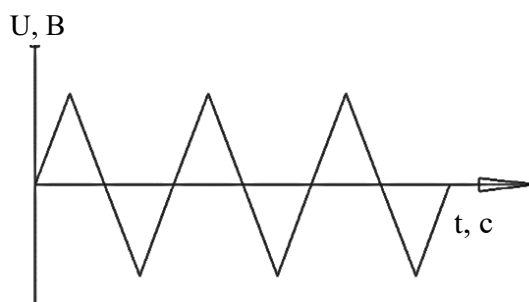


Рис. 2.9. Упрощенная форма сигнала, полученного с датчика. [35]

Далее измеряют временные интервалы прохождения зубьев мимо датчика (T) и получают диаграмму подобную изображенной на рис. 2.10.

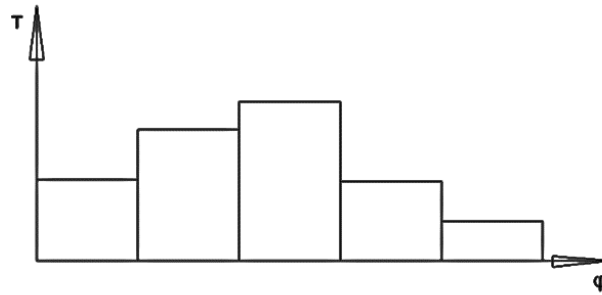


Рис. 2.10. Зависимость временных периодов (Т) от поворота угла коленчатого вала. [35]

В реальных условиях проведения экспериментальных исследований оценить мгновенную частоту вращения коленчатого вала возможно и подсоединив к нему современный оптический датчик, многочисленные модели которых широко применяются в станках с числовым программным управлением. В таблице 2.2 и на рис. 2.11, в качестве примера, приведены характеристика датчиков фирмы *Iskra TELA d.d.* [34], Словения. Выходной сигнал датчиков, также может быть выбран из ряда стандартных значений в соответствии с типом регистрирующей аппаратуры.

Таблица 2.2

Технические характеристики угловых отметчиков (*rotary encoders*) [35]

Модель	<i>TRG10</i>	<i>TRG11</i>	<i>TRG12</i>
Диаметр фланца	58		
Диаметр оси	ø10	ø6	ø8
Выходной сигнал	<i>DO</i> прямоугольные импульсы, <i>DS</i> дифференциальный выход, <i>SI</i> токовый выход, 11 мкА		
Выходной уровень	<i>C(OC)</i> , <i>T 5V TTL</i> , <i>S: sine ток</i> , <i>L: C-MOS</i> , <i>P: Push-Pull</i>		

Рабочее напряжение, В	5, 12, 15 - 30 В
Максимальная частота	T, L : 300кГц; C : 150кГц; S : 85кГц
Число импульсов (I_m) на оборот (на выбор)	50, 60, 100, 125, 127, 150, 180, 200, 250, 360, 500, 600, 900, 1000, 1024, 1250, 1500, 1800, 2000, 2500, 3600, 5000

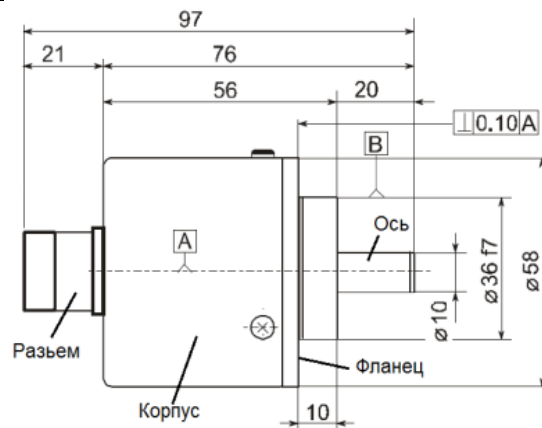


Рис. 2.11. Датчик фирмы *Iskra TELA d.d.*, Словения [35]

Исходя из допустимой максимальной частоты следования импульсов для транзисторно-транзисторной логики (*TTL* – логики): 300 кГц и максимальной частоты вращения коленчатого вала двигателя 6000 мин^{-1} , число импульсов на один оборот не должно превышать 3000. Такая угловая точность является излишней, и ориентироваться следует на 60...180 импульсов на оборот (имп/об), что соответствует угловому шагу 6...2 градуса поворота коленчатого вала ($^{\circ}\text{ПКВ}$).

Более существенной является точность регистрации временных интервалов между поступающими импульсами, так как колебания угловой скорости коленчатого вала незначительны и разница между периодами следования импульсов, также невелика. Применение цифрового запоминающего осциллографа

с максимальной частотой дискретизации $f_{\text{дис}} = 100$ МГц дает точность погрешность регистрации временного интервала между импульсами $\pm 1 / f_{\text{дис}}$ сек, или $\delta T_{\text{ос}} = \pm 0,01$ мкс. [35, 84, 85]

Оценим, какова погрешность регистрации угловой скорости (ускорения) с помощью этой аппаратуры на двигателе. При частоте вращения коленчатого вала n в минуту и числе импульсов на оборот датчика I_m , средний период следования импульсов (сек) будет равен

$$T_m = \frac{60}{n \cdot I_m}. \quad (46)$$

Таким образом, при выборе углового шага отметчика $\varphi_{\text{ш}} = 6$ °ПКВ (числе импульсов на оборот коленчатого вала $I_m = 60$) и частоте вращения коленчатого вала двигателя при диагностировании 1000 мин^{-1} период следования импульсов составит $T_m = 0,001$ сек. При этом минимальное регистрируемое аппаратурой отличие в мгновенной частоте вращения составит

$$\Delta n_{\text{min}} = \frac{60}{T_m \cdot I_m} - \frac{60}{(T_m + \delta T_{\text{ос}}) \cdot I_m} = 0,00999 \text{ мин}^{-1}, \quad (47)$$

или по угловой частоте

$$\Delta \omega_{\text{min}} = \pi \cdot \Delta n_{\text{min}} / 30 = 0,001046 \text{ сек}^{-1}, \quad (48)$$

при этом минимальное регистрируемое угловое ускорение равно

$$\Delta \varepsilon_{\text{min}} = \Delta \omega_{\text{min}} / T_m = 1,046 \text{ сек}^{-2}. \quad (49)$$

Следует также отметить, что оцененная разрешающая способность системы может быть увеличена за счет применения запоминающих осциллографов с более высокой частотой дискретизации, например, ОЦЗС-02(250USB) с максимальной частотой дискретизации в режиме удвоения $f_{\text{дис}} = 500$ МГц или ОЦЗС-02(1000USB) с $f_{\text{дис}} = 2$ ГГц.

Однако для получения информации о неравномерности вращения коленчатого вала у двигателей, не оборудованных электронными системами управления, требуется разработка дополнительного оборудования. Таким оборудованием может являться разработанное и запатентованное устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС [36]. Устройство разработано на базе датчика AVL 365 С с целью повышения точности определения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя.

Устройство (рис. 2.12) состоит из корпуса 1 с рукояткой 2, на конце которой закреплен суппорт (не показан) для фиксации корпуса 1 устройства в неподвижном состоянии относительно вращающихся частей двигателя внутреннего сгорания, установленных в корпусе двух подшипников 3 с возможностью вращения вала 4 устройства, на одном из торцов которого закреплен диск 5 с метками, а на другом выполнен паз 6 в виде многоугольника для установки переходника 7. Переходник 7 представляет собой удлиненную торцевую головку, с одного торца которой выполнен внешний многоугольник для соединения переходника 7 с валом 4 устройства, а с другого торца внутренний шестигранник для соединения вращающихся частей двигателя с валом устройства. Для определения скорости вращения в корпусе 1 устройства размещены перпендикулярно меткам, расположенным на диске 5, лазерный излучатель 8 и фотодатчик 9, соединенные через аналого-цифровой преобразователь с персональным компьютером (не показаны).

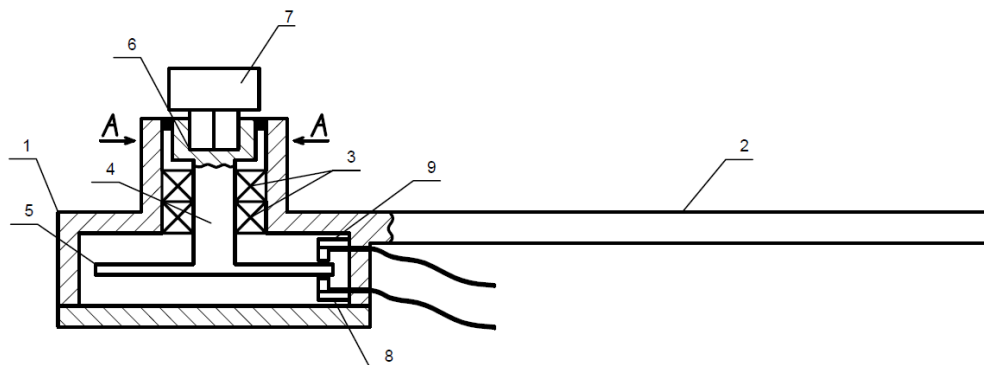


Рис. 2.12. Устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС: 1- корпус, 2-рукоятка, 3- подшипники, 4-вал, 5-диск, 6-паз, 7-переходник, 8-излучатель, 9- фотодатчик. [36]

Перед установкой устройства на двигатель внутреннего сгорания выбирается переходник 7 необходимого размера для соединения устройства с вращающимися частями двигателя, в частности выбирается размер, относительно гайки шкива коленчатого вала. После соединения устройства с вращающейся частью ДВС рукоятка 2 фиксируется с помощью суппорта, для исключения вращения корпуса 1 датчика. После установки устройства на двигателе, оно подключается через аналого-цифровой преобразователь прямого преобразования, встроенный в осциллограф, например, такой, как изображен на рис. 2.13 [37], к персональному компьютеру.



Рис.2.13 Внешний вид цифрового запоминающего осциллографа типа OЦЗС-02(100USB) ЗАО Руднев-Шиляев. [37]

Вращение коленчатого вала двигателя передается через переходник на вал устройства и к диску с метками. При прохождении меток между лазерным излучателем и фотодатчиком, лазерный луч попадает на фотодатчик. В зависимости от количества импульсов фотодатчика (количества меток, прошедших в единицу времени) определяется скорость вращения коленчатого вала двигателя.

В некоторых случаях может возникнуть необходимость проведения диагностических мероприятий при частотах, на которых возникают крутильные

колебания, оказывающие значительное влияние на неравномерность вращения коленчатого вала двигателя. Как правило учитывать крутильные колебания коленчатого вала не требуется, так как в случае сильного отклонения неравномерности вращения от нормы исследователю достаточно изменить частоту вращения вала и проводить исследования на ней. Однако для возможности учета таких колебаний было также разработано и получен патент [38] на устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания усовершенствованной конструкции, что также может повысить точность измерений колебаний неравномерности вращения коленчатого вала и при наличии значительных крутильных колебаний.

Устройство (рис. 2.14) состоит из сейсмической массы 1, связанной с корпусом 2 упругой связью 3 и установленной на подшипниках 4. Блок регистрации взаимного углового положения сейсмической массы 1 и корпуса выполнен в виде рефлектора 5, представляющего собой круговой усеченный конус, образующая боковой поверхности которого наклонена к оси под углом 45° , и ориентированного таким образом, что его ось совпадает с осью вращения устройства. Рефлектор 5 скреплен с сейсмической массой 1, в его основании установлен поляроид 6, выполненный в виде плоского диска, второй аналогичный поляроид 7 установлен в корпусе 2 устройства параллельно первому. Основанием рефлектор ориентирован в сторону статора 8, установленного соосно с корпусом 2 и сейсмической массой 1, в котором симметрично по обе стороны от оси вращения на расстоянии, меньшем радиуса поляроидов, установлены источник 9 света и фотоприемник 10, соединенные с персональным компьютером (не показан) через аналого-цифровой преобразователь 11. На торце корпуса 2 со стороны статора 8 установлен диск 12 с метками, по обе стороны которого перпендикулярно установлены лазерный излучатель 14 и второй фотодатчик 13, соединенные через аналого-цифровой преобразователь 11 с персональным компьютером. Для установки устройства на двигатель внутреннего сгорания выбирается необходимого размера переходник 15, представляющий собой удлиненную

торцевую головку, с одного торца которой выполнен внешний многоугольник для соединения переходника 15 с корпусом 2 устройства, а с другого торца внутренний шестигранник для соединения вращающихся частей двигателя с корпусом устройства. Также статор 8 снабжен рукояткой, на конце которой закреплен суппорт (не показаны) для фиксации статора 8 в неподвижном состоянии относительно вращающихся частей двигателя внутреннего сгорания.

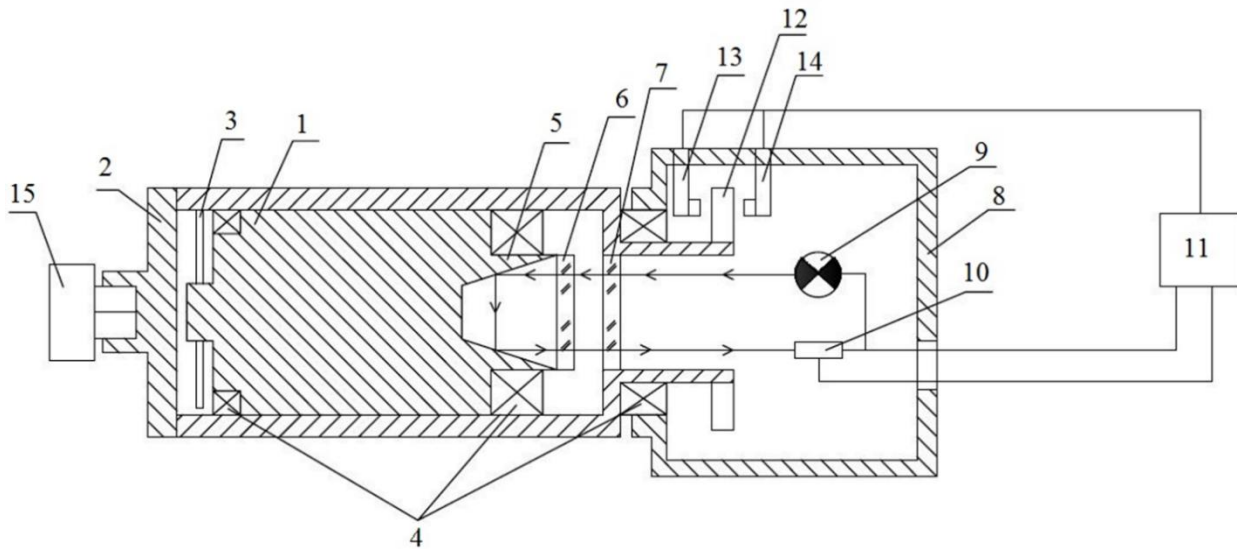


Рис. 2.14. Усовершенствованное устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала двигателя. [38]

Перед установкой устройства на двигатель внутреннего сгорания выбирается переходник 15 необходимого размера для соединения устройства с вращающимися частями двигателя, в частности выбирается размер, относительно гайки шкива коленчатого вала. После соединения устройства с вращающейся частью ДВС рукоятка фиксируется с помощью суппорта, для исключения вращения статора 8 устройства. После установки устройства на двигатель, оно подключается через аналого-цифровой преобразователь 11 к персональному компьютеру, на котором, с помощью набора программ, индицируется угловая скорость вращения коленчатого вала двигателя, ускорение вращения при разгоне и выбеге. Вращение коленчатого вала двигателя передается через переходник 15 корпусу 2 и к диску 12 с метками. При прохождении меток между лазерным излучателем 14 и

фотодатчиком 13, лазерный луч попадает на фотодатчик 13. Одновременно с этим при наличии в исследуемом коленчатом валу ДВС крутильных колебаний угловые колебания корпуса 2 устройства относительно сейсмической массы 1 равны крутильным колебаниям коленчатого вала. Луч от источника 9 света проходит через поляроиды 7 и 6 и, отразившись от рефлектора 5, попадает на фотоприемник 10. Интенсивность светового потока, прошедшего через поляроиды 7 и 6, зависит от угла между плоскостями поляризации поляроидов 7 и 6, при малых угловых смещениях она пропорциональна изменению этого угла. Так как поляроид 7 установлен в корпусе 2 устройства, а поляроид 6 установлен на сейсмической массе 1, то изменение угла между плоскостями поляризации поляроидов 7 и 6 обусловлено угловыми колебаниями корпуса 2 относительно сейсмической массы 1 и, следовательно, интенсивность прошедшего через поляроиды 7 и 6 светового потока изменяется пропорционально крутильным колебаниям исследуемого коленчатого вала ДВС. Отразившись от рефлектора 5, этот луч попадает на фотоприемник 10, выходное напряжение которого пропорционально интенсивности светового потока, падающего на него и, следовательно, пропорционально крутильным колебаниям исследуемого коленчатого вала. Таким образом, в зависимости от количества импульсов фотодатчика 13 (количества меток, прошедших в единицу времени) и интенсивности светового потока на фотоприемник 10 определяется скорость вращения коленчатого вала двигателя с поправкой на неравномерность вращения, обусловленную крутильными колебаниями коленчатого вала ДВС.

Также в ходе проведенных исследований были разработаны и запатентованы предполагаемые устройства для регулирования состава горючей смеси, одно из которых состоит из электронного блока управления, связанного с источником давления и разрежения, с датчиком давления, установленным в ресивере, и с блоком заслонок, вход которых соединен с источником давления и разрежения, а выход соединен с ресивером, выход которого с помощью трубопровода подключен к поплавковой камере карбюратора [94]. Кроме того, проведены

усовершенствования указанного устройства, заключающиеся в том, что каждая заслонка в блоке заслонок соединена с шаговым электродвигателем, управляемым электронным блоком управления, кроме того, дополнительно установлены датчики давления, расположенные в трубопроводе между каждой заслонкой блока заслонок и источником давления и разрежения, при этом дополнительные датчики давления соединены с электронным блоком управления [95], а также в том, что на ресивере установлен теплообменник, выполненный с возможностью получения тепла от источника тепла, а в поплавковой камере дополнительно установлен датчик температуры, соединенный с электронным блоком управления, а источником тепла является охлаждающая жидкость двигателя внутреннего сгорания [96].

Выводы по главе 2.

1. Проведен анализ возможности диагностирования двигателей внутреннего сгорания по косвенным показателям, в качестве которых могут быть использованы:

- изменение крутящего момента (удельной тангенциальной силы) на стационарном режиме работы двигателя;
- мгновенная частота вращения и ее изменение.

2. Определены конструктивные и режимные параметры, оказывающие значимое влияние на косвенные показатели, в качестве которых были выбраны:

- снижение давления в цилиндре (доля снижения давления K_{pr});
- отклонение по массе в поршневой группе (доля снижения массы K_{mn});
- отклонение длины шатуна от нормы (через λ_k);
- угол отклонения между осями кривошипов от нормы ($\Delta\varphi$).

3. Получены теоретические зависимости связывающие изменения косвенных показателей с исследуемыми параметрами, которые позволяют расчетным путем определить изменение косвенных показателей как в процессе эксплуатации, так производства двигателей.

4. Разработан алгоритм проведения расчетных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на изменения крутящего момента (удельной тангенциальной силы) и мгновенной частоты вращения коленчатого вала, а также выбраны расчетные режимы:

- режим холостого хода при частоте вращения коленчатого вала 500 мин^{-1} ;
- номинальный режим при частоте вращения 3000 мин^{-1} .

5. Определены требования к датчику измерения мгновенной частоты вращения коленчатого вала до 6000 мин^{-1} по количеству регистрируемых импульсов, которых должно быть от 60 до 180 на оборот, а также предложены конструктивные решения их использования на двигателях, необорудованных штатными датчиками (патент № 137387 и № 156397).

6. Для количественной оценки степени влияния каждого конструктивного и режимного параметра на изменение крутящего момента и мгновенной частоты вращения необходимо проведение расчетных исследований с использованием полученных теоретических зависимостей, для чего необходимо разработать программу для компьютерного анализа.

ГЛАВА 3. РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ВЫЯВЛЕНИЯ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

3.1 Программа проведения расчетных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на колебания крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала [136]

Исходя из поставленных задач теоретических основ методики определения неисправностей ДВС по неравномерности вращения коленчатого вала, приведенных в главе 2, целью расчетного анализа методики является определение степени влияния каждого параметра (фактора) на изменения крутящего момента за рабочий цикл и неравномерность частоты вращения коленчатого вала для одного из выбранных объектов исследования при проведении однофакторного расчетного исследования влияния каждого параметра.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать компьютерную программу для автоматизации проведения расчетных исследований по приведенному в разделе 2.4 алгоритму.
2. Определить, как изменяется неравномерность момента при отклонении от нормы различных параметров:
 - изменение давления в цилиндре;
 - неравномерность масс поршневой группы;
 - длины шатуна от нормы (через λ_k);
 - угол отклонения между осями кривошипов от нормы.
3. Какое значение изменения параметров не должно учитываться, так как это входит в общий шум сигнала из-за допустимых отклонений.

4. Оценка влияния частоты вращения и нагрузки на изменение влияния перечисленных параметров.
5. Оценка величины порогового (критического) значения отклонения параметра (фактора).
6. Провести анализ для двигателей с различным количеством цилиндров и равномерным чередованием вспышек.
7. Провести расчетный анализ среднеквадратического отклонения суммарной удельной тангенциальной силы с учетом влияющего параметра (фактора) по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра, выбрав за начало отсчета ВМТ начала такта впуска первого цилиндра многоцилиндрового ДВС с равномерным чередованием вспышек.
8. Оценить влияние каждого параметра (фактора) на неравномерность частоты вращения коленчатого вала по меньшей мере для одного из исследуемых двигателей.

В процессе эксплуатации двигателей внутреннего сгорания могут проявляться неисправности, вызывающие отклонения в работе двигателя, такие как ухудшение герметичности цилиндропоршневой группы (ЦПГ), связанное с ухудшением компрессии, вызванным износом ЦПГ, прогаром прокладки головки блока цилиндров или неплотным прилеганием клапанов к седлам, при этом снижение давления в камере сгорания может проявляться не только при рабочем ходе поршня, но и в процессе сжатия воздуха или топливо-воздушной смеси. Кроме того, отклонение от нормальной работы двигателя при процессе воспламенения может быть связано с углом подачи искры или впрыска топлива, что в свою очередь сказывается на ухудшении процесса сгорания топлива, или с ухудшением впрыскивания топлива. Исходя из сказанного выше, с целью исследования влияния снижения давления в одном цилиндре на суммарный крутящий момент многоцилиндрового ДВС выбираются следующие значения:

- доля снижения давления (K_{pr}) составляет %: 5, 10, 20, 30, 40.

При производстве деталей двигателей внутреннего сгорания допустимы определенные погрешности, которые необходимо учитывать. Так, например, при производстве поршней для многоцилиндрового двигателя они могут отличаться по диаметру и массе, причем разновесность поршней, для ограничения технологической неуравновешенности ДВС, лимитируется, величина которой обычно не превышает 0,5...1,0 % [39]. Таким образом, для исследования характера влияния неравномерности массы поршневой группы на отклонения суммарного крутящего момента многоцилиндрового ДВС выбираются следующие значения снижения массы одного поршня:

- доля снижения массы одного поршня из поршневой группы (K_{mn}) составляет от 1% до 10%.

При производстве коленчатых валов также имеют место быть определенные допуски. Так, например, отклонение углов между осями кривошипов от номинального допускается не более $\pm 30'$ при числе колен до 4-х и $\pm 15'$ при числе колен свыше 4-х [40]. Таким образом, для исследования характера влияния изменения угла отклонения кривошипа коленчатого вала на отклонения суммарного крутящего момента многоцилиндрового ДВС выбираются следующие значения:

- отклонения угла между осями кривошипов от нормы ($\Delta\varphi$) составляет 0.5; 1; 2; 3; 4 градусов.

Согласно ГОСТ Р 53813-2010 от 15.09.2010 при производстве шатунов отклонение от параллельности осей отверстия под вкладыши в кривошипной головке и отверстия под поршневой палец в поршневой головке шатуна не должно превышать 0,08 мм на длине 100 мм, перекос осей отверстий не должен превышать 0,08 мм на длине 100 мм при установке пальца с зазором и от 0,08 до 0,12 мм на длине 100 мм при установке пальца с натягом [41]. Исходя из сказанного выше, для исследования характера влияния изменения длины шатуна на отклонения

суммарного крутящего момента многоцилиндрового ДВС выбираются следующие значения:

- отклонение длины шатуна от нормы (λ_k) составляет от 1 до 5 %.

В качестве объектов исследования выбраны четырехтактные четырех-, шести- и двенадцатицилиндровые двигатели с равномерным чередованием вспышек. Для всех исследуемых двигателей исходные параметры, приведенные в таблице 2.1 раздела 2.4, выбираются одинаковыми, за исключением, соответственно, числа цилиндров i . Также с целью определения изменения отклонений параметров (факторов) в зависимости от частоты вращения коленчатого вала для этих двигателей выбираются следующие расчетные режимы:

- режим холостого хода при минимальных оборотах равных 500 мин^{-1} ;
- номинальный режим при номинальных оборотах равных 3000 мин^{-1} .

Тепловой расчет, расчеты кинематики и динамики двигателей внутреннего сгорания являются достаточно трудоемкими и требуют от исследователя повышенного внимания, а также умения проводить вычисления с высокой точностью. Однако существуют программы, помогающие проводить сложные инженерные расчеты с высокой точностью и облегчающие проведение анализа полученных результатов [120, 121, 122]. Таким образом, дальнейшие расчеты, по описанному в главе 2 алгоритму, будут проводиться в программе Excel, в которой и была разработана программа по тепловому расчету, расчетам кинематики и динамики ДВС по известной методике, описанной, например, в [42].

Дальнейший расчет удельных тангенциальных сил с отклонениями проводится по приведенным в разделе 2.2 уравнениям (13-24) в зависимости от влияющих параметров (факторов). При этом, количество цилиндров исследуемых двигателей, а также порядок работы этих цилиндров окажут влияние только на суммарную удельную тангенциальную силу согласно приведенному уравнению (12) с учетом фазы, которая для рядного четырехцилиндрового двигателя выбирается 180^0 , для рядного шестицилиндрового двигателя - 120^0 и для

двенадцатицилиндрового двигателя – 60° . Данный факт позволяет одновременно проводить расчет для всех исследуемых двигателей.

Методика обработки данных описана в разделе 2.4.

3.2 Расчетный анализ влияния доли снижения давления в 1-ом цилиндре на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей по разработанной программе в Excel

В мировой практике определение неравномерности вращения коленчатого вала зачастую используется для диагностирования неисправностей или регулирования системы топливоподачи. [97-107]. В настоящее время проводятся мероприятия по улучшению укомплектованности современной аппаратурой и программным обеспечением для проведения углубленных испытаний и исследований рабочего процесса, протекающего в поршневых двигателях внутреннего сгорания, на предприятиях, занимающихся производством, в научно-исследовательских центрах и лабораториях высших учебных заведений. Однако зачастую исследователи рабочих процессов ДВС сталкиваются с необходимостью решения вопросов аппаратно-программного обеспечения исследований [43, 44, 45].

Качественное диагностирование и модернизация двигателя для усовершенствования энергетических, экономических и экологических характеристик невозможна без проведения всестороннего анализа различных параметров ДВС [119]. Регистрация текущей неравномерности вращения коленчатого вала, возникающей в следствие неидеальности протекания процессов, а также характеризующей наличие той или иной неисправности в цилиндре ДВС, является одним из самых информативных методов исследования показателей процессов, происходящих на стадиях преобразования теплотворной способности топлива, содержащейся в виде химических связей, в выделяемую при сгорании теплоту и далее, в механическую индикаторную работу.

Для расчета суммарных удельных тангенциальных сил с учетом влияющего отклонения параметра согласно разделу 2.4 необходимо провести тепловой расчет, расчет кинематики и динамики двигателя [42, 108-111], при этом используются следующие параметры ДВС (Таблица 3.1)

Таблица 3.1

Исходные параметры для расчета удельных тангенциальных сил 4, 6 и 12
цилиндровых ДВС

Параметр	Значение
N_e , [кВт]	0
n , [мин ⁻¹]	500
i	4, 6 или 12
e_δ	10
P_r , [МПа]	0,12
P_a , [МПа].	0,095
n_1	1,39
P_z , [МПа]	7,00
n_2	1,25
P_b , [МПа]	0,475
D , [мм]	131
S , [мм]	132
h_m	0,794
Тактность	4

λ_k	0,29
m_n , [кг/м ²]	100
$m_{ш}$, [кг/м ²]	150
Расположение цилиндров	Рядное
Угол развала цилиндров, [град]	0
Порядок работы цилиндров	153624
Нумерация цилиндров левого ряда	123456
Угол между кривошипами, [град]	120
Углы между вспышками, [град]	120
D_M , [м]	0,3
B_M , [м]	0,03

Так, например, для доли снижения давления в одном цилиндре двигателя, равной 5%, уравнение (13) примет вид:

$$P_{\text{роткл}}(\varphi) = P_r(\varphi) * (1 - K_{pr}) = P_r(\varphi) * 0,95 \quad (50)$$

А дальнейший расчет удельных тангенциальных сил производится по уравнениям (14-16), при этом суммарная удельная тангенциальная сила рассчитывается по уравнению (12) для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей с учетом фазы и порядка работы цилиндров двигателей. Градусы поворота коленчатого вала, соответствующие рабочим ходам в цилиндрах 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС, приведены в Таблице 3.2

Таблица 3.2

Интервалы поворота коленчатого вала 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей,
соответствующее рабочим ходам цилиндров

№ цилиндра	4 цилиндра [град]	6 цилиндров [град]	12 цилиндров [град]
1	360-540	360-480	360-420
2	180-360	120-240	120-180
3	540-720	600-720	600-660
4	0-180	240-360	240-300
5		480-600	480-540
6		0-120	0-60
7			420-480
8			180-240
9			660-720
10			300-360
11			540-600
12			60-120

Полученные расчетные значения сведены в Таблицу 1, приведенную в Приложении 1, а значения суммарных удельных тангенциальных сил при снижении давления в 1-ом цилиндре, составляющим 5%, для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей приведены в Таблице 2 Приложения 1.

Аналогичным образом производится расчет суммарной удельной тангенциальной силы и для долей снижения давления в 1-ом цилиндре, составляющих %: 10, 20, 30, 40, для указанных двигателей. Так на рис. 3.1 приведен

характер изменения суммарных удельных тангенциальных сил по углу поворота коленчатого вала при долях снижения давления в первом цилиндре равных %: 0, 5, 10, 20, 30, 40 у 4-х цилиндрового двигателя, на рис. 3.2 – у 6-ти цилиндрового двигателя, на рис. 3.3 – у 12-ти цилиндрового двигателя.

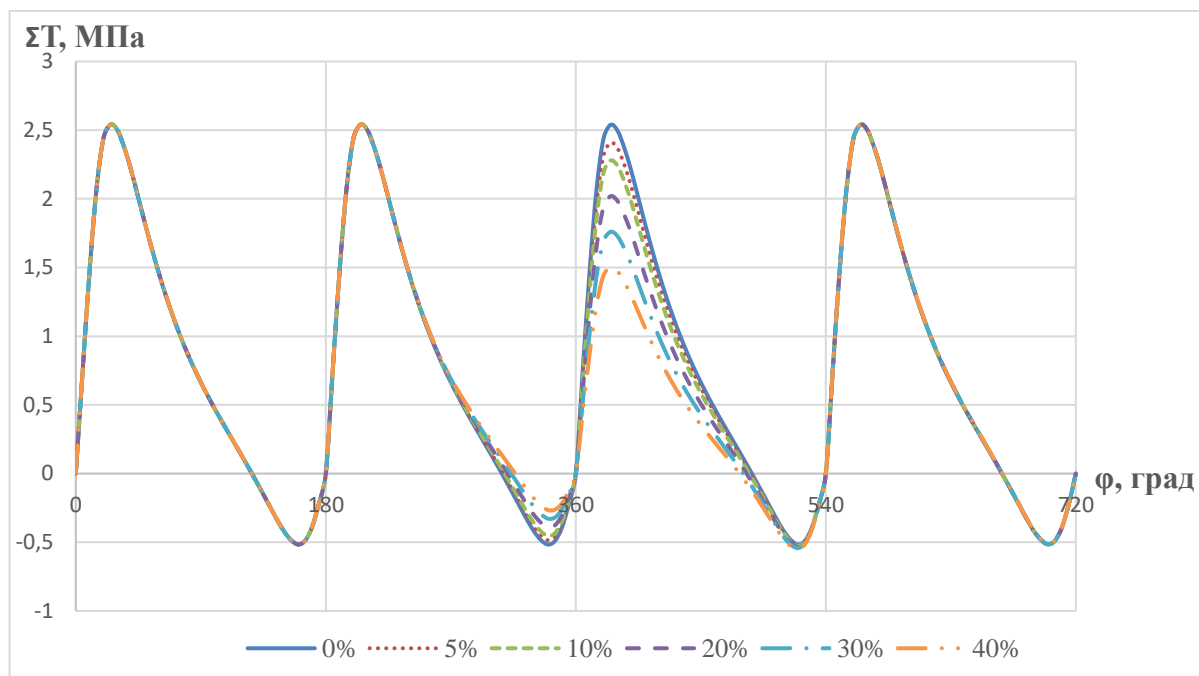


Рис. 3.1. Характер изменения суммарных удельных тангенциальных сил 4-х цилиндрового ДВС по углу поворота коленчатого вала при долях снижения давления в первом цилиндре равных %: 0, 5, 10, 20, 30, 40

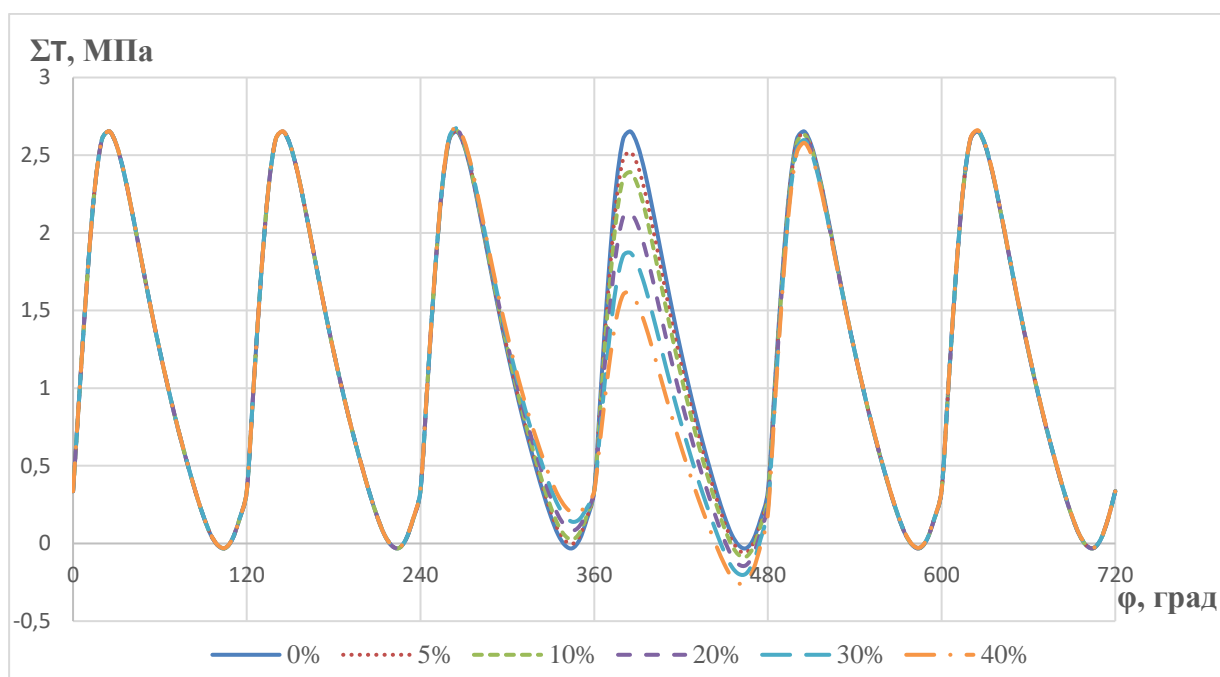


Рис. 3.2. Характер изменения суммарных удельных тангенциальных сил 6-ти цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала при долях снижения давления в первом цилиндре равных %: 0, 5, 10, 20, 30, 40.

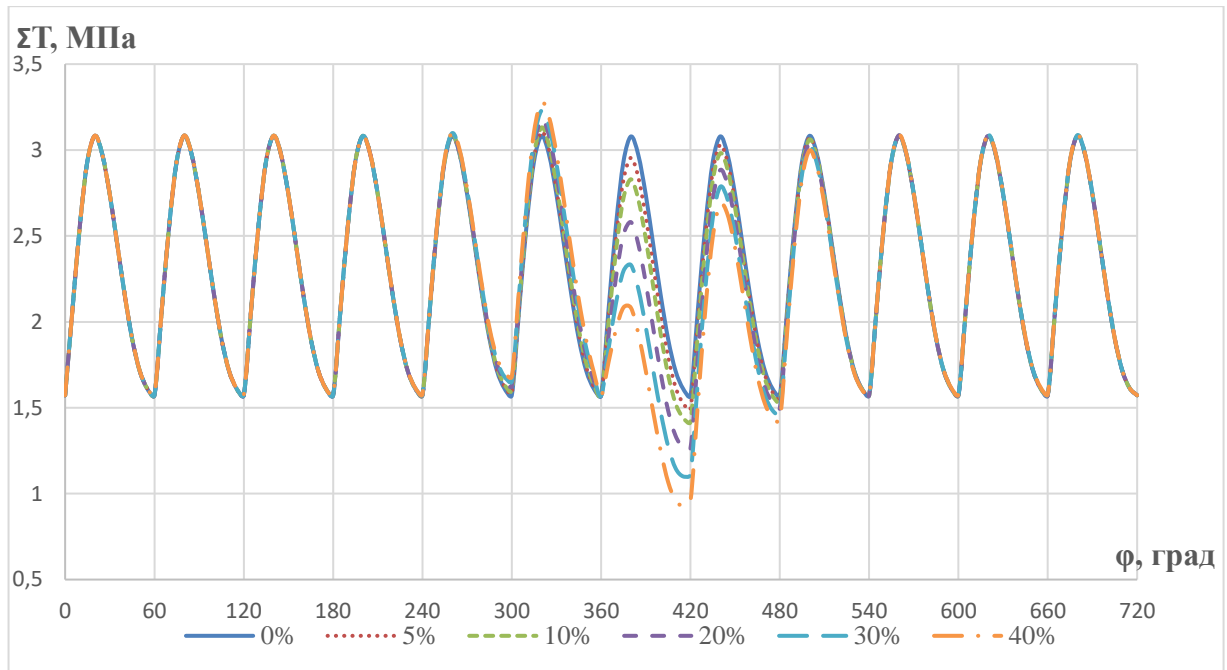


Рис. 3.3. Характер изменения суммарных удельных тангенциальных сил 12-ти цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала при долях снижения давления в первом цилиндре равных %: 0, 5, 10, 20, 30, 40.

Дальнейшая оценка влияния отклонения приведенных параметров проводится по среднеквадратическому отклонению, представляющему собой сумму квадратов разностей суммарной удельной тангенциальной силы при наличии неисправности и суммарной удельной тангенциальной силы исправного двигателя

$$\sigma_{\Sigma \Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_{\text{откл}}(\varphi) - T_{\text{без откл}}(\varphi))^2}{n}} \quad (51)$$

или запишем в виде

$$\sigma_{\Sigma \Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta T(\varphi))^2}{n}} \quad (52)$$

Для исследуемых двигателей отклонение от нормы $\Delta T(\varphi)$ представлено на рис. 3.4

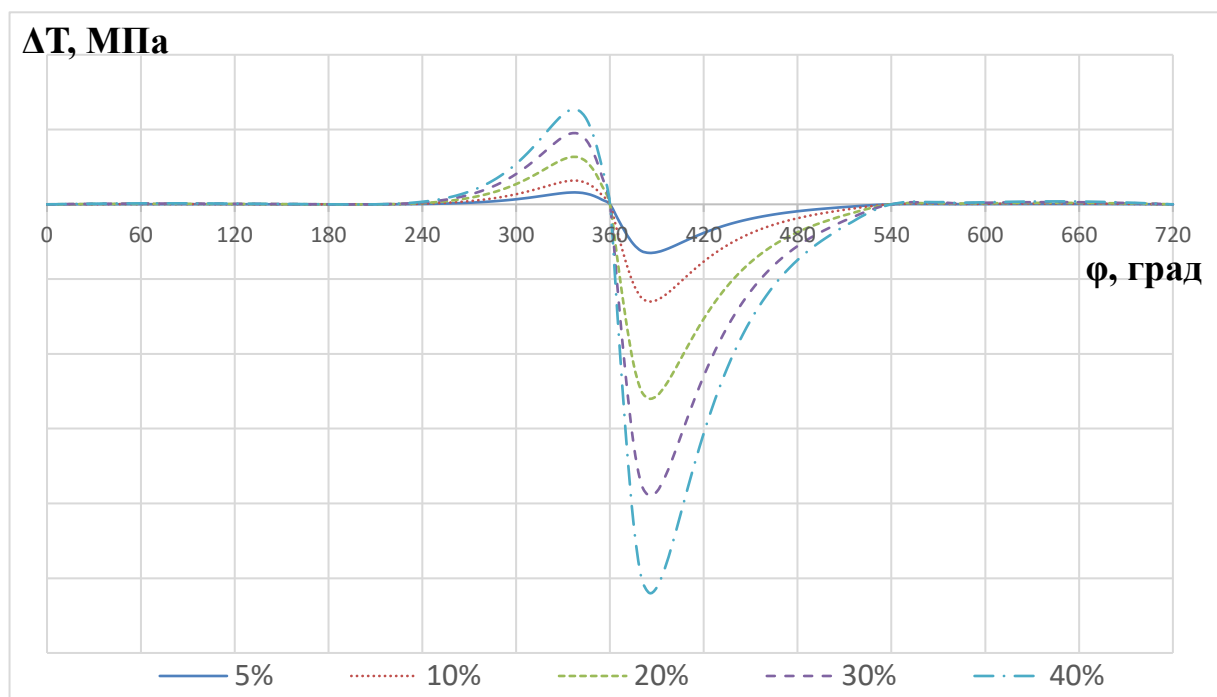


Рис. 3.4 Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы с учетом доли снижения давления в 1 цилиндре, составляющей %: 5, 10, 20, 30, 40, у 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей при 500 мин^{-1} .

Как видно из приведенных выше графиков, представленных на рис. 3.1-3.4, наибольшие отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемых двигателей проявляется в диапазоне от 360° до 540° угла поворота коленчатого вала, что соответствует такту рабочего хода в 1-ом цилиндре в соответствии с таблицей 3.2.

Значения среднеквадратического отклонения представлены в таблице 3.3

Таблица 3.3

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС при 500 мин^{-1}

Доля изменения давления K_{pr}	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$

	4 цилиндра [МПа]	6 цилиндров [МПа]	12 цилиндров [МПа]
5%	0,16	0,16	0,16
10%	0,63	0,64	0,63
20%	2,52	2,54	2,52
30%	5,67	5,70	5,67
40%	10,09	10,13	10,09

Для удобства анализа представим изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил в графическом виде рис. 3.5

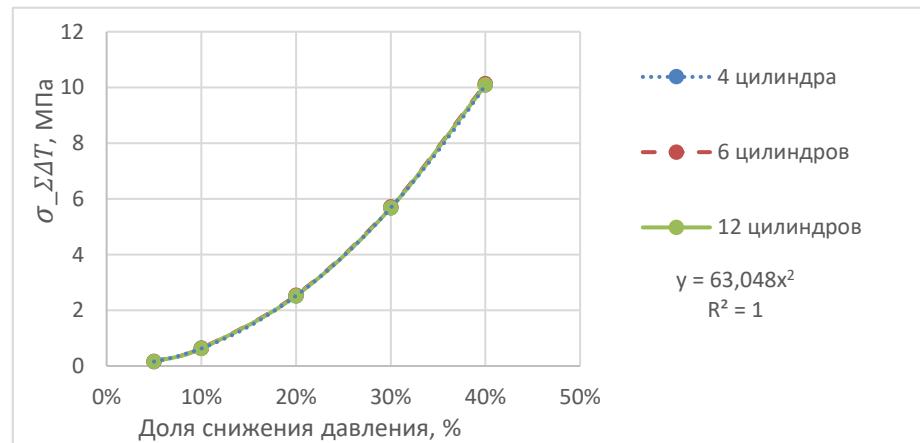


Рис. 3.5 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли снижения давления в 1-м цилиндре 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрового двигателей при 500 мин^{-1} .

Как видно из приведенных на рис. 3.5 графиков, изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли снижения давления в 1-м цилиндре не зависит от количества цилиндров в ДВС, при этом зависимость изменения среднеквадратического отклонения представляет собой квадратическую функцию $\sigma_{\Sigma\Delta T} = 63,048x^2$.

Аналогичным образом проводятся расчеты для определения влияния доли снижения давления в 1-ом цилиндре исследуемых двигателей на частотах вращения коленчатого вала равных 1500 мин-1 и 3000 мин-1. При этом расчетные значения среднеквадратического отклонения при 1500 мин-1 представлены в таблице 3.4, а при 3000 мин-1 представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.4

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС при 1500 мин-1

Доля изменения давления K_{pr}	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
5%	0,16	0,16	0,16
10%	0,63	0,643	0,63
20%	2,52	2,54	2,52
30%	5,67	5,70	5,67
40%	10,09	10,13	10,09

Для наглядности представим значения, приведенные в таблице 3.4 в графическом виде.

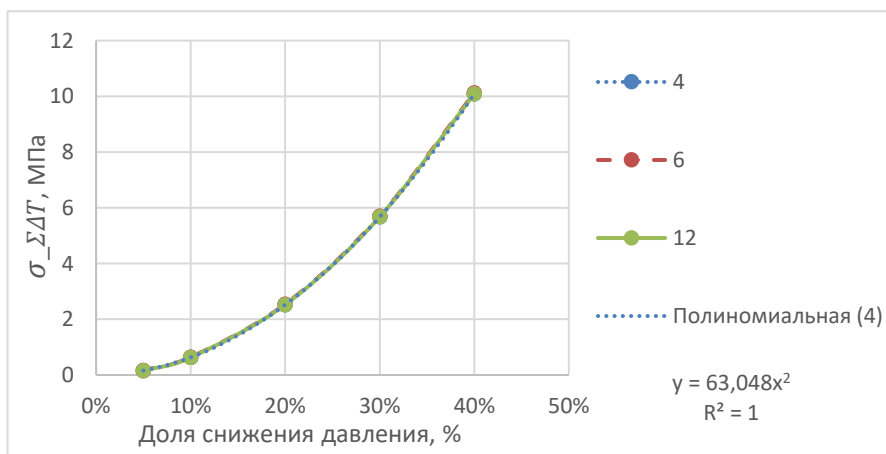


Рис. 3.6 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли снижения давления в 1-м цилиндре 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрового двигателей при 1500 мин⁻¹.

Таблица 3.5

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС при 3000 мин⁻¹

Доля изменения давления K_{pr}	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
5%	0,16	0,16	0,16
10%	0,63	0,64	0,64
20%	2,52	2,54	2,52
30%	5,67	5,7	5,7
40%	10,09	10,12	10,09

Представим приведенные значения в графическом виде.

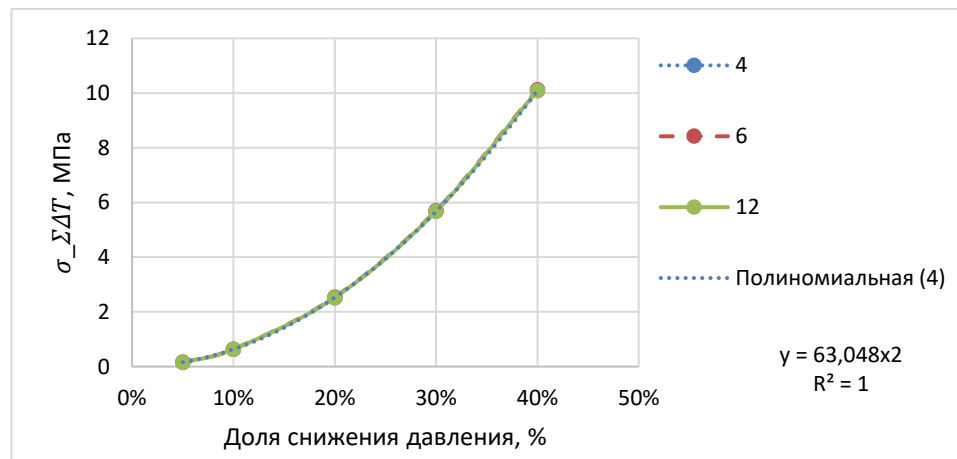


Рис. 3.7 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли снижения давления в 1-м цилиндре 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрового двигателей при 3000 мин⁻¹.

Исходя из приведенных графиков на рис. 3.6 и рис. 3.7, а также с учетом графика на рис. 2.5, можно сделать выводы о том, что:

1. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли снижения давления в 1-м цилиндре не зависит от количества цилиндров в ДВС, от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала.
2. Наибольшие отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемых двигателей проявляется в диапазоне от 360^0 до 540^0 угла поворота коленчатого вала, что соответствует такту рабочего хода в 1-ом цилиндре.
3. Аппроксимирующая функция изменения среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил не зависит от частоты вращения и нагрузки двигателя и представляет собой функцию $\sigma_{\Sigma \Delta T} = 63,048x^2$.

3.3 Расчетный анализ влияния изменения отклонения длины шатуна от нормы ($K_{ш}$) для 1-го цилиндра на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей по разработанной программе в Excel.

Для выбранного изменения отклонения длины шатуна от нормы ($K_{ш}$), составляющего от 1 до 5%, были проведены следующие расчетные исследования по зависимостям (21-23).

Полученные расчетные значения сведены в Таблицу 3, приведенную в Приложении 1, а значения суммарных удельных тангенциальных сил при изменении длины шатуна от нормы, составляющим 1%, для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей приведены в Таблице 4 Приложения 1.

Аналогичным образом производится расчет суммарной удельной тангенциальной силы и для долей изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %: 2, 3, 4, 5, для указанных двигателей. Так на рис. 3.8 приведен характер изменения суммарных удельных тангенциальных сил по углу поворота коленчатого вала при долях изменения длины шатуна первого цилиндра равных %:

0, 1, 2, 3, 4, 5 у 4-х цилиндрического двигателя, на рис. 3.9 – у 6-ти цилиндрического двигателя, на рис. 3.10 – у 12-ти цилиндрического двигателя.

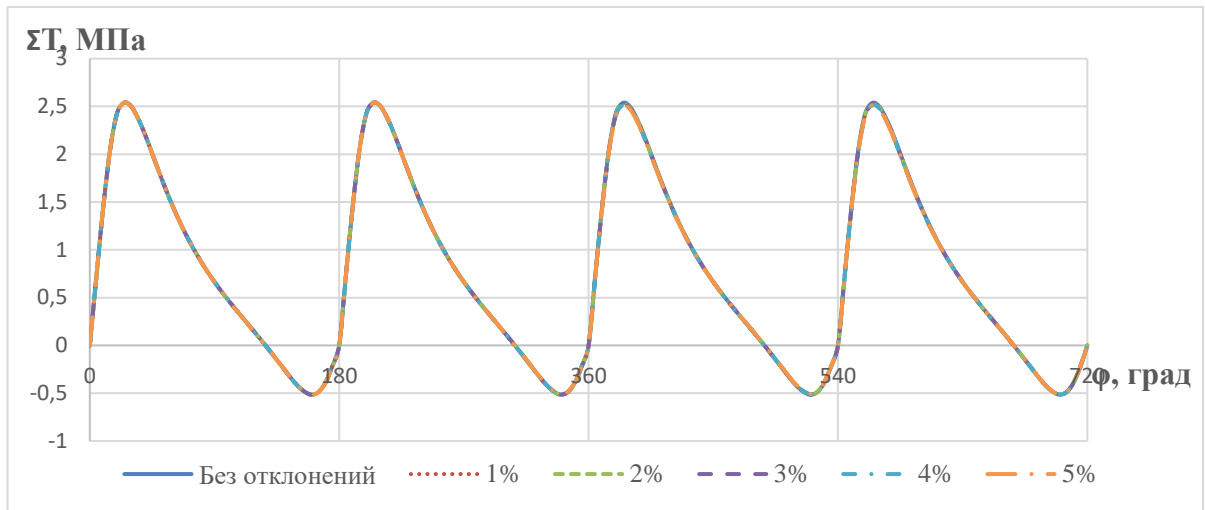


Рис. 3.8 Характер изменения ΣT 4-х цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала при долях изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %: 0, 1, 2, 3, 4, 5, и числе оборотов коленчатого вала равным 500 мин^{-1}

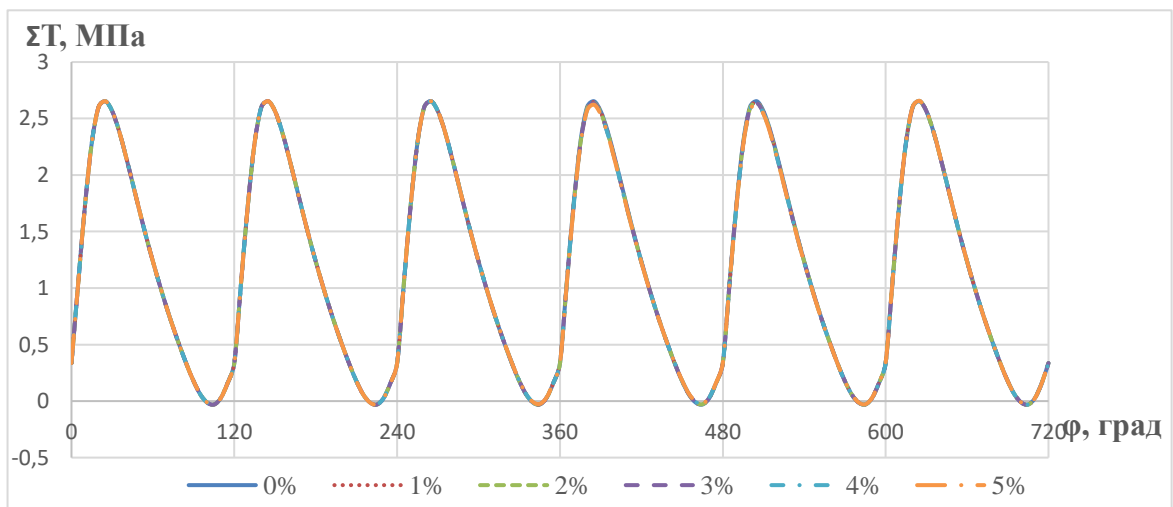


Рис. 3.9 Характер изменения ΣT 6-ти цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала при долях изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %: 0, 1, 2, 3, 4, 5, и числе оборотов коленчатого вала равным 500 мин^{-1}

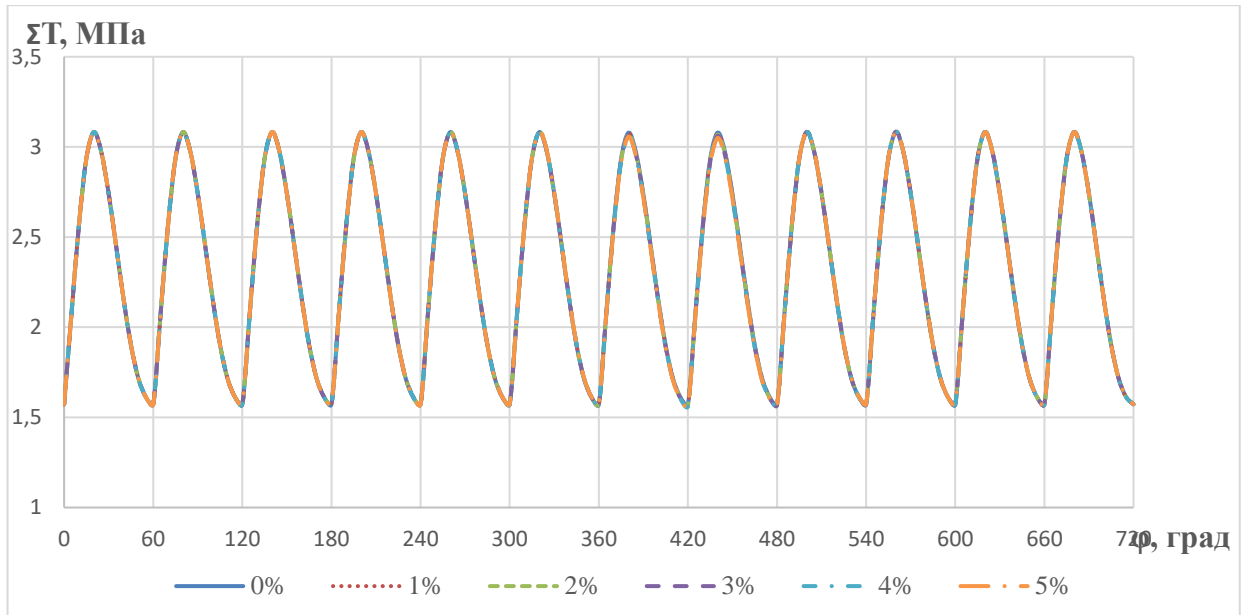


Рис. 3.10 Характер изменения ΣT 12-ти цилиндрического ДВС по углу поворота коленчатого вала при долях изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %:0, 1, 2, 3, 4, 5, и числе оборотов коленчатого вала равным 500 мин^{-1}

Для исследуемого 4-х цилиндрического двигателя отклонение от нормы $\Delta T(\varphi)$ представлено на рис. 3.11, для 6-ти цилиндрического – на рис. 3.12, для 12-ти цилиндрического – на рис. 3.13.

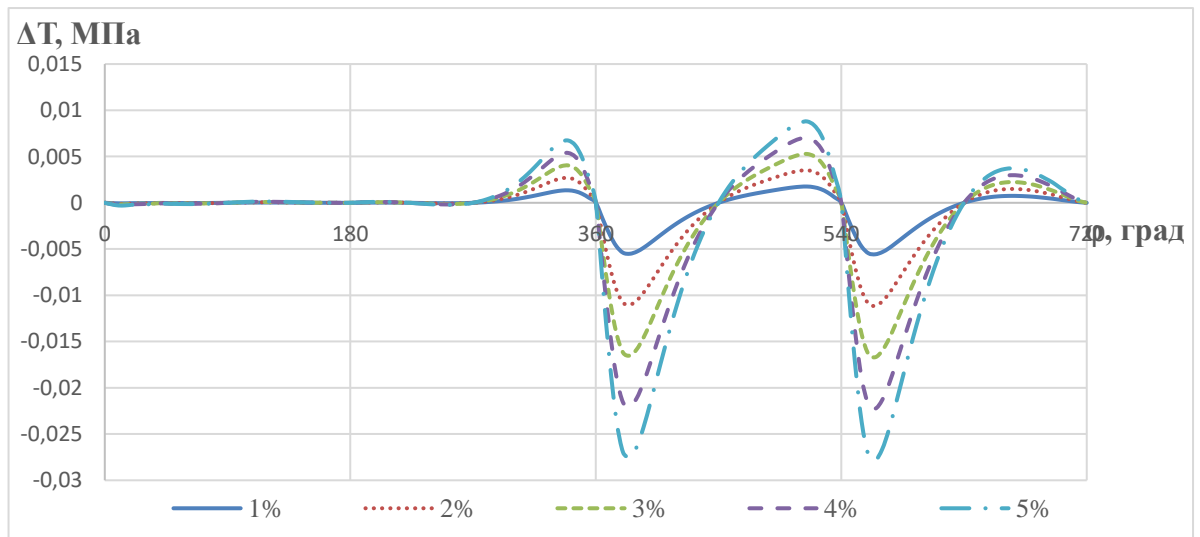


Рис. 3.11. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %:0, 1, 2, 3, 4, 5, для 4-х цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

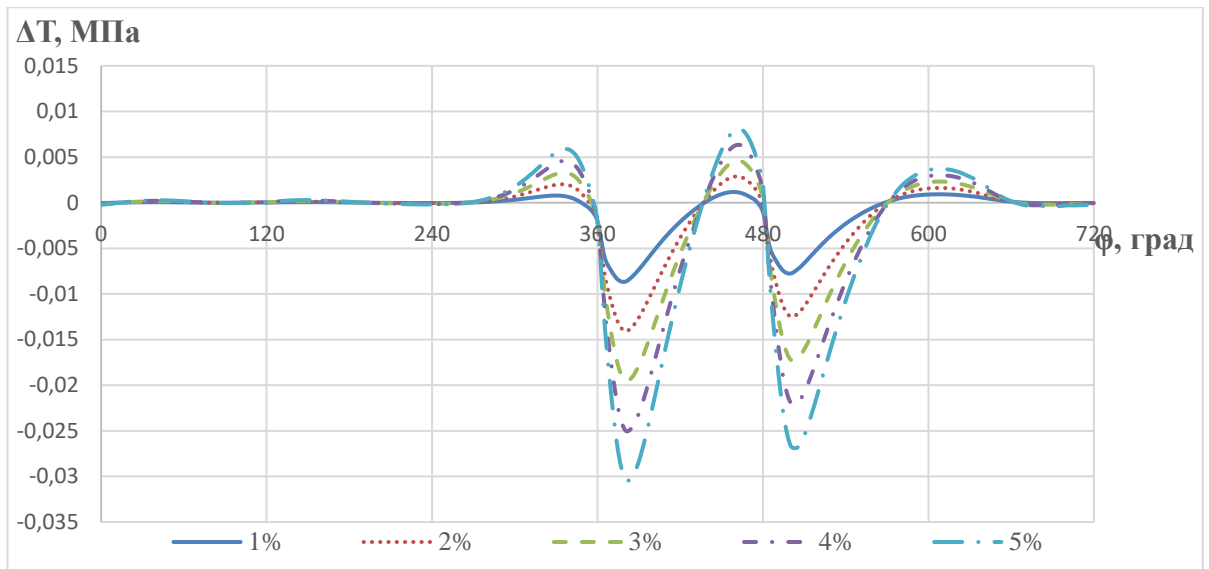


Рис. 3.12. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %:0, 1, 2, 3, 4, 5, для 6-ти цилиндрового двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

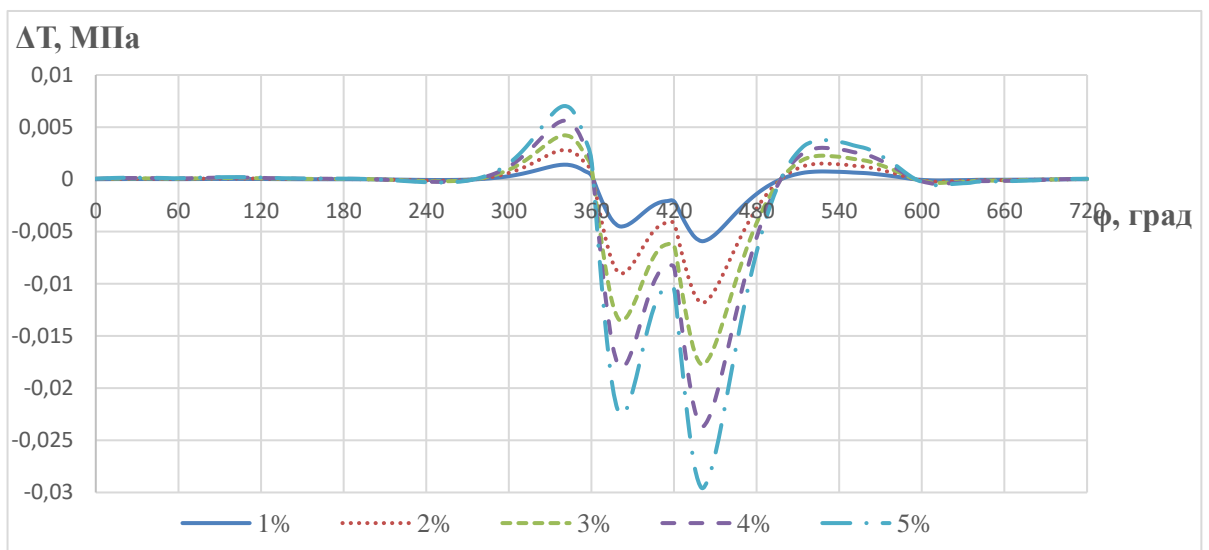


Рис. 3.13. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %:0, 1, 2, 3, 4, 5, для 12-ти цилиндрового двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

Как видно из приведенных выше графиков наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемых 6-ти и 12

цилиндровых двигателей проявляется при значениях угла поворота коленчатого вала, соответствующих такту рабочего хода 1-го цилиндра. У 4-х цилиндрового двигателя (рис. 3.11) наибольшие колебания отклонений соответствуют участку от 360° до 625° поворота коленчатого вала, что не позволяет однозначно определить неисправный цилиндр.

Значения среднеквадратического отклонения представлены в таблице 3.6

Таблица 3.6

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС при 500 мин-1

Доля изменения $K_{ш}$	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
0%	0	0	0
1%	0,0005	0,0009	0,0004
2%	0,0019	0,0024	0,0014
3%	0,0042	0,0047	0,0032
4%	0,0074	0,0078	0,0057
5%	0,0115	0,0116	0,009

Для удобства анализа представим изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил в графическом виде рис. 3.14

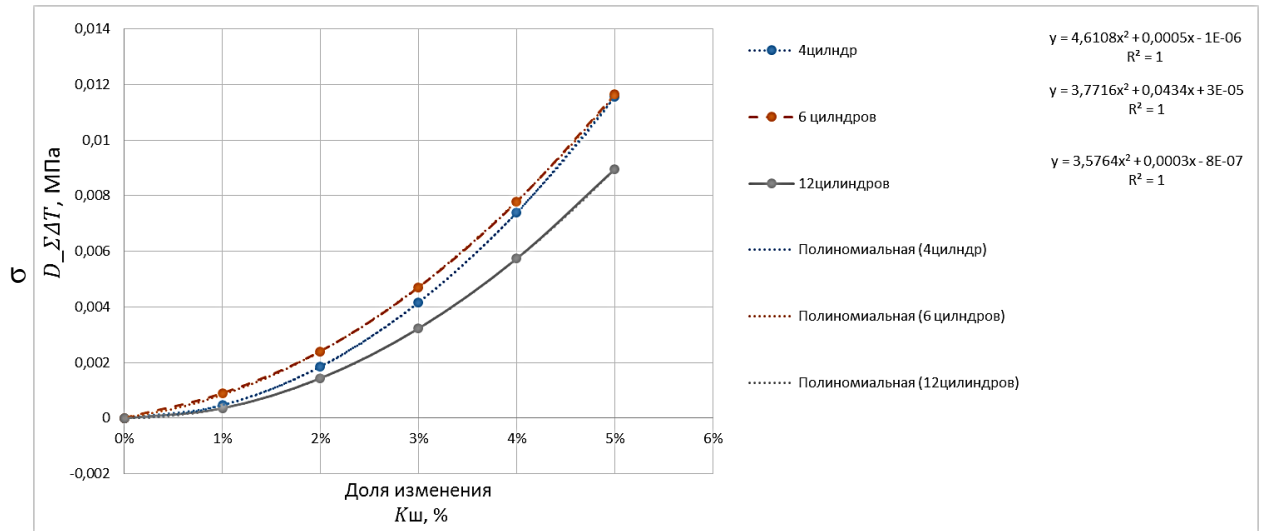


Рис. 3.14. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра для исследуемых двигателей при частоте вращения 500 мин^{-1}

Аналогичным образом проводятся расчеты и для режима, при котором обороты двигателей составляют 3000 мин^{-1} . Для исследуемого 4-х цилиндрового двигателя отклонение от нормы $\Delta T(\varphi)$ представлено на рис. 3.15, для 6-ти цилиндрового – на рис. 3.16, для 12-ти цилиндрового – на рис. 3.17.

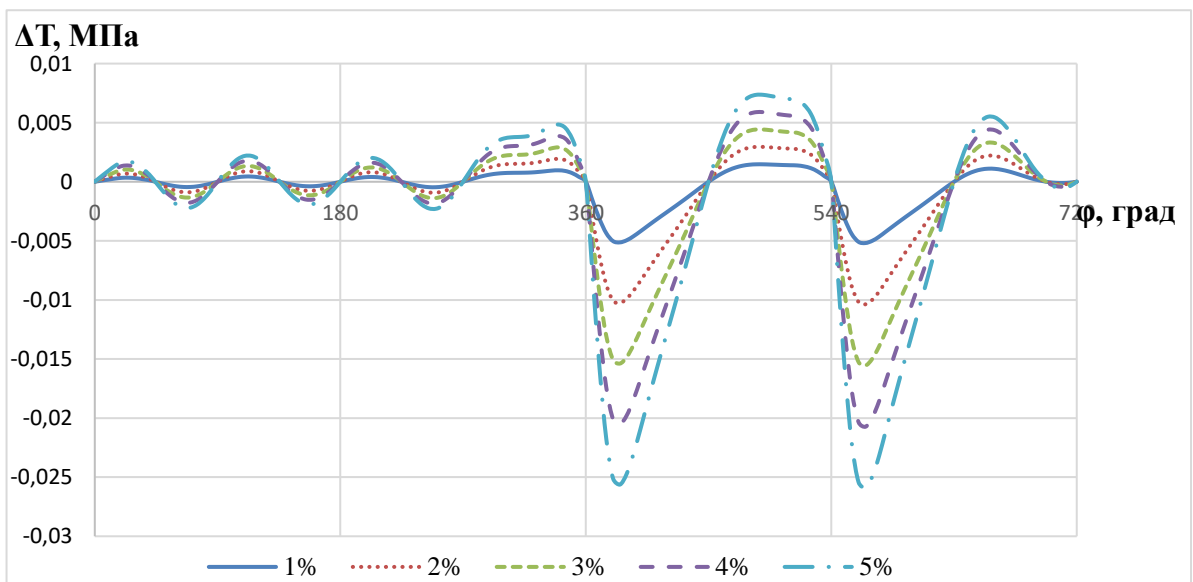


Рис. 3.15. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %: 1, 2, 3, 4, 5, для 4-х цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 3000 мин^{-1}

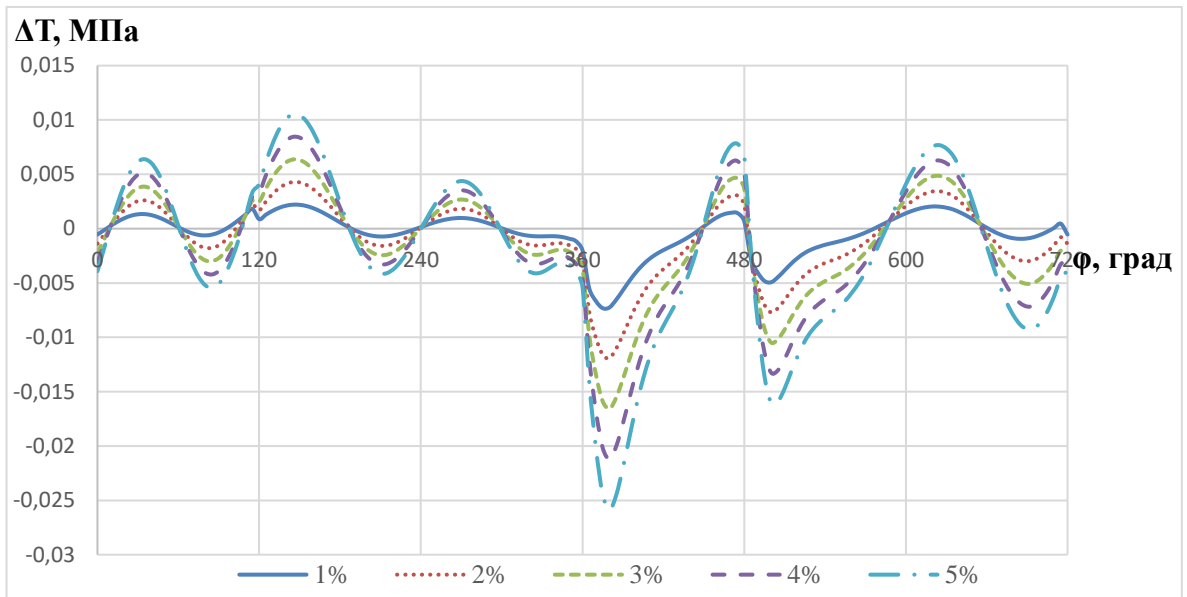


Рис. 3.16. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %: 1, 2, 3, 4, 5, для 6-ти цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 3000 мин^{-1}

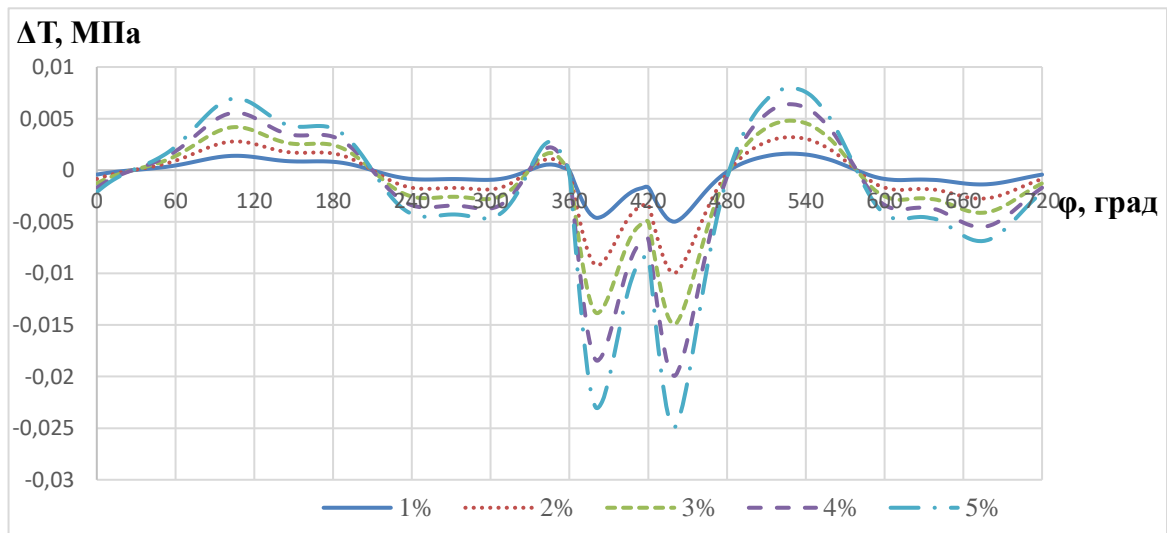


Рис. 3.17. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли изменения длины шатуна для 1-го цилиндра, составляющих %: 1, 2, 3, 4, 5, для 12-ти цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 3000 мин^{-1}

Из представленных на рис. 3.15-3.17 графиков видно, что для исследуемых 6-ти и 12-цилиндровых двигателей наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы проявляется при значениях угла поворота коленчатого вала, соответствующих такту рабочего хода 1-го цилиндра. У 4-х цилиндрового двигателя (рис. 3.15) наибольшие колебания отклонений соответствуют участку от 360^0 до 625^0 поворота коленчатого вала, что не позволяет однозначно определить неисправный цилиндр.

Значения среднеквадратического отклонения представлены в таблице 3.7

Таблица 3.7

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС

Доля изменения $K_{ш}$	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
0%	0	0	0
1%	0,0004	0,0006	0,0004
2%	0,0018	0,0017	0,0014
3%	0,004	0,0035	0,0032
4%	0,0071	0,0059	0,0056
5%	0,011	0,009	0,0088

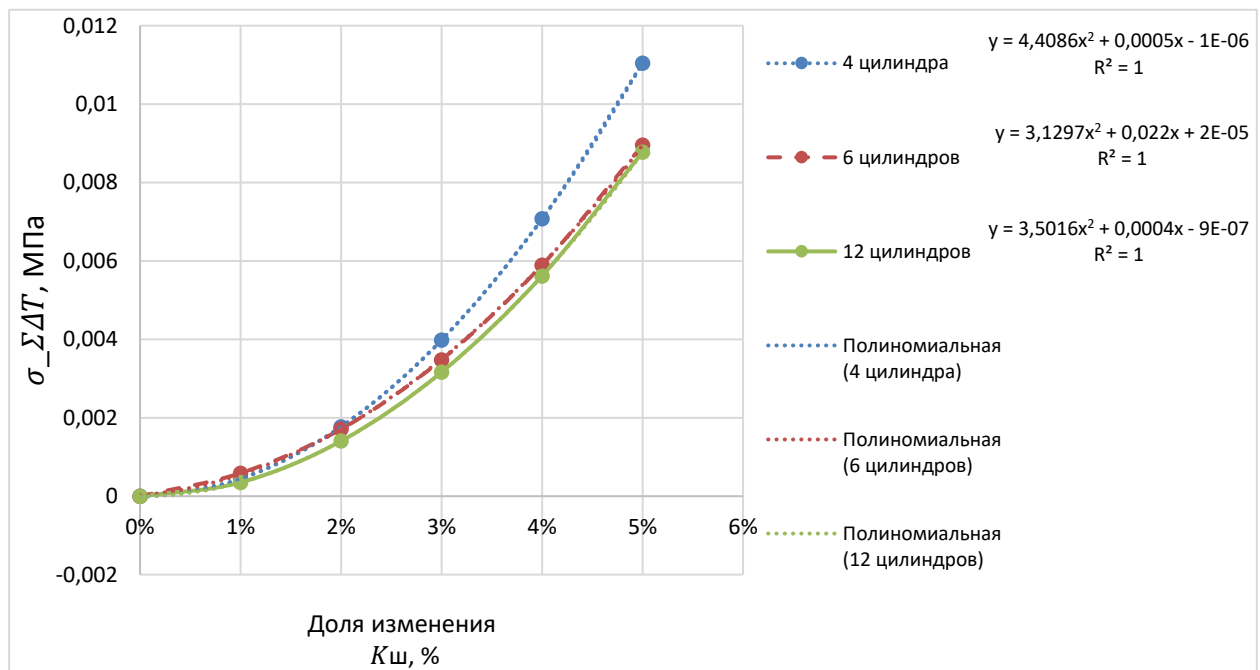


Рис. 3.18. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли изменения длины шатуна 1-го цилиндра от нормы для исследуемых двигателей при частоте вращения 3000 мин⁻¹

Оценим влияние доли изменения длины шатуна от нормы на изменения доли давления в цилиндре. Для этого рассчитаем долю влияния среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил при доле изменения длины шатуна 1-го цилиндра на среднеквадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил при доле изменения давления в цилиндре по формуле:

$$\delta_{\sigma_{\Sigma T}} = \frac{D\Sigma_{\Delta T_{ш}}}{D\Sigma_{\Delta T_{пр}}} * 100 \quad (53)$$

Расчеты показали, что при частоте вращения 500 мин⁻¹ доля влияния составляет для 4-х цилиндрового ДВС – 7,33%, для 6-ти цилиндрового ДВС – 7,13 % и для 12-ти – 5,68%. Доля влияния при частоте вращения 3000 мин⁻¹ для 4-х цилиндрового ДВС – 7%, 6-ти – 5,53%, 12-ти – 5,57%.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил при изменении длины шатуна 1-го цилиндра зависит как от количества цилиндров в ДВС, так и от частоты вращения коленчатого вала и нагрузки.
2. Для исследуемых 6-ти и 12 цилиндровых двигателей наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы проявляется при значениях угла поворота коленчатого вала, соответствующих такту рабочего хода 1-го цилиндра (от 360⁰ до 480⁰ ПКВ). У 4-х цилиндрового двигателя наибольшие колебания отклонений соответствуют участку от 360⁰ до 625⁰ поворота коленчатого вала, что не позволяет однозначно определить неисправный цилиндр.
3. При определении неисправности в цилиндре ДВС необходимо учитывать влияние изменения длины шатуна.

3.4 Расчетный анализ влияния изменения массы поршня (K_{mn}) поршневой группы на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей по разработанной программе в Excel.

Как указывалось в разделе 3.1 для анализа влияния изменения массы поршня K_{mn} на суммарную удельную тангенциальную силу выбираются следующие значения доли отклонения массы от 1% до 10%. При этом расчетные исследования проводятся по зависимостям (17-20).

Для исследуемого 4-х цилиндрового двигателя отклонение от нормы $\Delta T(\varphi)$ представлено на рис. 3.19, для 6-ти цилиндрового – на рис. 3.20, для 12-ти цилиндрового – на рис. 3.21.

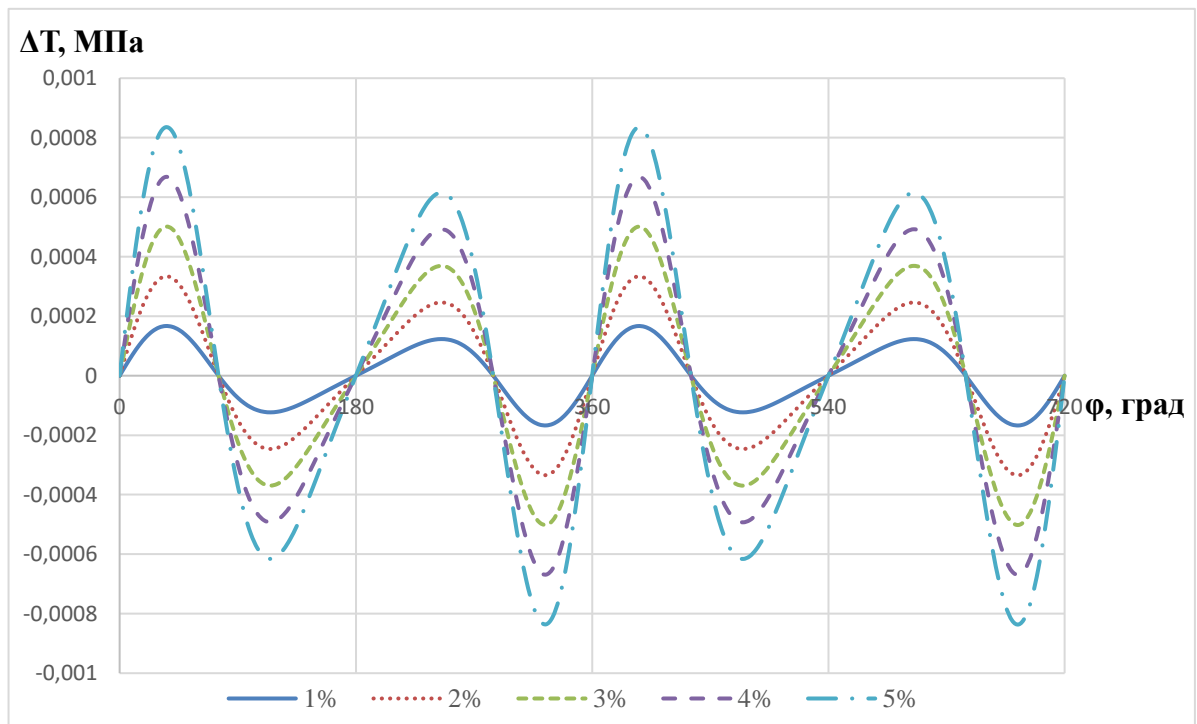


Рис. 3.19. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли отклонения массы поршня от нормы для 1-го цилиндра, составляющей %: 1, 2, 3, 4, 5, для 4-х цилиндрового двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

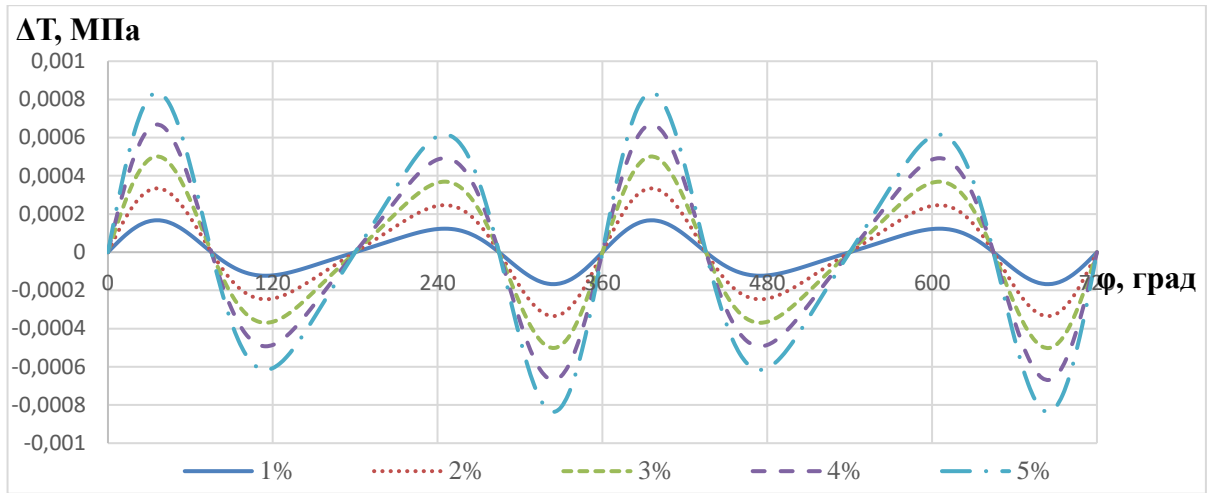


Рис. 3.20. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли отклонения массы поршня от нормы для 1-го цилиндра, составляющей %: 1, 2, 3, 4, 5, для 6-ти цилиндрового двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

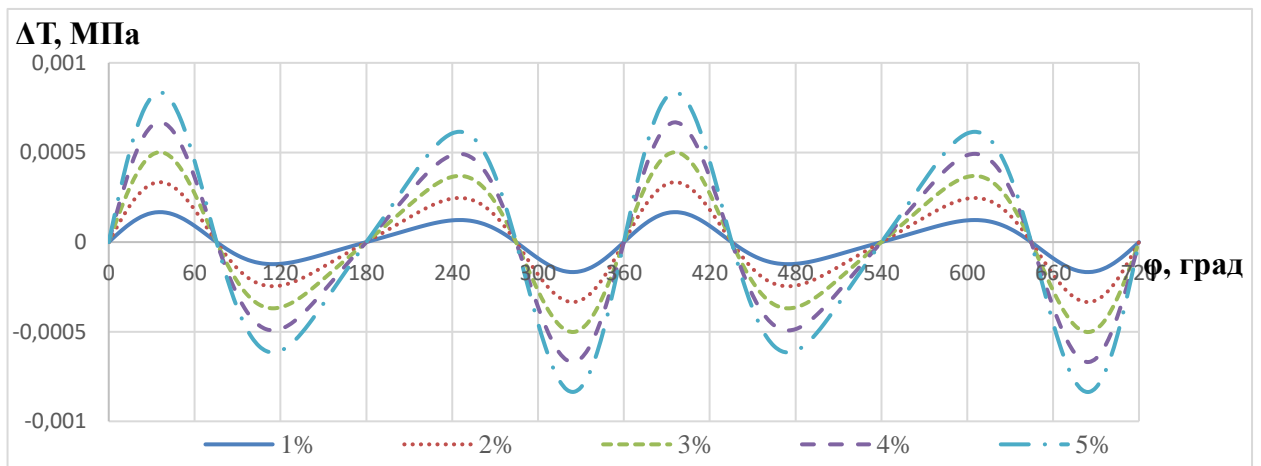


Рис. 3.21. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом доли отклонения массы поршня от нормы для 1-го цилиндра, составляющей %: 1, 2, 3, 4, 5, для 12-ти цилиндрового двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

Из представленных на рис. 3.19-3.21 графиков видно, что для исследуемых 4-х, 6-ти и 12 цилиндровых двигателей отклонения суммарной удельной тангенциальной силы проявляются на всем цикле работы ДВС, что не позволяет однозначно определить неисправный цилиндр.

Значения среднеквадратического отклонения представлены в таблице 3.8

Таблица 3.8

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС

Доля изменения $K_{мп}$	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
0%	0	0	0
1%	1,4246E-06	1,4246E-06	1,4246E-06
2%	5,6984E-06	5,69842E-06	5,69842E-06
3%	1,2821E-05	1,28214E-05	1,28214E-05
4%	2,2794E-05	2,27937E-05	2,27937E-05
5%	3,5615E-05	3,56151E-05	3,56151E-05

Значения среднеквадратического отклонения, приведенные в Таблице 3.8, представлены в графическом виде на рис. 3.22.

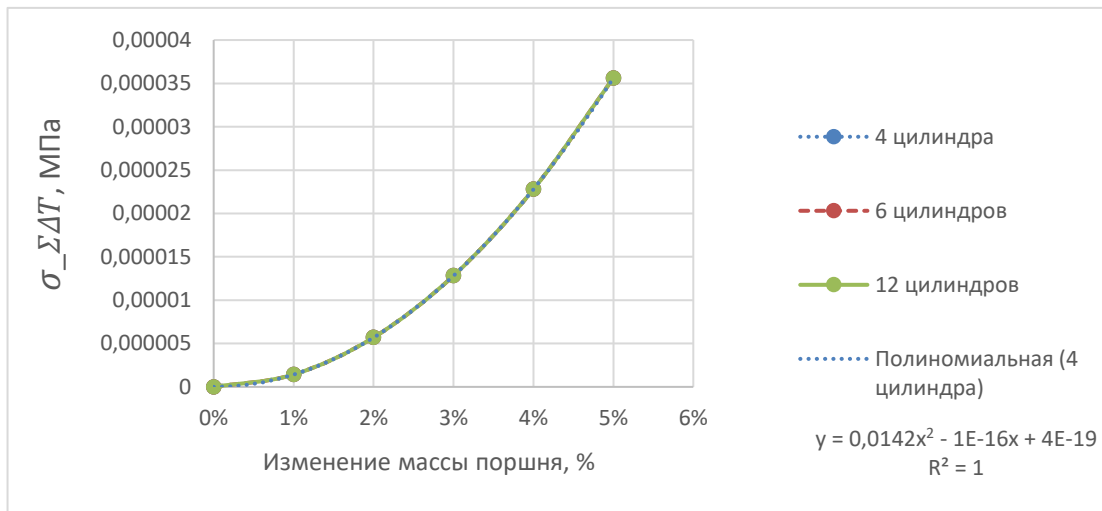


Рис. 3.22. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли изменения массы поршня для исследуемых двигателей при частоте вращения 500 мин⁻¹

Как видно из рис. 3.22 отклонение суммарной удельной тангенциальной силы при отклонении массы поршня не зависит от количества цилиндров двигателя. Таким образом, дальнейшие расчеты можно производить для одноцилиндрового двигателя, а влияние изменения массы поршня на удельную тангенциальную силу будет исследоваться при условии изменения оборотов двигателя от 500 мин⁻¹ до 3000 мин⁻¹ с шагом 500 мин⁻¹. Полученные расчетные данные изменения среднеквадратического отклонения удельных тангенциальных сил от доли изменения массы поршня при частотах 500-3000 мин⁻¹ сведены в таблицу 3.9

Таблица 3.9

Значения среднеквадратического отклонения для одноцилиндрового ДВС

Доля изменения массы	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 500 мин ⁻¹ [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 1000 мин ⁻¹ [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 1500 мин ⁻¹ [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 2000 мин ⁻¹ [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 2500 мин ⁻¹ [МПа]	$\sigma_{\Sigma \Delta T}$ 3000 мин ⁻¹ [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0
1%	8,0726E-05	2,27937E-05	0,000145778	0,00034913	0,00081139	0,00184629
2%	8,0139E-05	9,11747E-05	0,000445056	0,00135495	0,00333476	0,00738515
3%	8,24E-05	0,000205143	0,000975119	0,00309017	0,00763888	0,01661659
4%	8,7511E-05	0,000364699	0,001735969	0,00555478	0,01372376	0,0295406
5%	9,5471E-05	0,000569842	0,002727605	0,00874879	0,0215894	0,04615718
6%	0,00010628	0,000820572	0,003950026	0,01267221	0,03123578	0,06646635
7%	0,00011994	0,00111689	0,005403234	0,01732501	0,04266293	0,09046808
8%	0,00013645	0,001458795	0,007087227	0,02270722	0,05587083	0,11816239
9%	0,0001558	0,001846287	0,009002006	0,02881882	0,07085949	0,14954928
10%	0,00017801	0,002279367	0,011147572	0,03565982	0,0876289	0,18462874

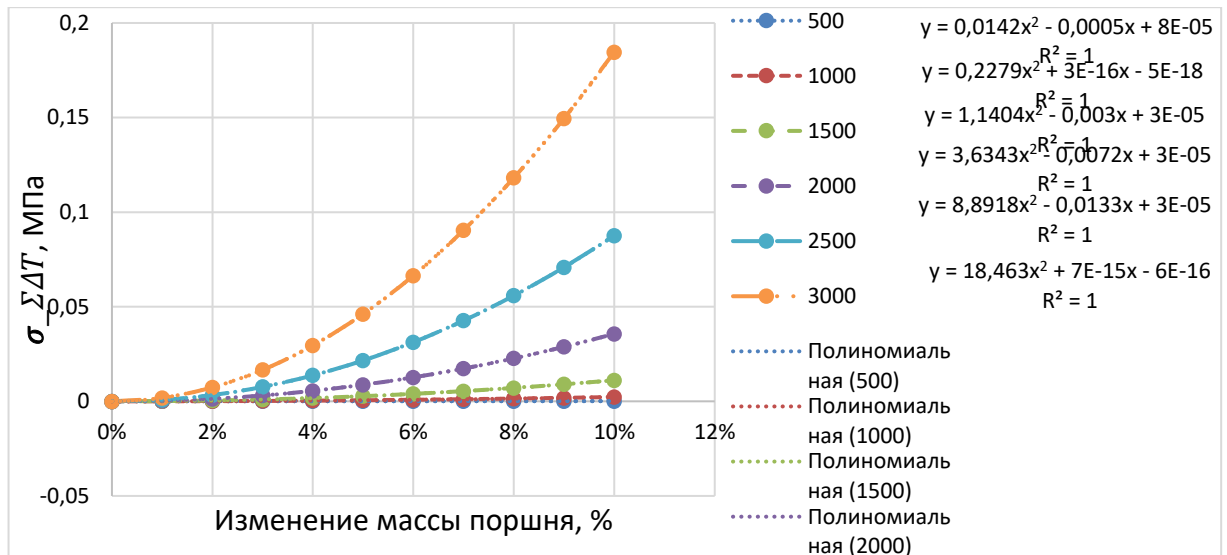


Рис. 3.23. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли изменения массы поршня для одноцилиндрового двигателя при частотах вращения 500-3000 мин⁻¹

Оценим влияние доли изменения массы поршня на изменение доли давления в цилиндре. Для этого рассчитаем какую долю составляет среднеквадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил при доле изменения массы поршня 1-го цилиндра от среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил при доле изменения давления в 1-м цилиндре по известной зависимости.

Расчеты показали, что при частоте вращения 500 мин⁻¹ доля влияния составляет для 4-х цилиндрового ДВС – 0,023%, для 6-ти цилиндрового ДВС – 0,022 % и для 12-ти – 0,023% от доли снижения давления. Исходя из приведенных расчетных значений можно сделать вывод о том, что изменение массы поршня 1-го цилиндра оказывает незначительное влияние на среднеквадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил при снижении давления в 1-м цилиндре многоцилиндрового ДВС и ей можно пренебречь.

Таким образом, с учетом приведенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил при изменении массы поршня в 1-м цилиндре не зависит от количества цилиндров в ДВС и от нагрузки.
2. Изменение массы поршня 1-го цилиндра оказывает влияние на отклонения суммарной удельной тангенциальной силы во всем исследуемом диапазоне работы ДВС.
3. Изменение массы поршня 1-го цилиндра оказывает незначительное влияние на среднеквадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил при снижении давления в 1-м цилиндре многоцилиндрового ДВС и ей можно пренебречь.

3.5 Расчетный анализ влияния отклонения угла кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$) на суммарную удельную тангенциальную силу для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей по разработанной программе в Excel

Для выбранного отклонения угла φ кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего от 0,5 до 4 градусов, были проведены следующие расчетные исследования по зависимости (24).

Для исследуемого 4-х цилиндрового двигателя отклонение от нормы $\Delta T(\varphi)$ при 500 мин⁻¹ представлено на рис. 3.24, для 6-ти цилиндрового – на рис. 3.25, для 12-ти цилиндрового – на рис. 3.26.

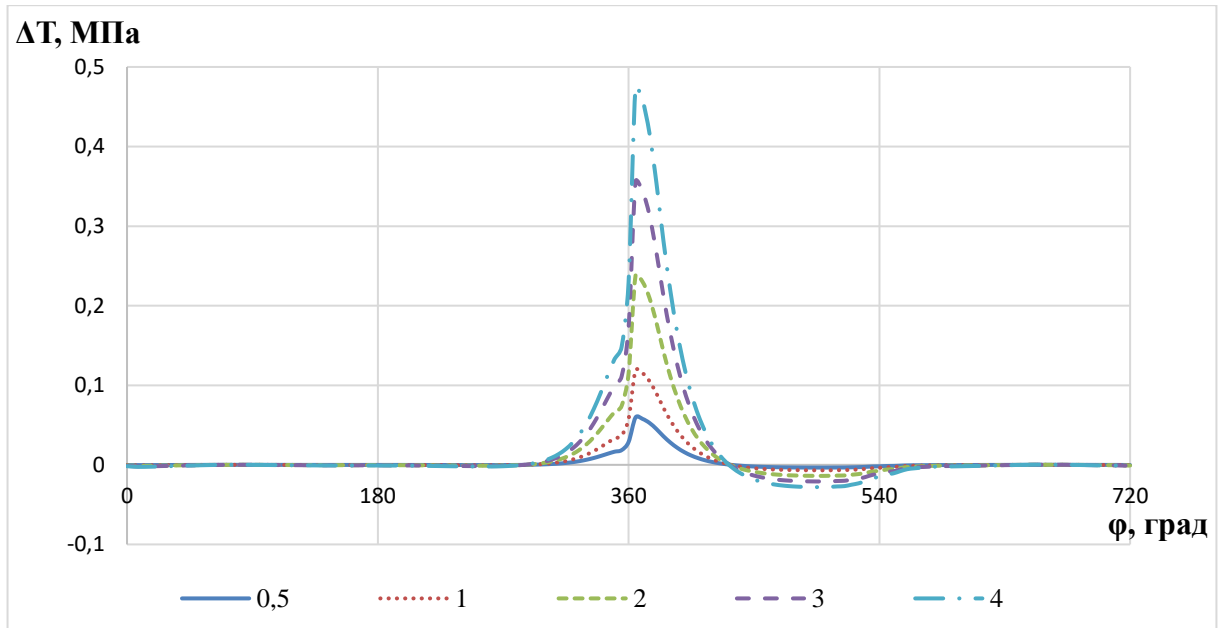


Рис. 3.24. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом отклонения угла 1-го кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего 0,5, 1, 2, 3, 4 градуса для 4-х цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

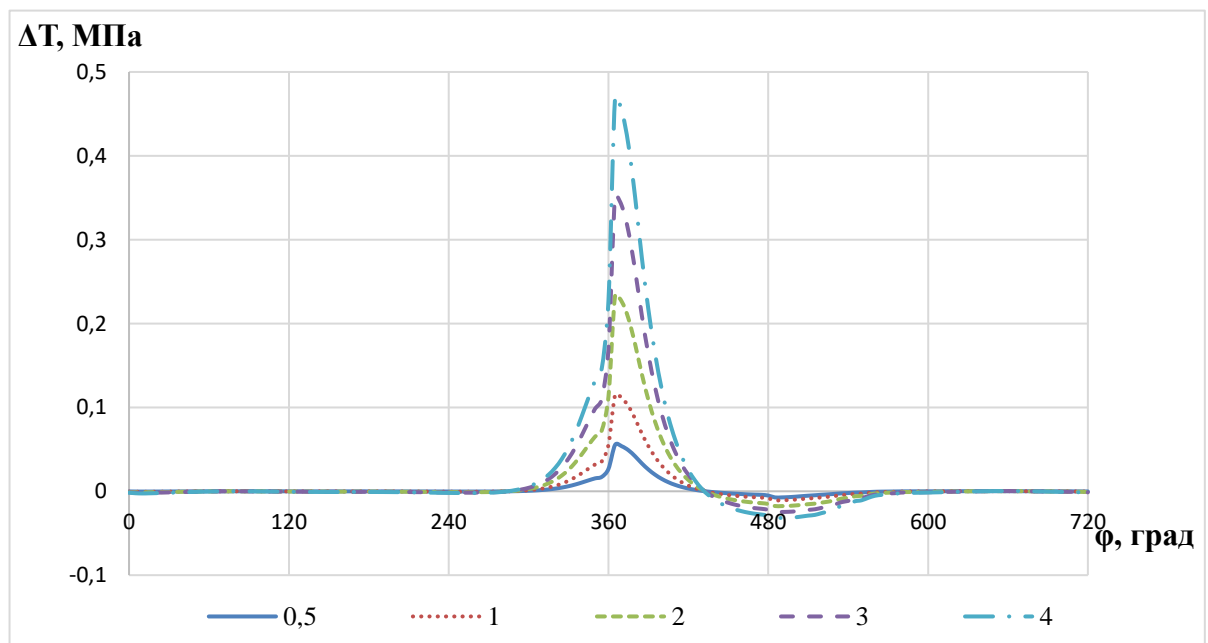


Рис. 3.25. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом отклонения угла 1-го кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего 0,5, 1, 2, 3, 4 градуса для 6-ти цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

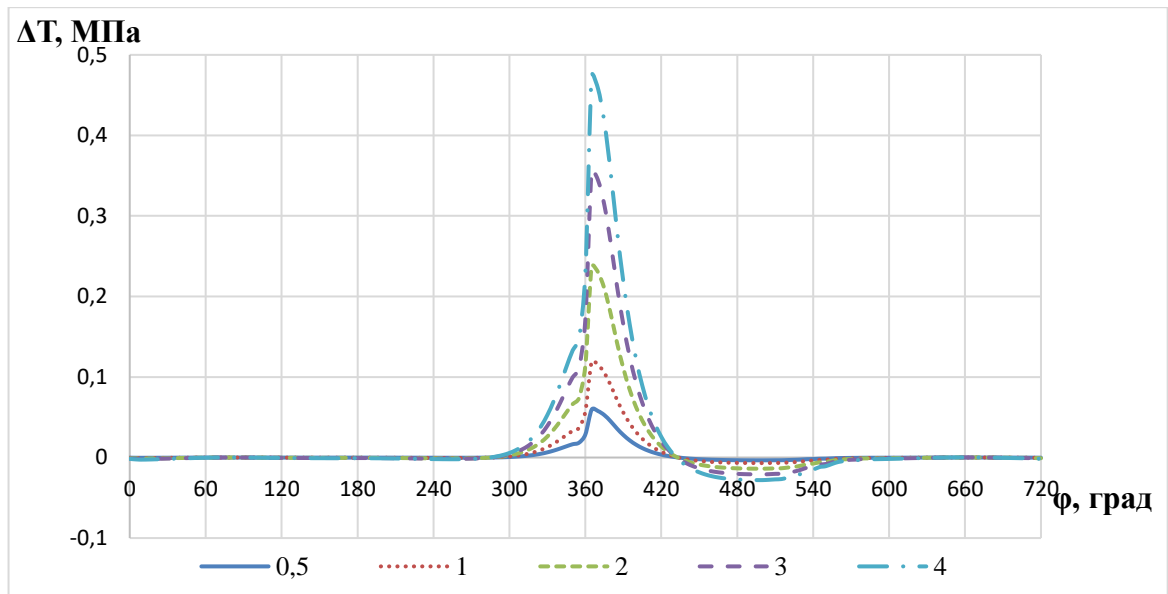


Рис. 3.26. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом отклонения угла 1-го кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего 0.5, 1, 2, 3, 4 градуса для 12-ти цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 500 мин^{-1}

Для исследуемого 4-х цилиндрического двигателя отклонение от нормы $\Delta T(\varphi)$ при 3000 мин^{-1} представлено на рис. 3.27, для 6-ти цилиндрического – на рис. 3.28, для 12-ти цилиндрического – на рис. 3.29.

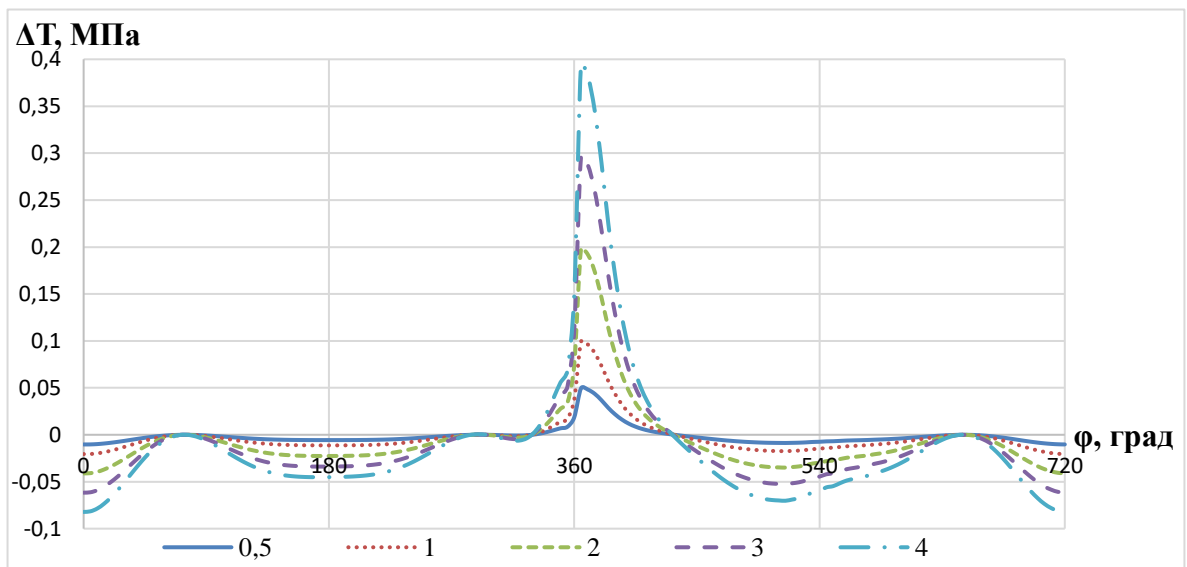


Рис. 3.27. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом отклонения угла 1-го кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего 0,5, 1, 2, 3, 4 градуса для 4-х цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 3000 мин^{-1}

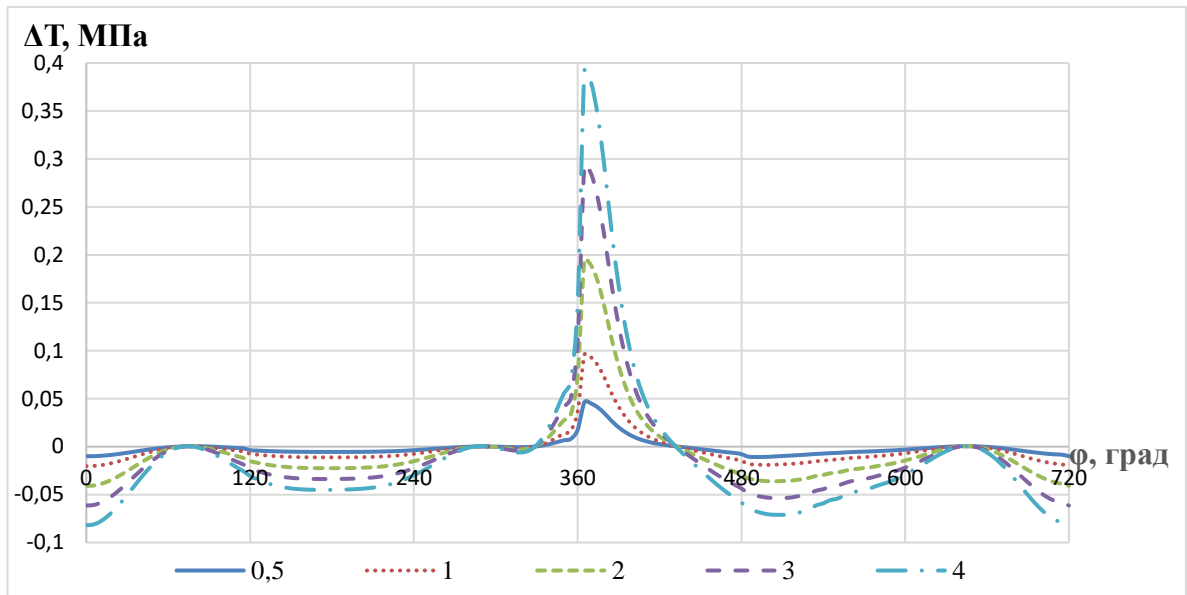


Рис. 3.28. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом отклонения угла 1-го кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего 0,5, 1, 2, 3, 4 градуса для 6-ти цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 3000 мин^{-1}

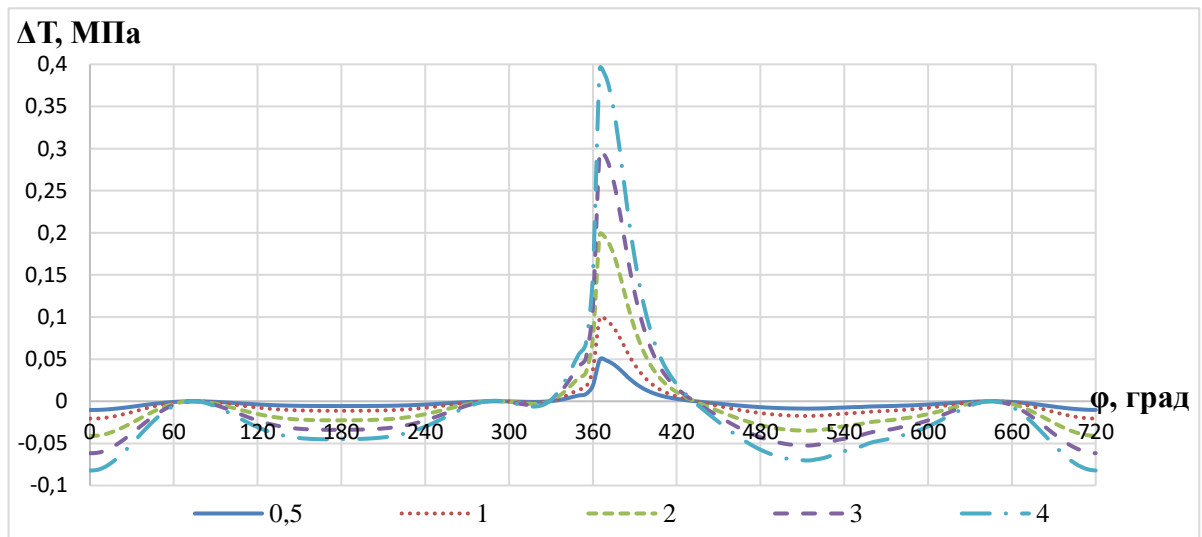


Рис. 3.28. Отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы $\Delta T(\varphi)$ с учетом отклонения угла 1-го кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$), составляющего 0,5, 1, 2, 3, 4 градуса для 12-ти цилиндрического двигателя, и числе оборотов коленчатого вала 3000 мин^{-1}

Как видно из приведенных выше графиков наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемых двигателей проявляется при значениях угла около 370^0 поворота коленчатого вала, соответствующих такту рабочего хода 1-го цилиндра.

Полученные расчетные значения среднеквадратического отклонения при 500 мин⁻¹ представлены в таблице 3.10

Таблица 3.10

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндровых ДВС при 500 мин⁻¹

$\Delta\varphi$ градусов	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
0	0	0	0
0,5	0,017	0,015	0,017
1	0,067	0,063	0,067
2	0,267	0,258	0,267
3	0,597	0,584	0,597
4	1,054	1,037	1,054

Представим полученные значения в графическом виде (рис. 3.30)

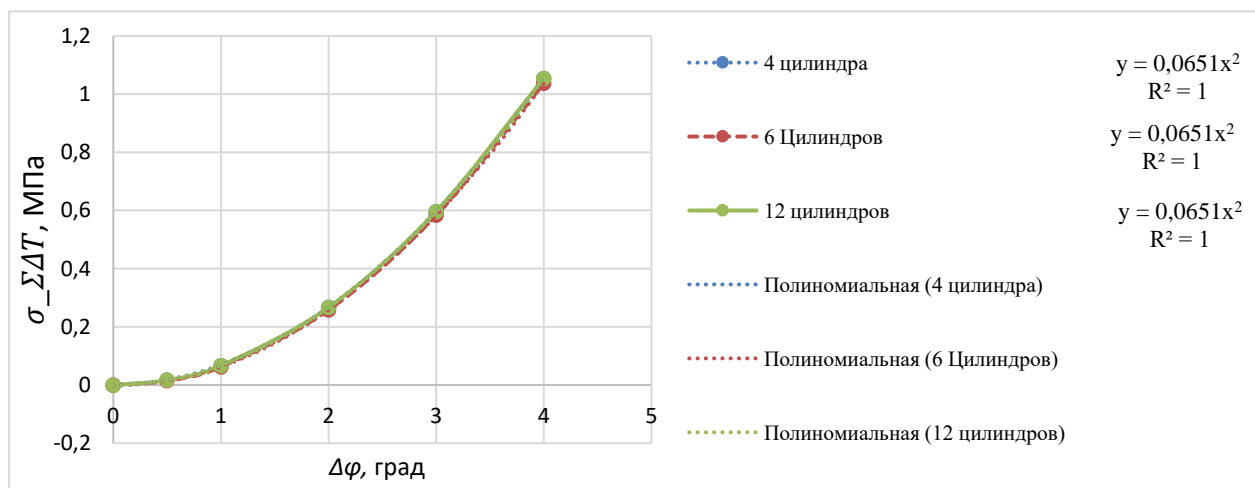


Рис. 3.30. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил в зависимости от изменения угла отклонения кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$) при частоте вращения 500 1 мин⁻¹

Полученные расчетные значения среднеквадратического отклонения при 3000 мин⁻¹ представлены в таблице 3.11

Таблица 3.11

Значения среднеквадратического отклонения 4, 6 и 12-ти цилиндрических ДВС при 3000 мин⁻¹

$\Delta\varphi$ градусов	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 4 цилиндра [МПа]	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 6 цилиндров [МПа]	$\sigma_{\Sigma\Delta T}$ 12 цилиндров [МПа]
0	0	0	0
0,5	0,014	0,012	0,014
1	0,055	0,052	0,055
2	0,219	0,213	0,219
3	0,49	0,481	0,49
4	0,87	0,854	0,87

Представим полученные значения, приведенные в Таблице 3.11, в графическом виде (рис. 3.31)

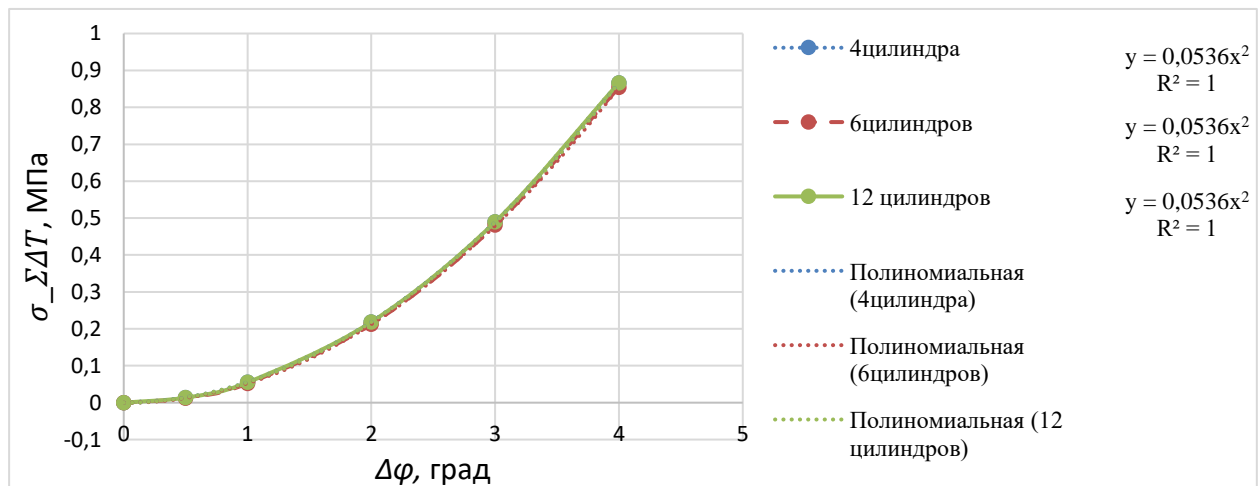


Рис. 3.31. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил в зависимости от изменения угла отклонения кривошипа от нормы ($\Delta\varphi$) при частоте вращения 3000 мин⁻¹

Оценим влияние изменение угла отклонения кривошипа от нормы на изменение доли давления в цилиндре. Для этого рассчитаем долю влияния среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил при изменении угла отклонения кривошипа от нормы 1-го цилиндра на среднеквадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил при доле изменения давления в 1-м цилиндре по известной зависимости.

Расчеты показали, что при частоте вращения 500 мин^{-1} доля влияния составляет для 4-х цилиндрового ДВС – 10,67%, для 6-ти цилиндрового ДВС – 9,07 % и для 12-ти – 10,67 %. Доля влияния при частоте вращения 3000 мин^{-1} для 4-х цилиндрового ДВС – 8,73 %, 6-ти – 7,6 %, 12-ти – 8,73 %.

Таким образом, с учетом приведенного выше можно сделать следующие выводы:

1. Наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемых двигателей проявляется при значениях угла поворота коленчатого вала около 370^0 , что соответствует такту рабочего хода 1-го цилиндра. То есть возможно определить в каком цилиндре многоцилиндрового двигателя проявляется неисправность.
2. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил при изменении угла отклонения кривошипа от нормы 1-го цилиндра не зависит от количества цилиндров в ДВС, а зависит от изменения частоты вращения коленчатого вала и нагрузки ДВС.
3. При определении неисправности в цилиндре ДВС необходимо учитывать влияние угла отклонения кривошипа от нормы.

3.6 Расчетный анализ значений суммарной удельной тангенциальной силы с учетом влияющего параметра по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра

Приведенные в разделах 3.2-3.5 расчетные анализы влияния различных параметров (факторов) на отклонения удельной тангенциальной силы проводились при условии известности для исследователя значений «нормальной» удельной тангенциальной силы для исследуемых двигателей, то есть тех значений, при которых двигатель считается полностью исправным. Однако на практике получение информации об этих силах без отклонений представляется затруднительным, так как для каждой модели двигателя необходимо получать информацию о силах без отклонений для проведения дальнейшего сравнительного анализа.

Таким образом, при проведении исследований с целью определения той или иной неисправности двигателя с возможностью локализации проявившейся неисправности предлагается обрабатывать значения суммарной удельной тангенциальной силы по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра, а именно с разделением цикла 720° на число цилиндров исследуемого двигателя, а за уровень сравнения брать среднее арифметическое значение по различным участкам и определять отклонения от него по каждому участку. При этом расчет среднеквадратического отклонения, проводимого по зависимостям (42-43) примет вид:

$$T_{cp}(\varphi) = \sum_{x=1}^i \frac{T_{откл} \left(\varphi + \frac{720}{i} \cdot (x - 1) \right)}{i} \quad (54)$$

$$\sigma_{\Sigma \Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(T_{откл}(\varphi) - T_{cp}(\varphi) \right)^2}{n}} \quad (55)$$

В соответствии с разделами 3.2 - 3.5 приведенных расчетных исследований получаем значения суммарных среднеквадратических отклонений по участкам, соответствующим рабочим ходам цилиндров двигателей. То есть 1 участок,

составляющий от 0 до 180° ПКВ соответствует рабочему ходу в 4 цилиндре, 2 участок (180-360° ПКВ) – рабочему ходу во 2 цилиндре, 3 участок (360-540° ПКВ) – в 1 цилиндре, 4 участок (540-720° ПКВ) в 3 цилиндре. Так для влияния снижения давления K_{pr} в 1-м цилиндре 4-х цилиндрового двигателя на суммарную удельную тангенциальную силу значения суммарного среднеквадратического отклонения приводятся в таблице 3.12

Таблица 3.12

Значения среднеквадратического отклонения по участкам 4-х цилиндрового ДВС при 500 мин⁻¹

Доля изменения давления K_{pr}	1 участок (0-180° ПКВ) [МПа]	2 участок (180-360° ПКВ) [МПа]	3 участок (360-540° ПКВ) [МПа]	4 участок (540-720° ПКВ) [МПа]
0%	0	0	0	0
5%	0,01	0,015	0,089	0,009
10%	0,038	0,06	0,353	0,038
20%	0,152	0,238	1,403	0,153
30%	0,339	0,535	3,151	0,345
40%	0,601	0,949	5,597	0,616

Для более удобного анализа полученных данных представим их в графическом виде (рис. 3.32)

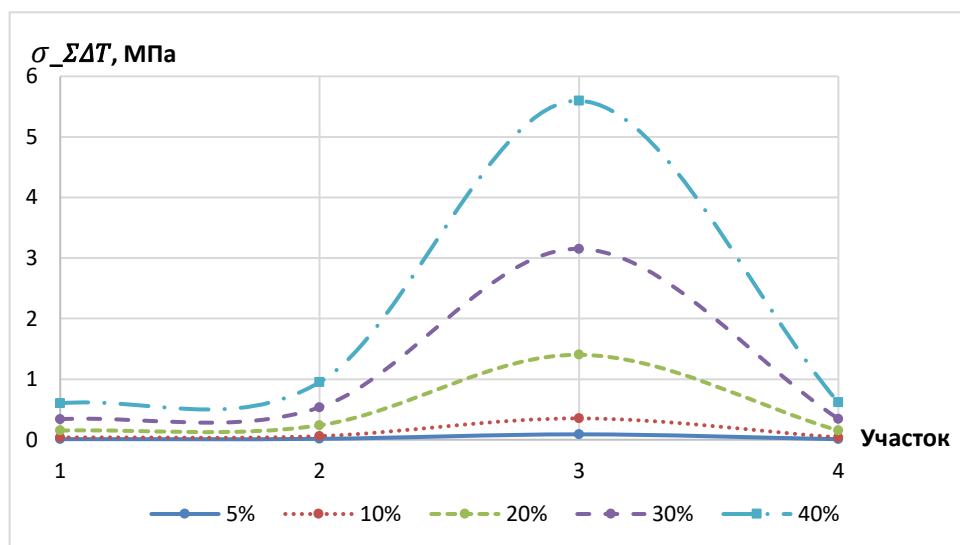


Рис. 3.32 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% при частоте вращения 500 мин^{-1}

Как видно из рис. 3.32 наибольшее значение отклонения относится к 3 участку, соответствующему рабочему ходу в 1 цилиндре.

Аналогичным образом представляются изменения среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам для 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей с шагом 120° и 60° соответственно, при этом для 6-ти цилиндрового двигателя 1 участок ($0-120^\circ$ ПКВ) – рабочий ход в 6 цилиндре, 2 участок ($120-240^\circ$ ПКВ) – рабочий ход во 2-м цилиндре, 3 участок ($240-360^\circ$ ПКВ) – рабочий ход в 4- цилиндре, 4 участок ($360-480^\circ$ ПКВ) – рабочий ход в 1-м цилиндре, 5 участок ($480-600^\circ$ ПКВ) – рабочий ход в 5 цилиндре, 6 участок ($600-720^\circ$ ПКВ) – рабочий ход в 3 цилиндре, а для 12-ти цилиндрового двигателя 1 участок ($0-60^\circ$ ПКВ) – р.х. в 6-м цилиндре, 2 участок ($60-120^\circ$ ПКВ) – р.х. в 12 цилиндре, 3 участок ($120-180^\circ$ ПКВ) – р.х. во 2-м цилиндре, 4 участок ($180-240^\circ$ ПКВ) – р.х. в 8 цилиндре, 5 участок ($240-300^\circ$ ПКВ) – р.х. в 4-м цилиндре, 6 участок ($300-360^\circ$ ПКВ) – р.х. в 10 цилиндре, 7 участок ($360-420^\circ$ ПКВ) – р.х. в 1-м цилиндре, 8 участок ($420-480^\circ$ ПКВ) – р.х. в 7-м цилиндре, 9 участок ($480-540^\circ$ ПКВ) - р.х. в 5-м цилиндре, 10 участок ($540-600^\circ$ ПКВ) – р.х. в 11 цилиндре, 11 участок ($600-660^\circ$ ПКВ) – р.х. в 3 цилиндре и 12 участок ($660-720^\circ$ ПКВ) – р.х. в 9 цилиндре (расчетные значения приведены в таблицах 5 и 6 Приложения 1) рис. 3.33 и рис. 3.34

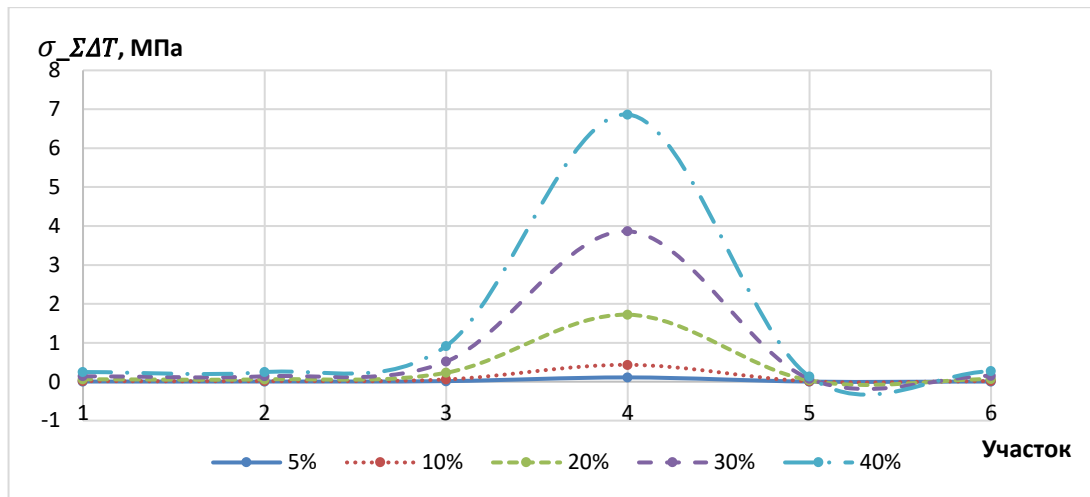


Рис. 3.33 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрового двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% при частоте вращения 500 мин^{-1}

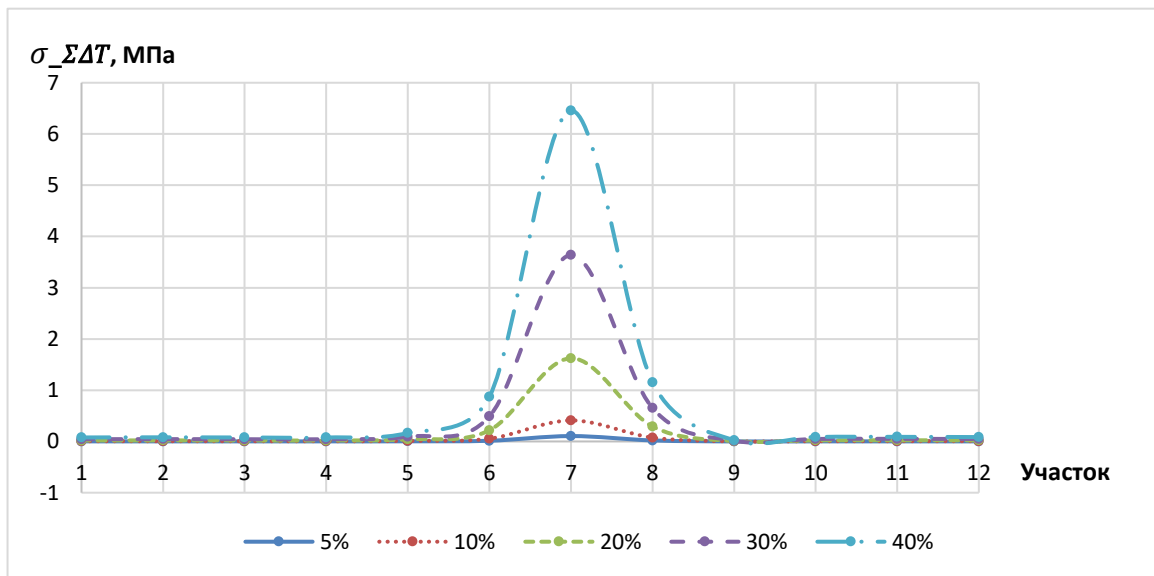


Рис. 3.34 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрового двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% при частоте вращения 500 мин^{-1}

Из графиков, приведенных на рис. 3.32-3.34 видно, что наибольшие значения отклонений для 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС при частоте вращения

500 мин⁻¹ относятся к участкам 4 и 7, что соответствует рабочему ходу в 1 цилиндре.

При 3000 мин⁻¹ характер кривых изменения среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил для исследуемых двигателей соответствует кривым при 500 мин⁻¹ представленным на рис. 3.32-3.34. Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при снижении давления K_{pr} в 1-м цилиндре 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей при 3000 мин⁻¹ представлены в Приложении 1 Таблицы 7-9 соответственно.

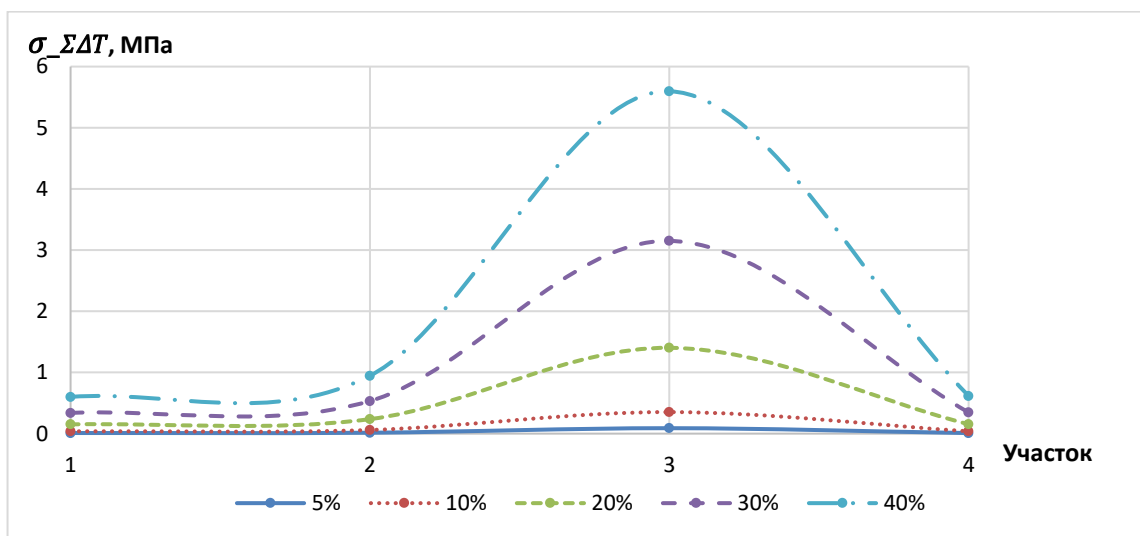


Рис. 3.35 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% при частоте вращения 3000 мин⁻¹

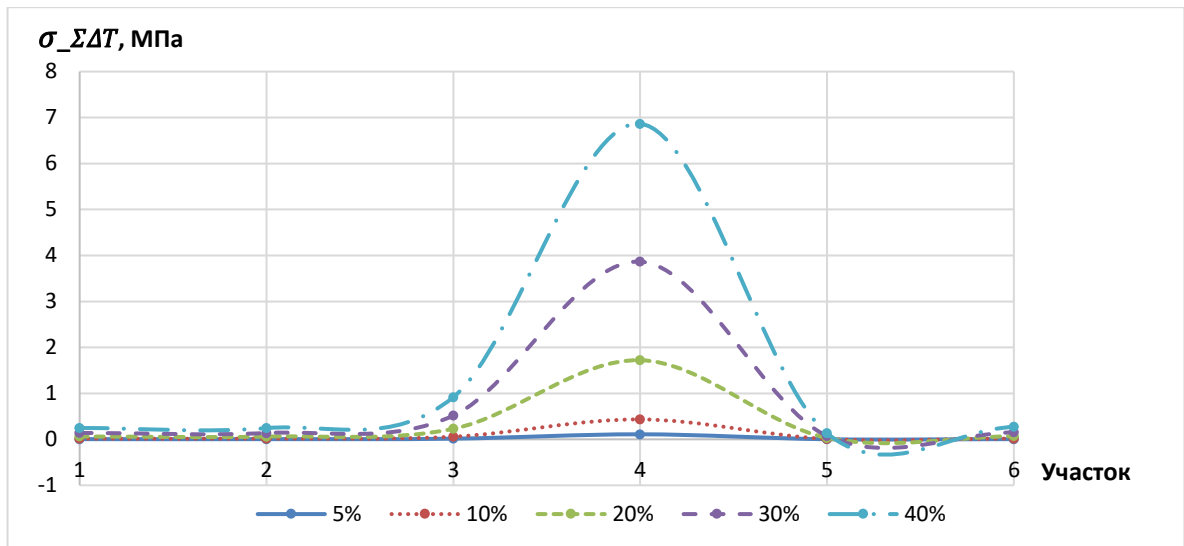


Рис. 3.36 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрического двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% при частоте вращения 3000 мин^{-1}

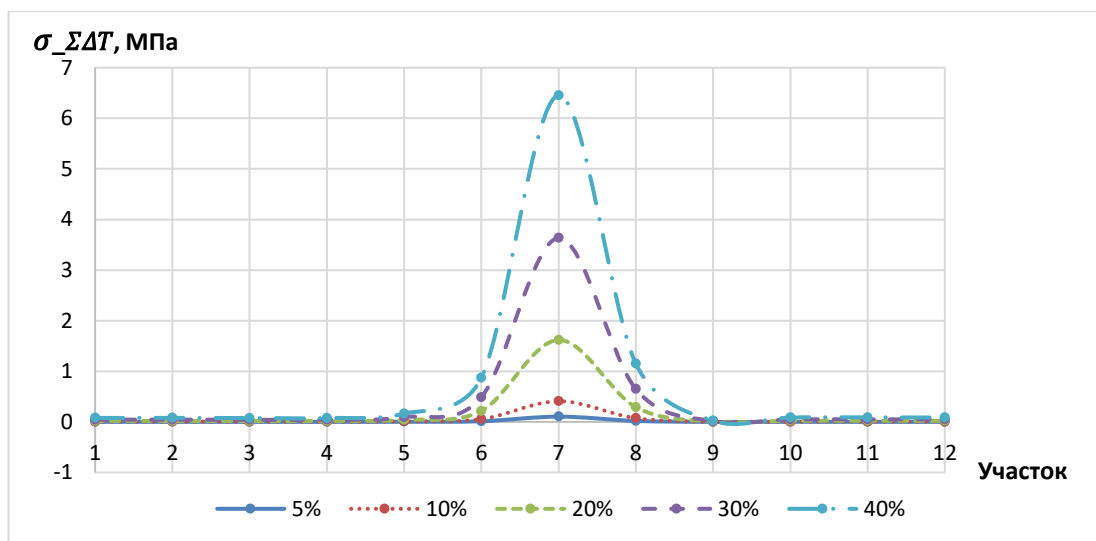


Рис. 3.37 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрического двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% при частоте вращения 3000 мин^{-1}

Из графиков, приведенных на рис. 3.35-3.37 видно, что наибольшие значения отклонений для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС при частоте вращения 3000 мин⁻¹ относятся к участкам 3, 4 и 7, что соответствует рабочему ходу в 1 цилиндре.

Таким образом, при изменении давления в 1-м цилиндре и частотах вращения коленчатого вала 500 мин⁻¹ и 3000 мин⁻¹ возможно локализовать проявившуюся неисправность, обрабатывая значения суммарной удельной тангенциальной силы по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра, а именно с разделением цикла 720° на число цилиндров исследуемого двигателя, а за уровень сравнения брать среднее арифметическое значение по различным участкам и определять отклонения от него по каждому участку.

Для параметра, характеризующего отклонение длины шатуна от нормы, значения среднеквадратического отклонения по участкам при 500 мин⁻¹ холостого хода для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей представлены в Приложении 1 Таблицы 10-12 соответственно, а их графическое представление показано на рис. 3.38, 3.39 и 3.40

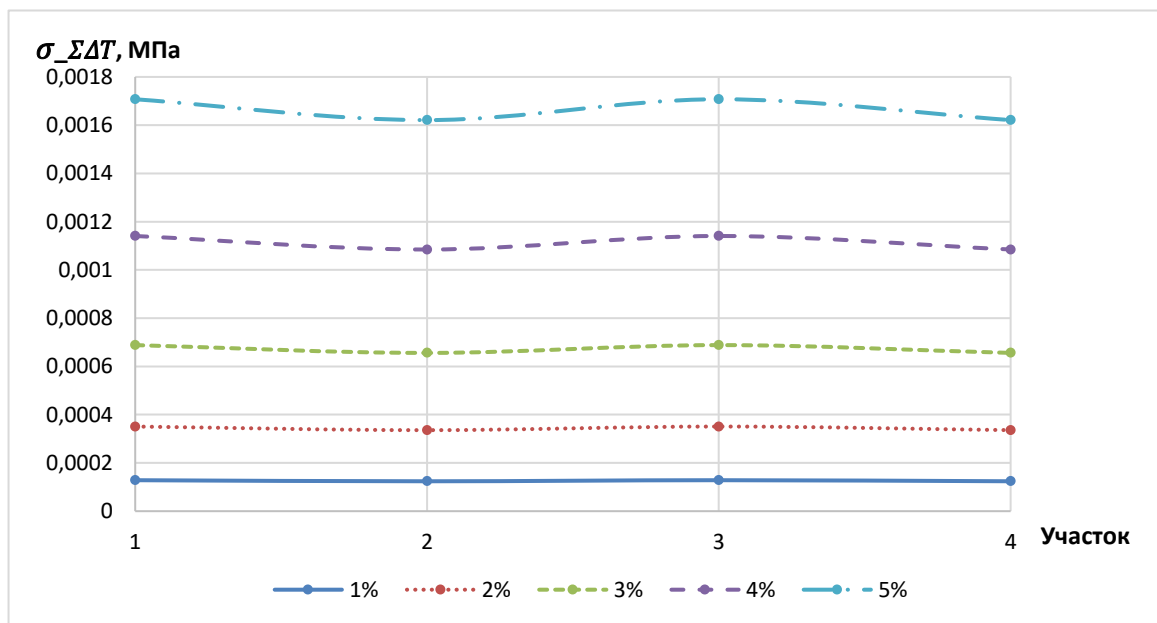


Рис. 3.38 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле отклонения длины шатуна $K_{ш}$ 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 500 мин⁻¹

Как видно из графика, представленного на рис. 3.38, колебания значений среднеквадратического отклонения по участкам представляются незначительными. Таким образом, отклонение длины шатуна от нормы у 4-х цилиндрового двигателя при 500 мин^{-1} не позволяет определить в каком цилиндре в большей степени проявляются отклонения суммарных удельных тангенциальных сил.

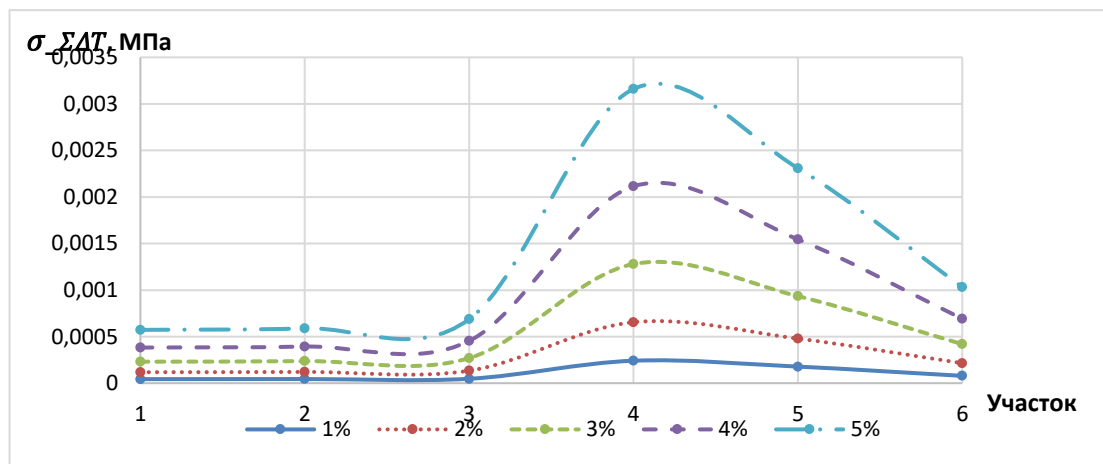


Рис. 3.39 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрового двигателя, при доле отклонения длины шатуна $K_{ш}$ 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 500 мин^{-1}

Как видно из приведенного графика на рис. 3.39 наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемого 6-ти цилиндрового двигателя проявляется на участке 4, соответствующему такту рабочего хода 1-го цилиндра.

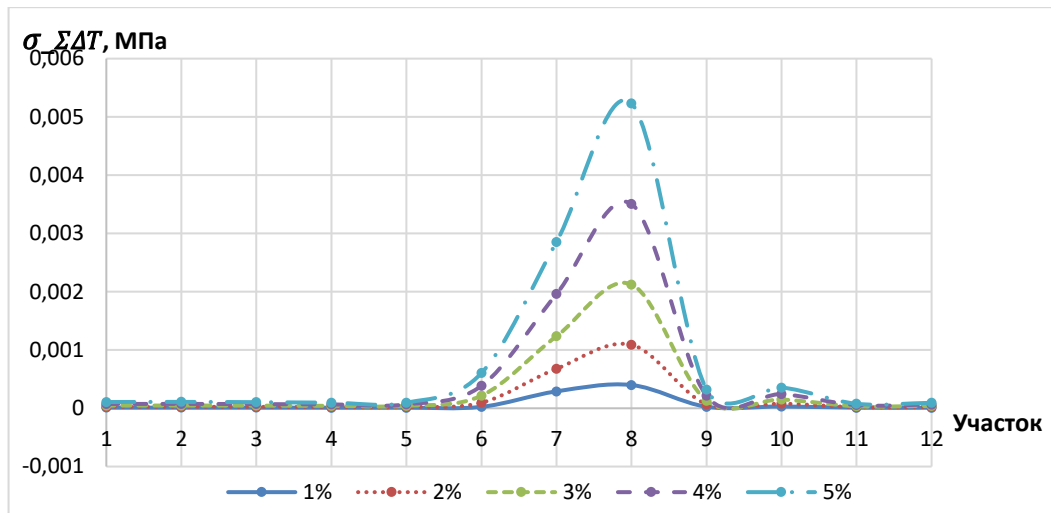


Рис. 3.40 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрового двигателя, при доле отклонения длины шатуна $K_{ш}$ 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 500 мин^{-1}

Для 12-ти цилиндрового ДВС отклонение длины шатуна 1-го цилиндра оказывает в большей мере влияние на 8 участок, то есть на следующий по порядку работы после 1-го цилиндра, а именно на участок рабочего хода в 7-м цилиндре.

Для параметра, характеризующего отклонение длины шатуна от нормы, значения среднеквадратического отклонения по участкам при 3000 мин^{-1} для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей представлены в Приложении 1 Таблицы 13-15 соответственно, а их графическое представление показано на рис. 3.41, 3.42 и 3.43

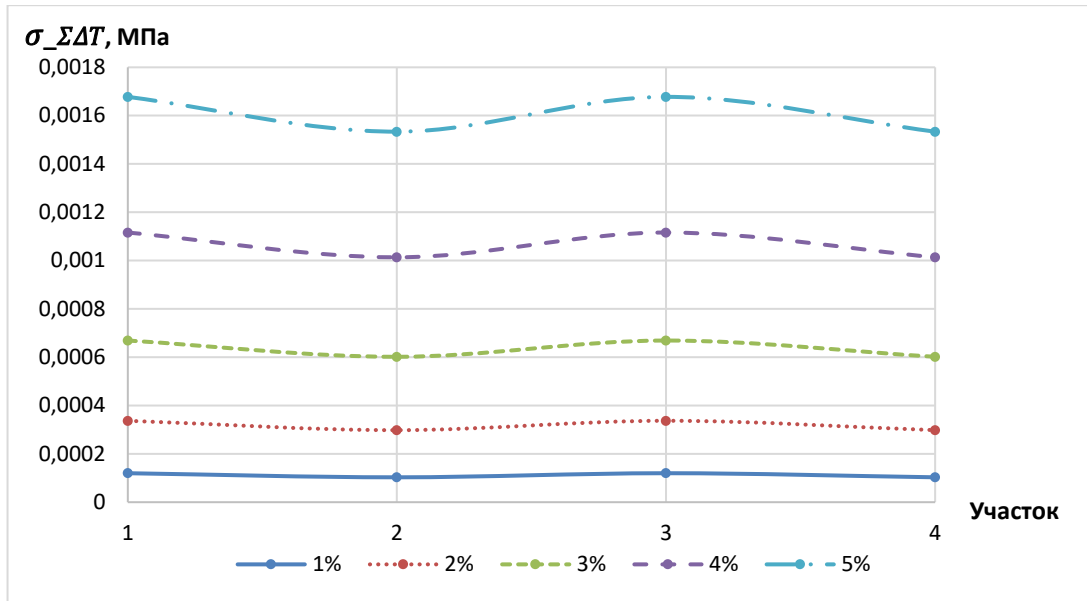


Рис. 3.41 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле отклонения длины шатуна $K_{ш}$ 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 3000 мин^{-1}

Аналогичным образом как и для 500 мин^{-1} , так и для 3000 мин^{-1} представленных на рис. 3.41, колебания значений среднеквадратического отклонения по участкам представляются незначительными. Таким образом, отклонение угла шатуна от нормы у 4-х цилиндрового двигателя при 3000 мин^{-1} не позволяет определить в каком цилиндре в большей степени проявляются отклонения суммарных удельных тангенциальных сил.

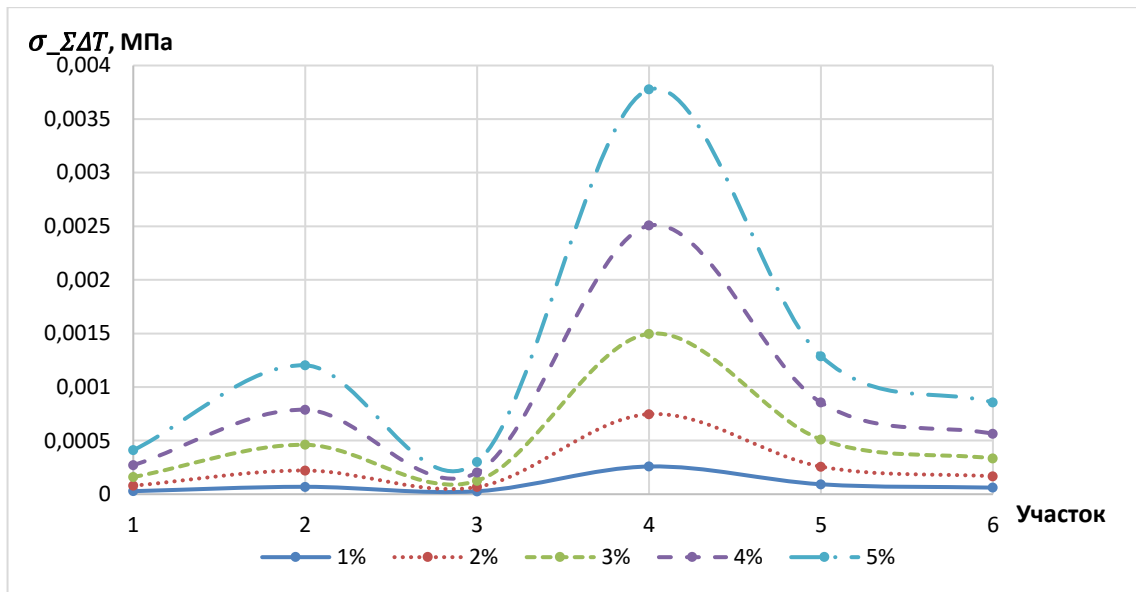


Рис. 3.42 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрического двигателя, при доле отклонения длины шатуна $K_{ш}$ 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 3000 мин^{-1}

Как видно из приведенного графика на рис. 3.42 наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы для исследуемого 6-ти цилиндрического двигателя при частоте вращения 3000 мин^{-1} проявляется на участке 4, соответствующему такту рабочего хода 1-го цилиндра.

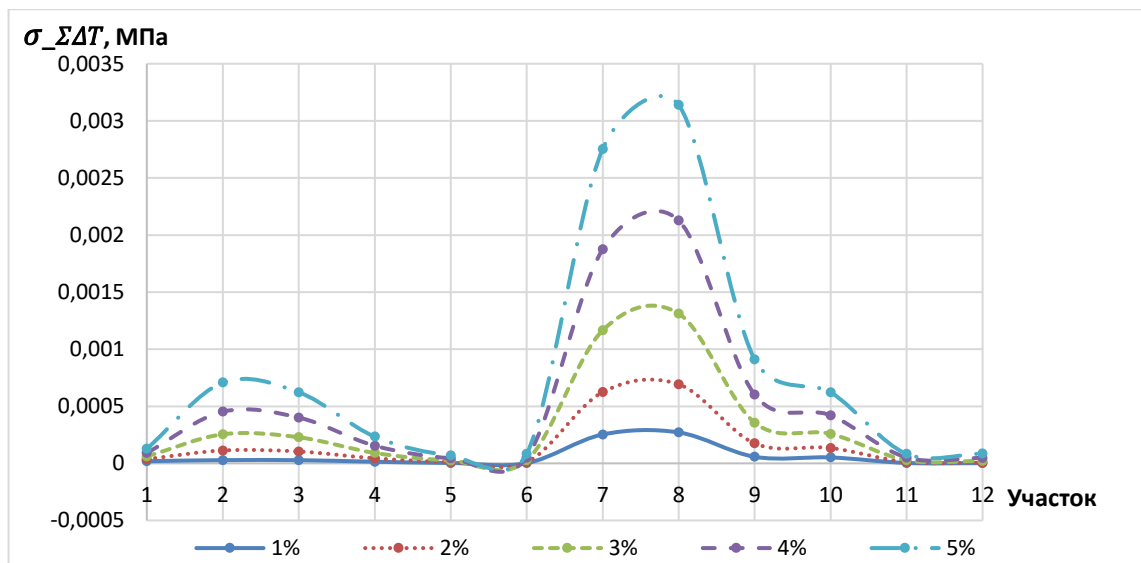


Рис. 3.43 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрового двигателя, при доле отклонения длины шатуна $K_{ш}$ 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 3000 мин^{-1}

Для 12-ти цилиндрового ДВС при частоте вращения 3000 мин^{-1} отклонение длины шатуна 1-го цилиндра оказывает в большей мере влияние на 8 участок, то есть на следующий по порядку работы после 1-го цилиндра, а именно на участок рабочего хода в 7-м цилиндре.

Для параметра, характеризующего отклонение массы поршня 1-го цилиндра от нормы, значения среднеквадратического отклонения по участкам при 500 мин^{-1} для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей представлены в Приложении 1 Таблицы 16-18 соответственно, а их графическое представление показано на рис. 3.44, 3.45 и 3.46.

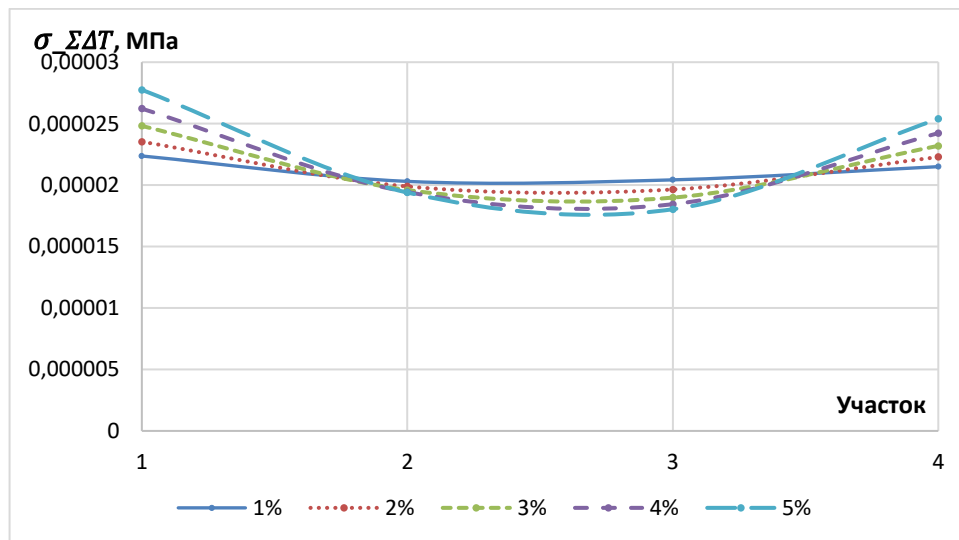


Рис. 3.44 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле снижения массы поршня 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 4% при частоте вращения 500 мин^{-1}

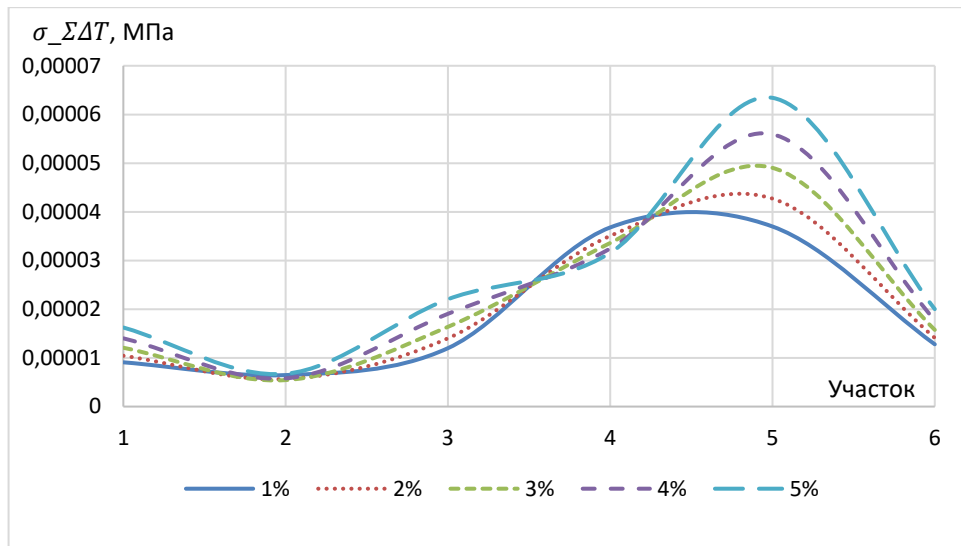


Рис. 3.45 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрового двигателя, при доле снижения массы поршня 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 500 мин^{-1}

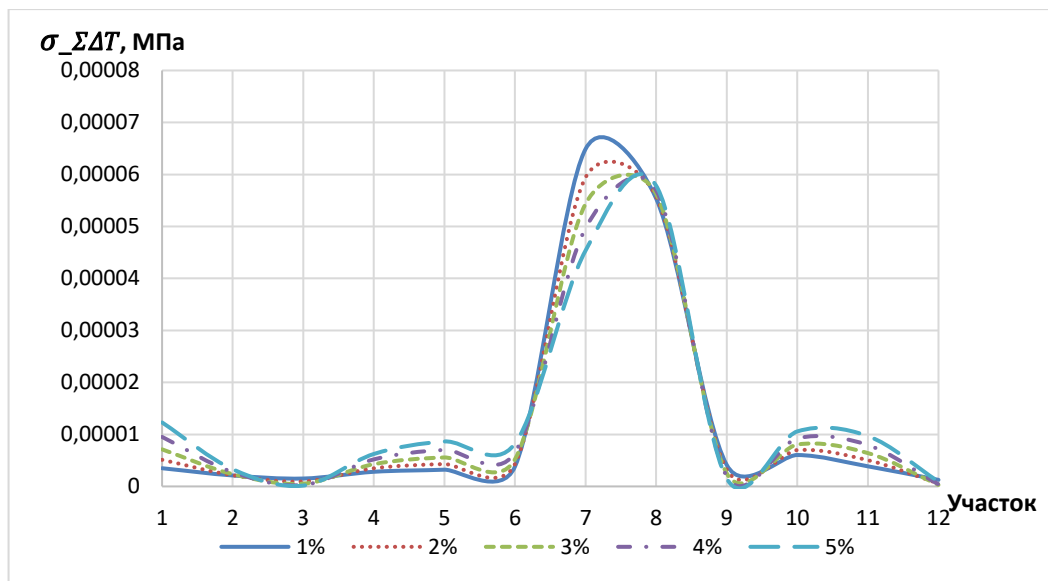


Рис. 3.46 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрового двигателя, при доле снижения массы поршня 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 500 мин^{-1}

Как видно из представленных графиков на рис. 3.44-3.46 изменение массы поршня 1-го цилиндра оказывает незначительное влияние на среднее квадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил при снижении давления в 1-м цилиндре многоцилиндрового ДВС и ей можно пренебречь.

Для параметра, характеризующего отклонение массы поршня 1-го цилиндра от нормы, значения среднее квадратическое отклонение по участкам при 3000 мин⁻¹ для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей представлены в Приложении 1 Таблицы 19-21 соответственно, а их графическое представление показано на рис. 3.47, 3.48 и 3.49.

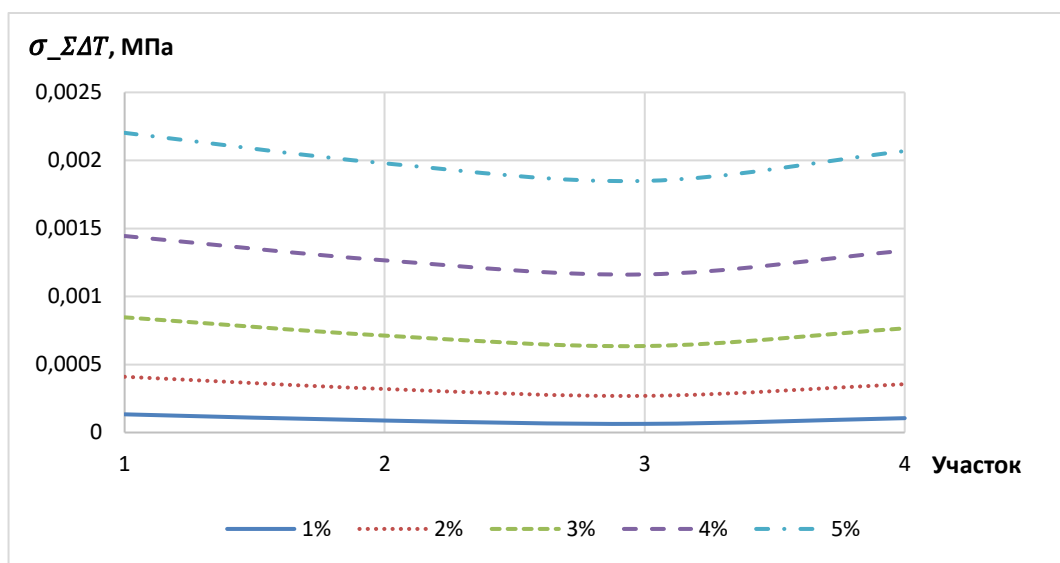


Рис. 3.47 Изменение среднее квадратическое отклонение суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле снижения массы поршня 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 4% при частоте вращения 3000 мин⁻¹

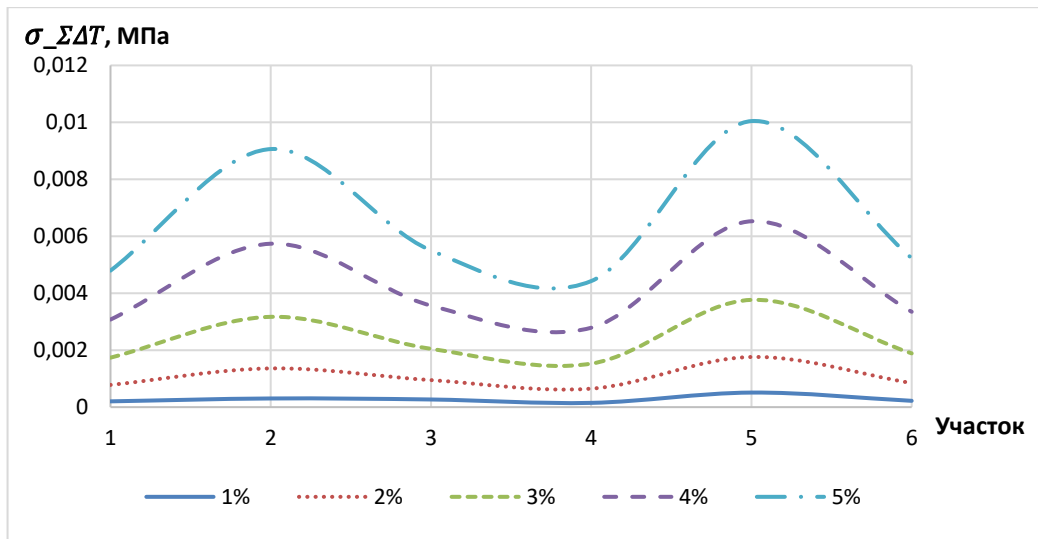


Рис. 3.48 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрового двигателя, при доле снижения массы поршня 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 3000 мин⁻¹

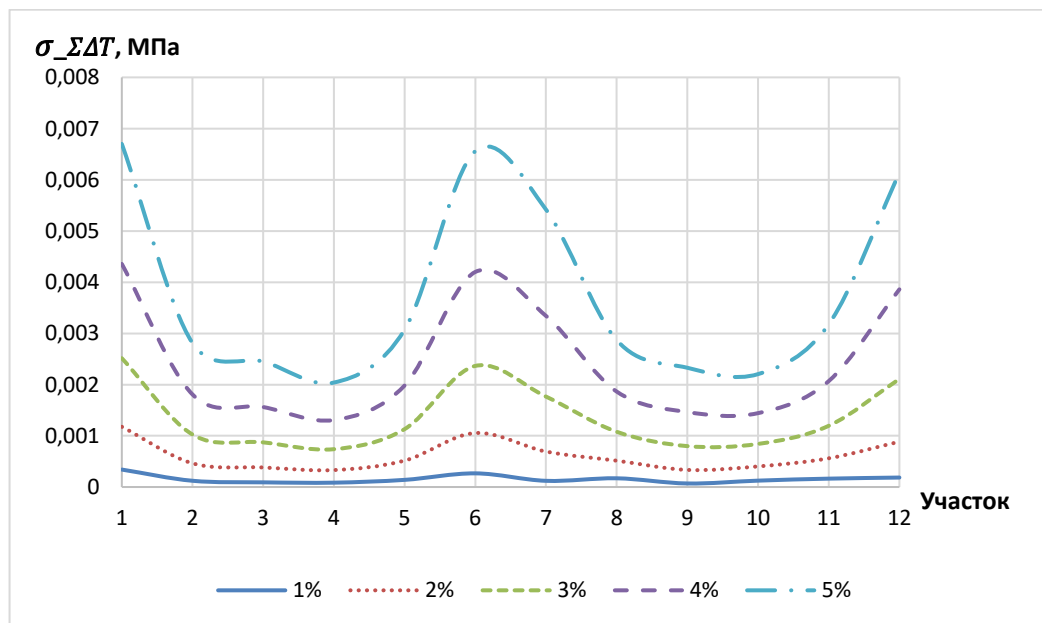


Рис. 3.49 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрового двигателя, при доле снижения массы поршня 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% при частоте вращения 3000 мин⁻¹

Для параметра, характеризующего отклонение угла кривошипа ($\Delta\varphi$) от нормы, значения среднеквадратического отклонения по участкам при 500 мин⁻¹ для

4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей представлены в Приложении 1 Таблицы 22-24 соответственно, а их графическое представление показано на рис. 3.50, 3.51 и 3.52.

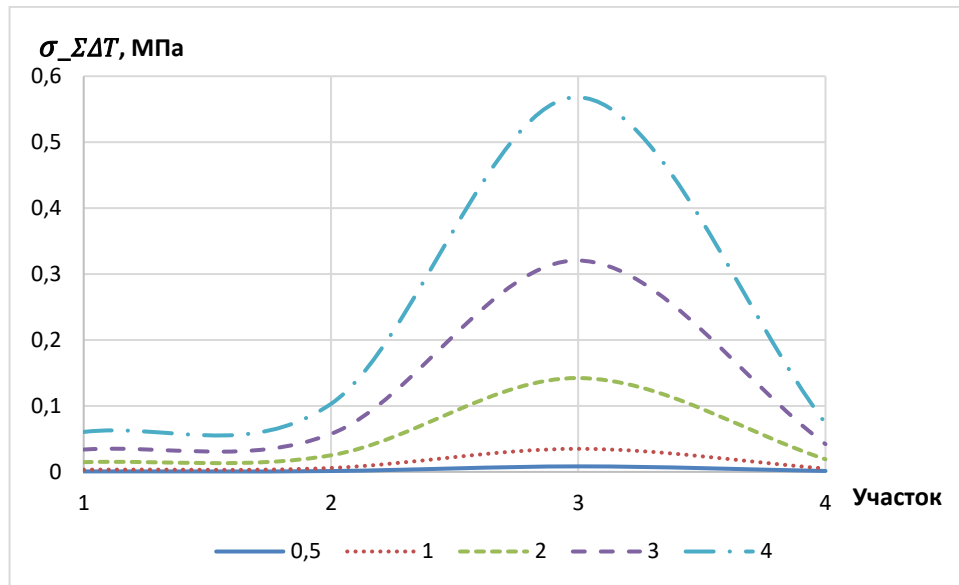


Рис. 3.50 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при угле отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5, 1, 2, 3 и 4 градуса при частоте вращения 500 мин^{-1}

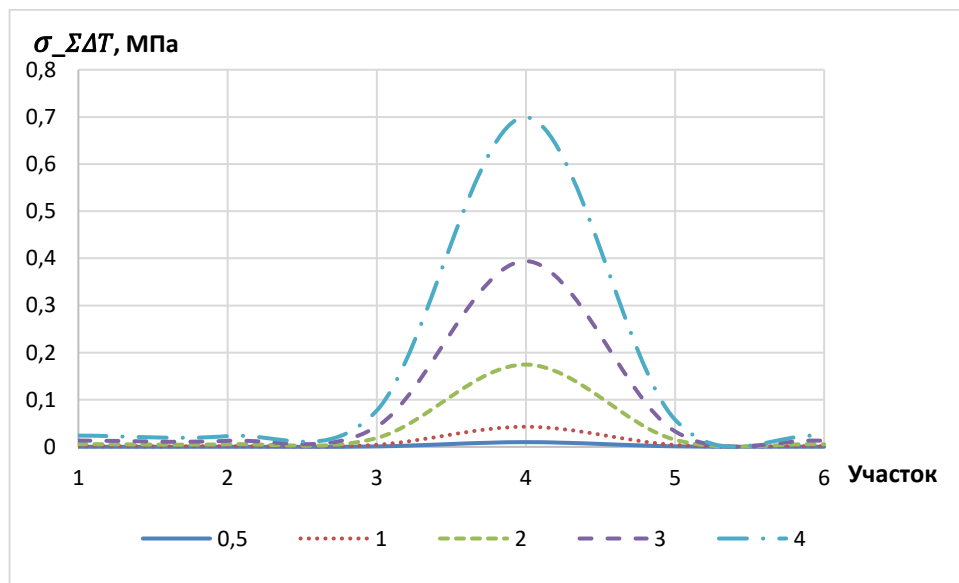


Рис. 3.51 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрового двигателя, при угле отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5, 1, 2, 3 и 4 градуса при частоте вращения 500 мин^{-1}

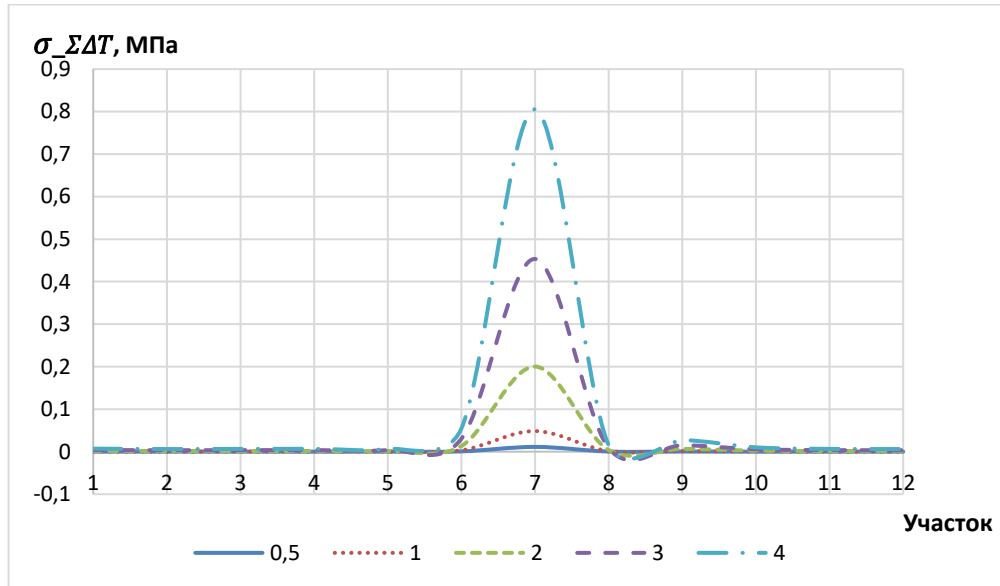


Рис. 3.52 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрового двигателя, при угле отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5, 1, 2, 3 и 4 градуса при частоте вращения 500 мин^{-1}

Исходя из полученных значений среднеквадратического отклонения суммарных тангенциальных сил, приведенных на графиках рис. 3.50-3.52, наибольшее отклонение суммарной тангенциальной силы по участкам для исследуемых двигателей при влиянии изменения угла отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС проявляется на участках 3, 4 и 7, которые соответствуют такту рабочего хода 1-го цилиндра этих двигателей, что позволяет локализовать неисправный цилиндр.

Для параметра, характеризующего отклонение угла кривошипа ($\Delta\varphi$) от нормы, значения среднеквадратического отклонения по участкам при 3000 мин^{-1} для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей представлены в Приложении 1

Таблицы 25-27 соответственно, а их графическое представление показано на рис. 3.53, 3.54 и 3.55.

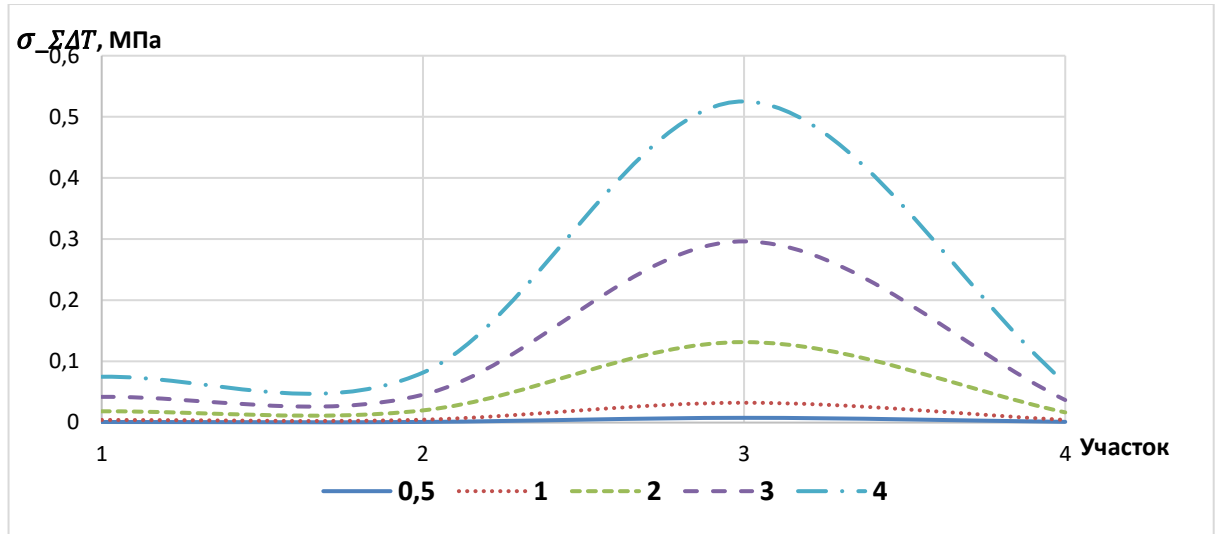


Рис. 3.53 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при угле отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5, 1, 2, 3 и 4 градуса при частоте вращения 3000 мин⁻¹

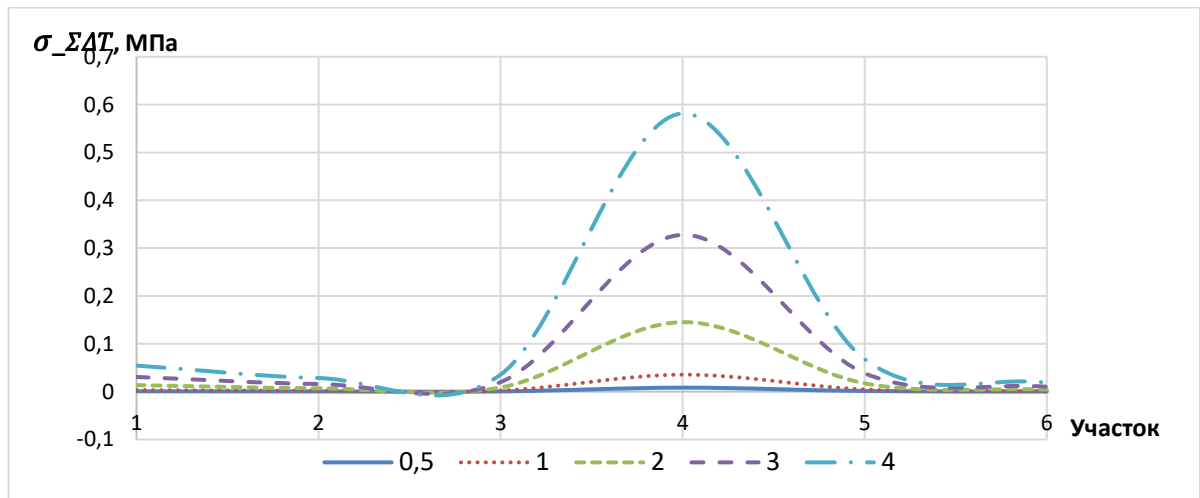


Рис. 3.54 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 6-ти цилиндрового двигателя, при угле отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5, 1, 2, 3 и 4 градуса при частоте вращения 3000 мин⁻¹

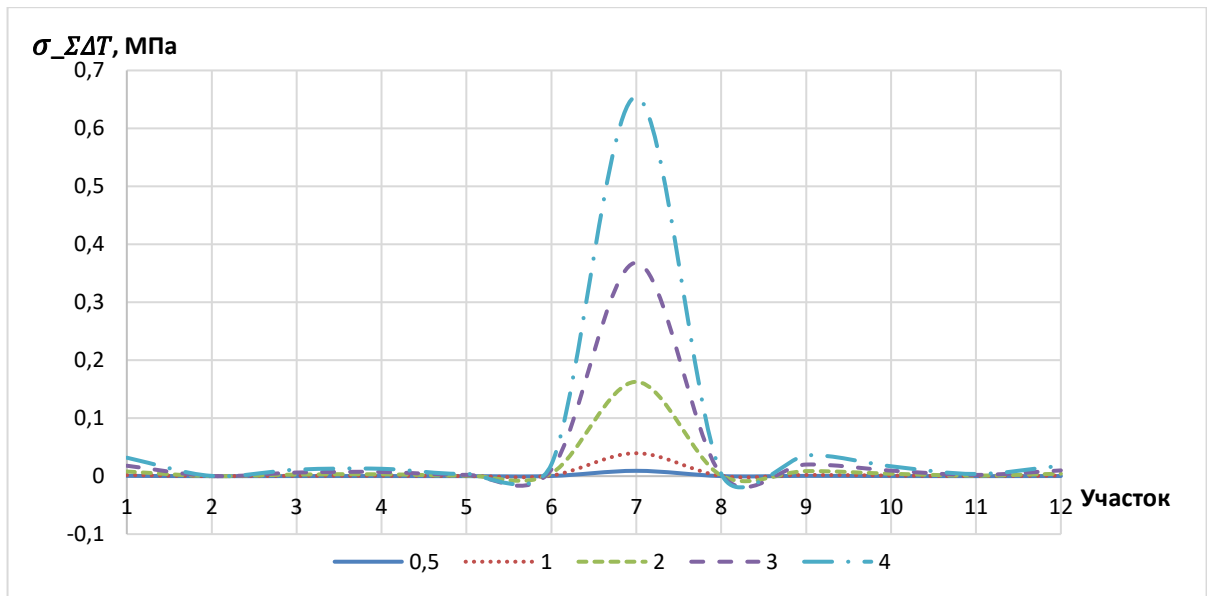


Рис. 3.55 Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 12-ти цилиндрического двигателя, при угле отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5, 1, 2, 3 и 4 градуса при частоте вращения 3000 мин^{-1}

Исходя из полученных значений среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил, приведенных на графиках рис. 3.53-3.55, наибольшее отклонение суммарной удельной тангенциальной силы по участкам для исследуемых двигателей при влиянии изменения угла отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических ДВС проявляется на участках 3, 4 и 7, которые соответствуют такту рабочего хода 1-го цилиндра этих двигателей, что позволяет локализовать неисправный цилиндр.

Расчетные значения суммарной удельной тангенциальной силы с учетом влияющих параметров по участкам, соответствующим такту рабочего хода каждого цилиндра многоцилиндрового ДВС, подтверждают полученные в разделах 3.2-3.5 выводы.

Зависимость отклонений исследуемых параметров от различных условий приведена в Таблице 3.13.

Влияние исследуемых параметров от различных условий

Исследуемый параметр	Изменение частоты вращения	Число цилиндров	Нагрузка	Величина отклонения
Снижение давления в цилиндре	-	-	-	от 5% до 40%
Неравномерность массы поршневой группы	+	-	-	От 1% до 5%
Отклонение длины шатуна	+	+	+	от 1% до 5%
Угол отклонения кривошипа от нормы	+	-	+	От 0,5 до 4 градусов

3.7 Расчетный анализ влияния исследованных параметров на неравномерность частоты вращения коленчатого вала

При диагностировании реального двигателя внутреннего сгорания возможно оперировать данными, получаемыми с датчика положения коленчатого вала, и далее рассчитать суммарную удельную тангенциальную силу. Однако любой дополнительный расчет увеличивает погрешность определения искомой величины, что оказывает негативное влияние на достоверность результатов расчетов. Таким образом, произведем оценку влияния исследуемых параметров на неравномерность частоты вращения коленчатого вала 6-ти цилиндрового ДВС при средней частоте вращения равной 500 мин^{-1} по алгоритму, приведенному в разделе 2.3.

Пример расчета неравномерности частоты вращения коленчатого вала при влиянии снижения давления на 5% в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС приведены в Приложении 1 Таблица 28. Аналогичным образом проводятся расчеты неравномерности частоты вращения и при других значениях отклонений влияющих параметров.

На рис. 3.56 представлены полученные значения неравномерности частоты вращения коленчатого вала в графическом виде при снижении давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% по углу поворота коленчатого вала.

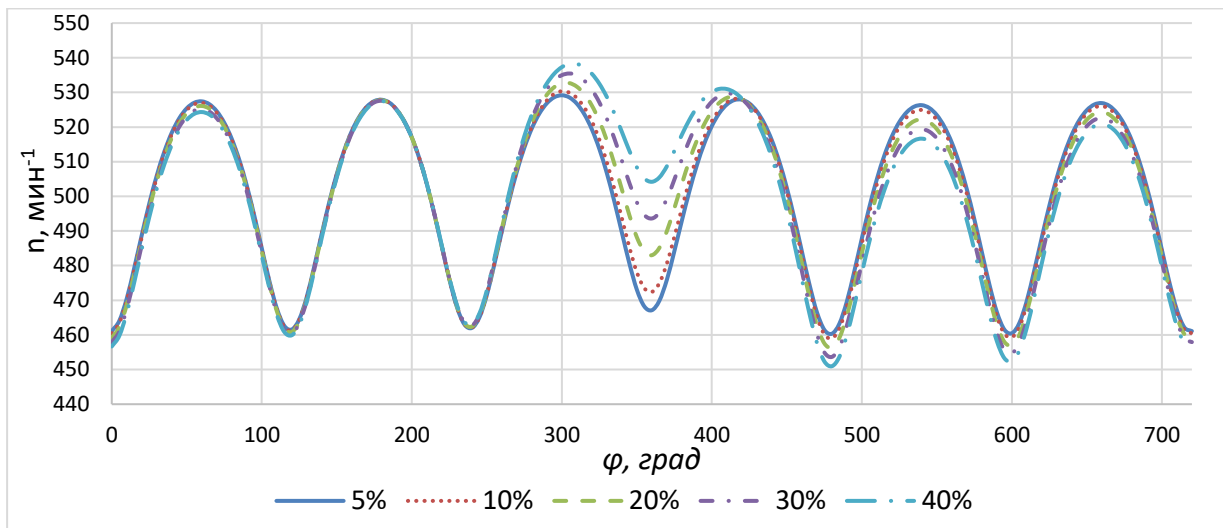


Рис. 3.56 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала при снижении давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% по углу поворота коленчатого вала

Дальнейшее исследование предполагается проводить по следующему алгоритму:

1. Проведем сглаживание полученных расчетных значений по 25 точкам по зависимости:

$$\bar{y}_i = \frac{y_{i-12} + y_{i-11} + \dots + y_i + \dots + y_{i+11} + y_{i+12}}{25} \quad (56)$$

2. Проведем выборку минимального и максимального значения для полученных сглаженных значений неравномерности частоты вращения коленчатого вала и выборку углов поворота коленчатого вала, соответствующих этим минимальным и максимальным значениям частоты вращения.
3. По известному уравнению прямой, проходящей через две точки, найдем точку пересечения прямой, проходящей через точки минимального и максимального значения неравномерности частоты вращения коленчатого вала, с прямой,

соответствующей средней частоте вращения коленчатого вала за рабочий цикл двигателя. Сопоставив значение точки пересечения, соответствующее углу поворота коленчатого вала (φ_x угол локализации), с участками, соответствующими тактам рабочего хода каждого цилиндра многоцилиндрового ДВС, а именно с разделением цикла 720° на число цилиндров исследуемого двигателя, определим к рабочему ходу какого цилиндра относится эта точка пересечения и, соответственно, определим неисправный цилиндр.

4. В качестве показателя наличия неисправности, определяемое влиянием отклонения параметров на неравномерность частоты вращения коленчатого вала в дальнейшем будут использоваться значения показателя tg , равного отношению изменения частоты вращения Δn к продолжительности участка по углу поворота коленчатого вала $\Delta\varphi$:

$$tg = \Delta n / \Delta\varphi.$$

Таким образом, проводим сглаживание расчетных значений неравномерности частоты вращения коленчатого вала и определяем углы поворота коленчатого вала, соответствующие максимальному и минимальному значениям этих частот. На рис. 3.57-3.61 приведены графики неравномерности частоты вращения коленчатого вала 6-ти цилиндрового двигателя при средней частоте вращения за цикл равной 500 мин^{-1} при влиянии изменения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% соответственно.

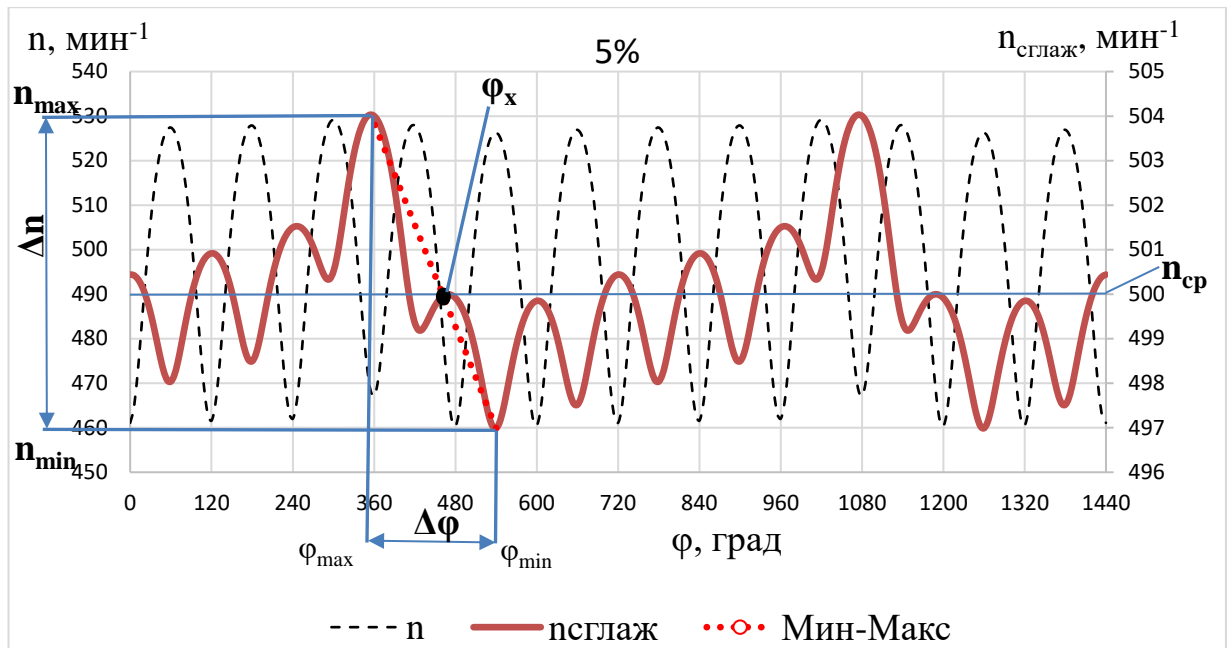


Рис. 3.57 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 5%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

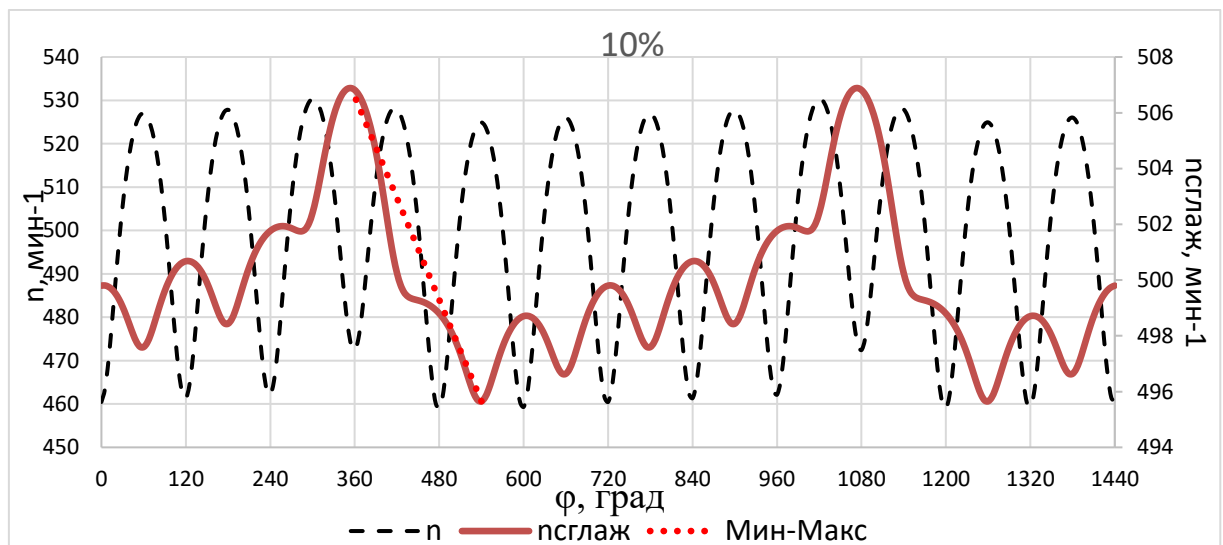


Рис. 3.58 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 10%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

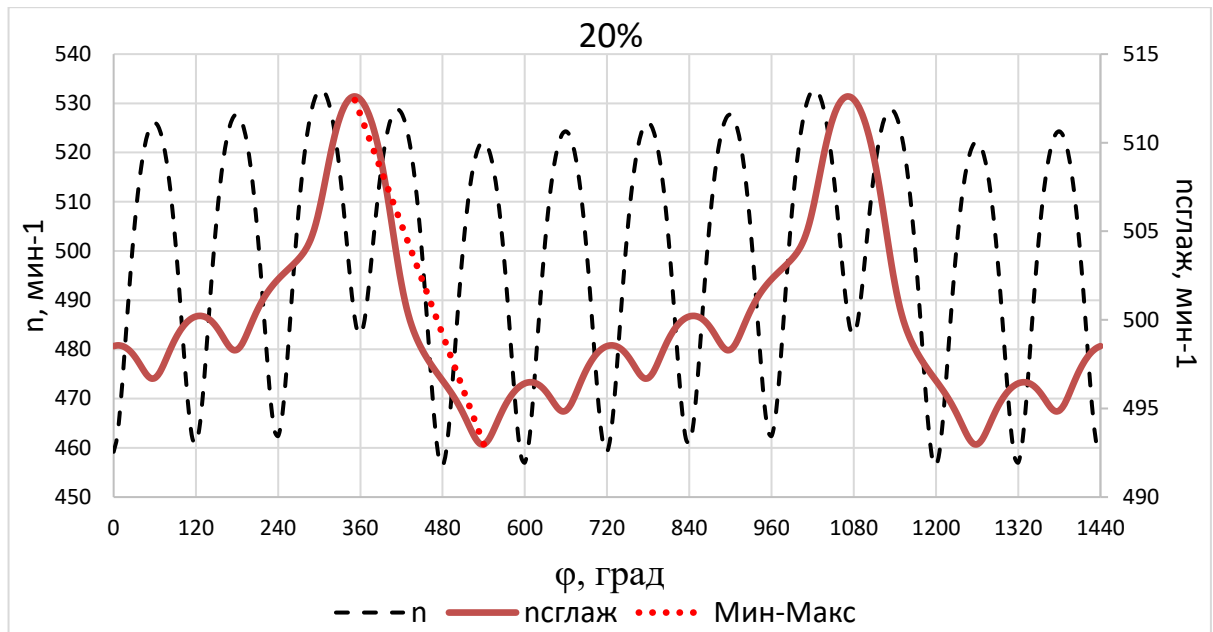


Рис. 3.59 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 20%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

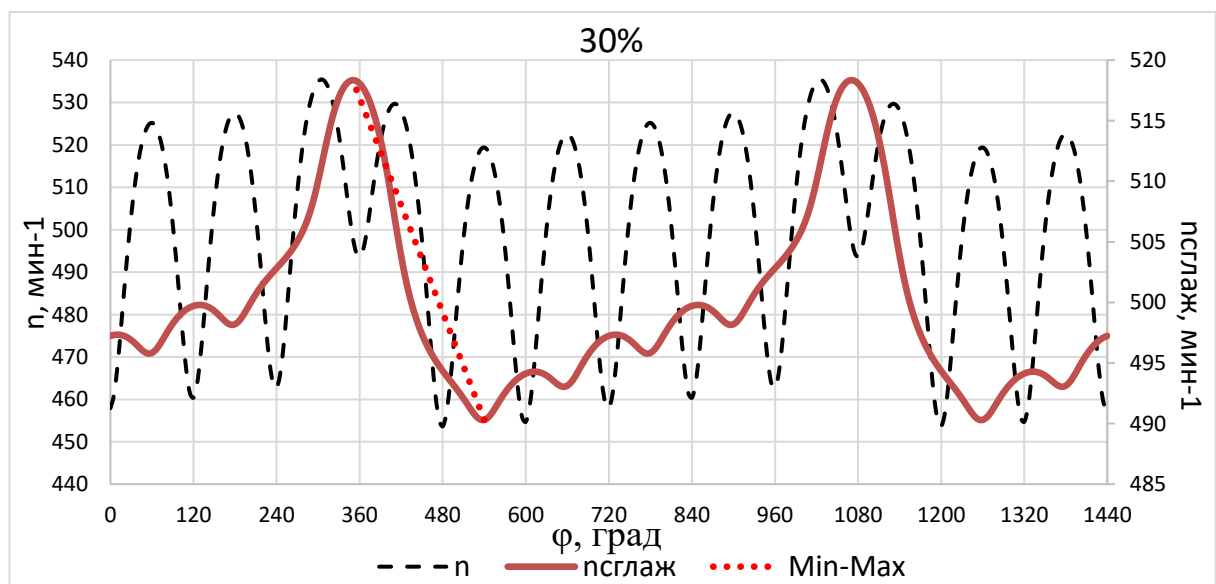


Рис. 3.60 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 30%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

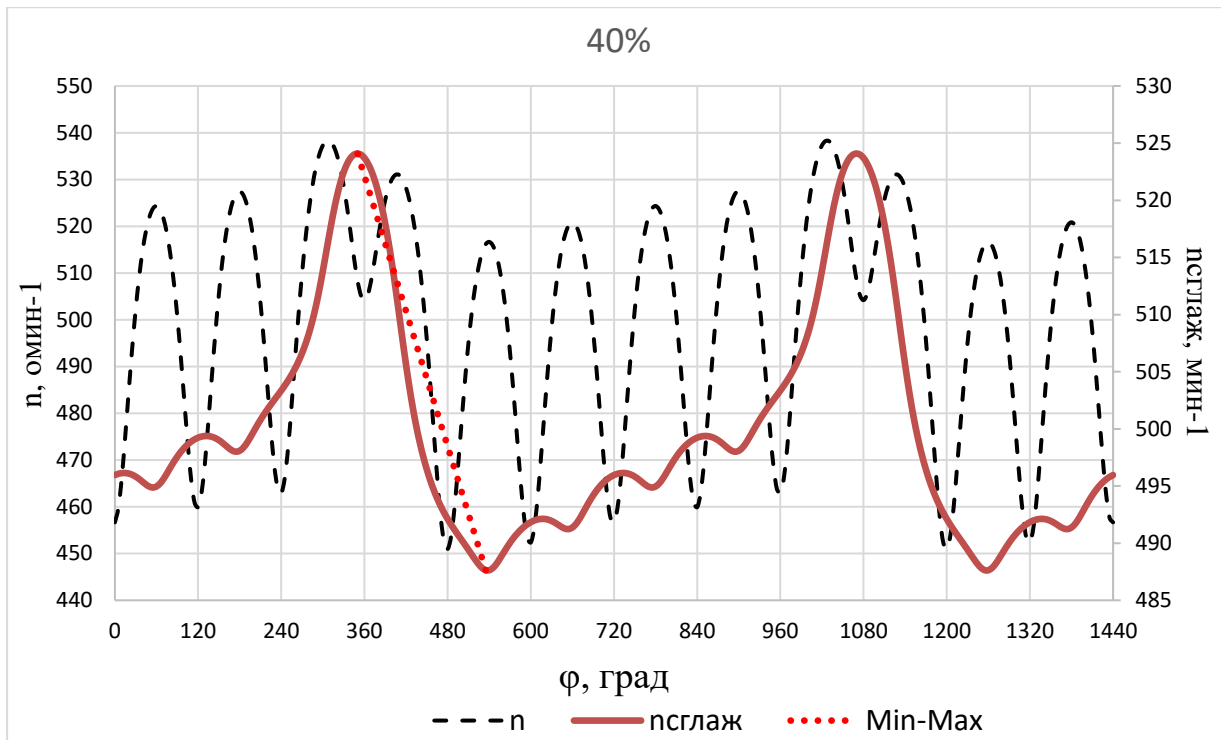


Рис. 3.61 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 40%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

Как видно по графику на рис. 3.57 максимальное значение неравномерности частоты вращения составляет $n_{\text{макс}} = 504,03 \text{ мин}^{-1}$ при $\varphi_{\text{макс}} = 355^{\circ}$ ПКВ, а минимальное — $n_{\text{мин}} = 496,99 \text{ мин}^{-1}$ при $\varphi_{\text{мин}} = 540^{\circ}$ ПКВ, значение угла локализации φ_x , определяемого значением угла поворота коленчатого вала для точки пересечения прямой, проходящей через упомянутые точки минимального и максимального значения частоты, и прямой, соответствующей средней частоте вращения коленчатого вала, было найдено по указанной ранее методике и составляет $\varphi_x = 460,91^{\circ}$ ПКВ. Также рассчитаны наибольшее и наименьшее значения показателя наличия неисправности tg равное отношению изменения частоты вращения Δn к продолжительности участка по углу поворота коленчатого вала $\Delta \varphi$, составляющее для $tg^*_{\text{макс}} = 0,038$, для $tg^*_{\text{мин}} = 0,013$, а также определено

отношения максимального значения показателя наличия неисправности к минимальному значению этого показателя. Аналогичным образом были получены значения и при снижении давления в 1-м цилиндре на 10%, 20%, 30% и 40% (рис. 3.58-3.61), а значения для точек минимума и максимума, точки пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения за цикл, максимального и минимального значений показателя наличия неисправности tg^* , а также их отношение представлены в Таблице 3.14.

Таблица 3.14

Расчетные значения при влиянии доли снижения давления в 1-м цилиндре

Доля снижения давления в 1-м цилиндре	$n_{мин}$, [мин ⁻¹]	$n_{макс}$, [мин ⁻¹]	$\varphi_{мин}$, [град]	$\varphi_{макс}$, [град]	φ_x , [град]	$tg^*_{макс}$	$tg^*_{мин}$	$tg^*_{макс}/tg^*_{мин}$
5%	496,99	504,03	540	355	460,91	0,038	0,013	2,9
10%	495,65	506,88	540	355	468,38	0,06	0,02	2,9
20%	492,98	512,61	540	350	472,03	0,103	0,037	2,8
30%	490,31	518,35	540	350	474,32	0,148	0,053	2,8
40%	487,63	524,09	535	350	472,24	0,197	0,068	2,9

Представим полученные значения $tg^*_{макс}$ по доле снижения давления в цилиндре в графическом виде для дальнейшего анализа.

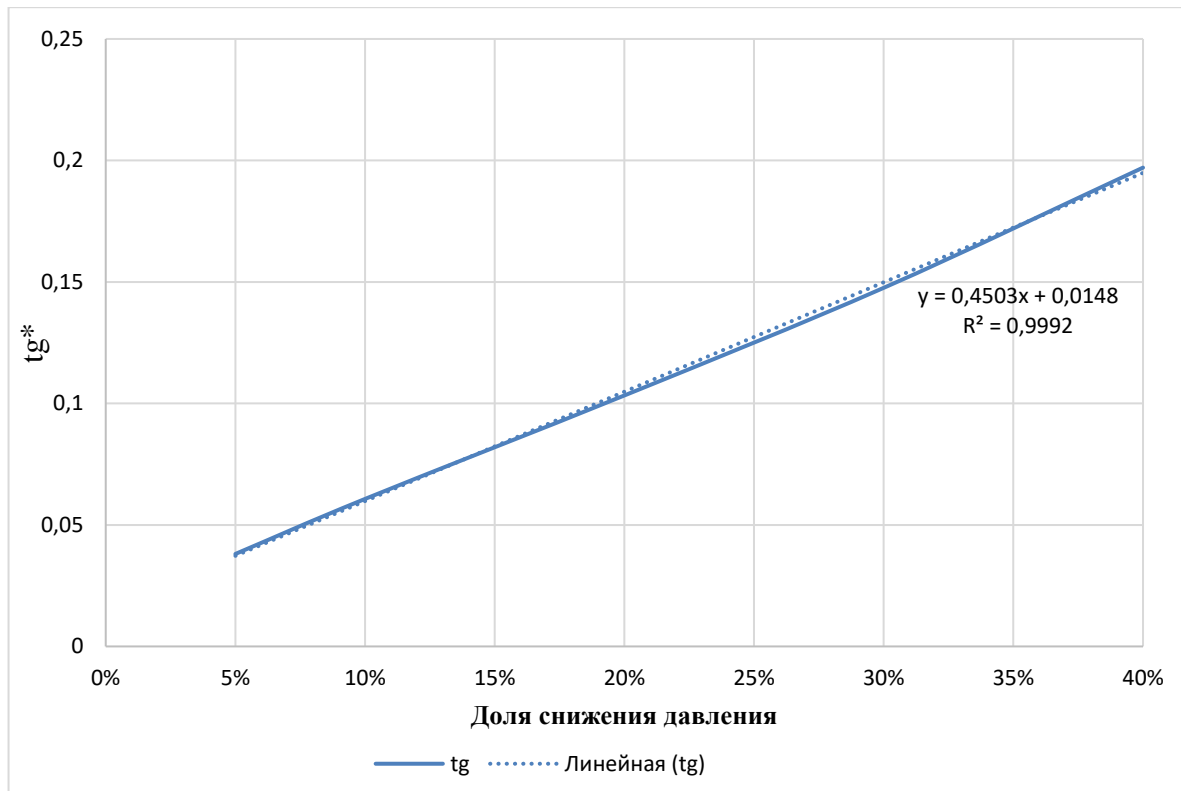


Рис. 3.62 Характер изменения значений показателя наличия неисправности tg^*_{\max} в зависимости от доли снижения давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС.

Как видно из приведенных в Таблице 3.14 расчетных значений, угол ПКВ (φ_x) для точки пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума, и среднего значения частоты вращения за цикл при всех значениях снижения давления в цилиндре ДВС лежит в интервале $460,91^0$ - $474,32^0$ ПКВ, а кроме того показатель наличия неисправности tg^*_{\max} при увеличении значения доли снижения давления в цилиндре также возрастает и определяется уравнением $tg^*_{\max} = 0,4503 \cdot K_{pr} + 0,0148$. Также значение показателя tg^*_{\max} почти в 3 раза больше показателя tg^*_{\min} при влиянии снижения давления в 1-м цилиндре, что позволяет для доли снижения давления использовать наибольшее значение.

Аналогичным образом проведем расчет влияния отклонения длины шатуна от нормы на неравномерность мгновенной частоты вращения коленчатого вала. На рис. 3.63 представлены полученные значения частоты вращения коленчатого вала

в графическом виде при изменении длины шатуна 1-го цилиндра на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% по углу поворота коленчатого вала.

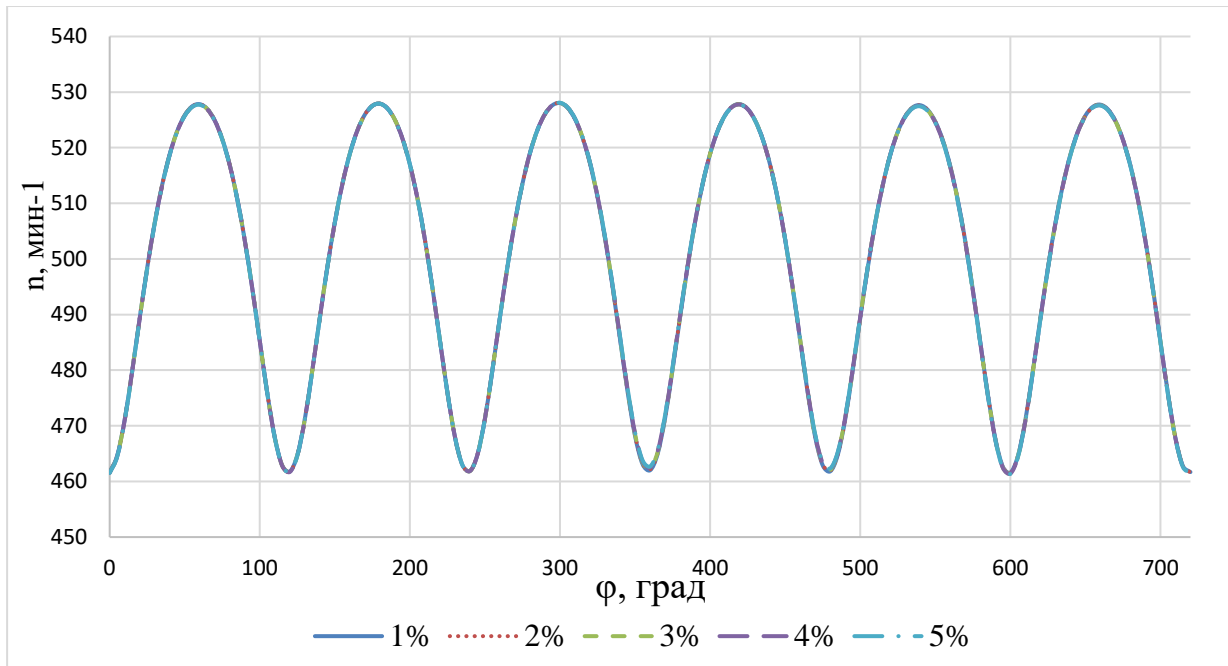


Рис. 3.63 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала при изменении длины шатуна 1-го цилиндра 6-ти цилиндрического ДВС на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% по углу поворота коленчатого вала.

Проведем сглаживание рассчитанных значений частоты вращения коленчатого вала и определим углы поворота коленчатого вала, соответствующие максимальному и минимальному значениям этих частот. На рис. 3.64-3.68 приведены графики неравномерности частоты вращения коленчатого вала 6-ти цилиндрического двигателя при средней частоте вращения за цикл равной 500 мин^{-1} при влиянии изменения длины шатуна в 1-м цилиндре на 1%, 2%, 3%, 4% и 5% соответственно.

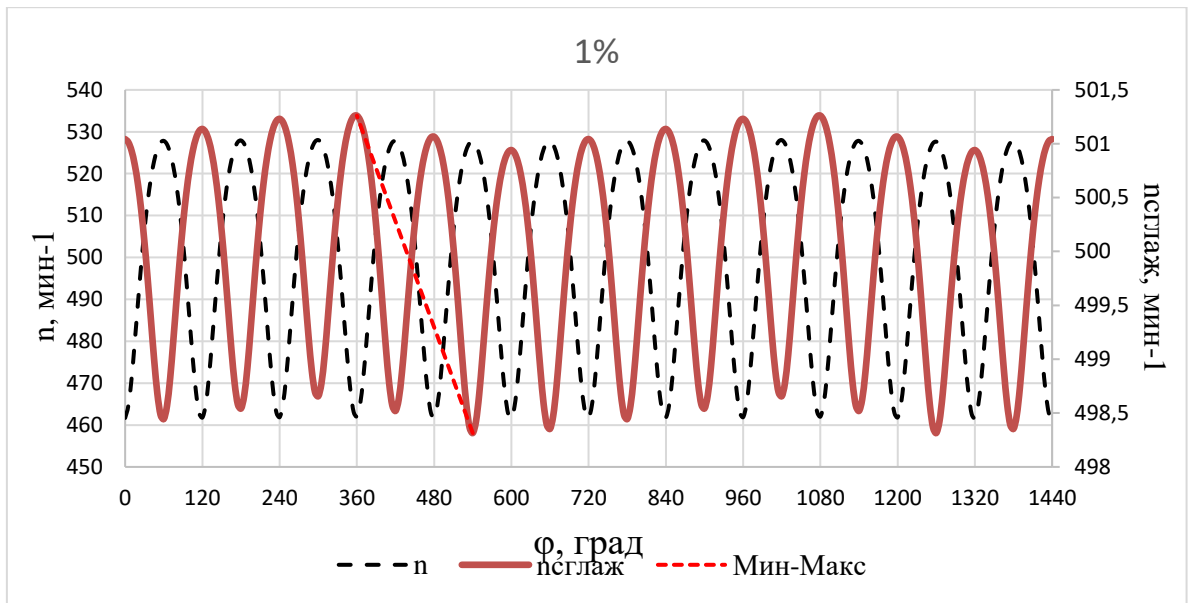


Рис. 3.64 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении длины шатуна в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 1%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

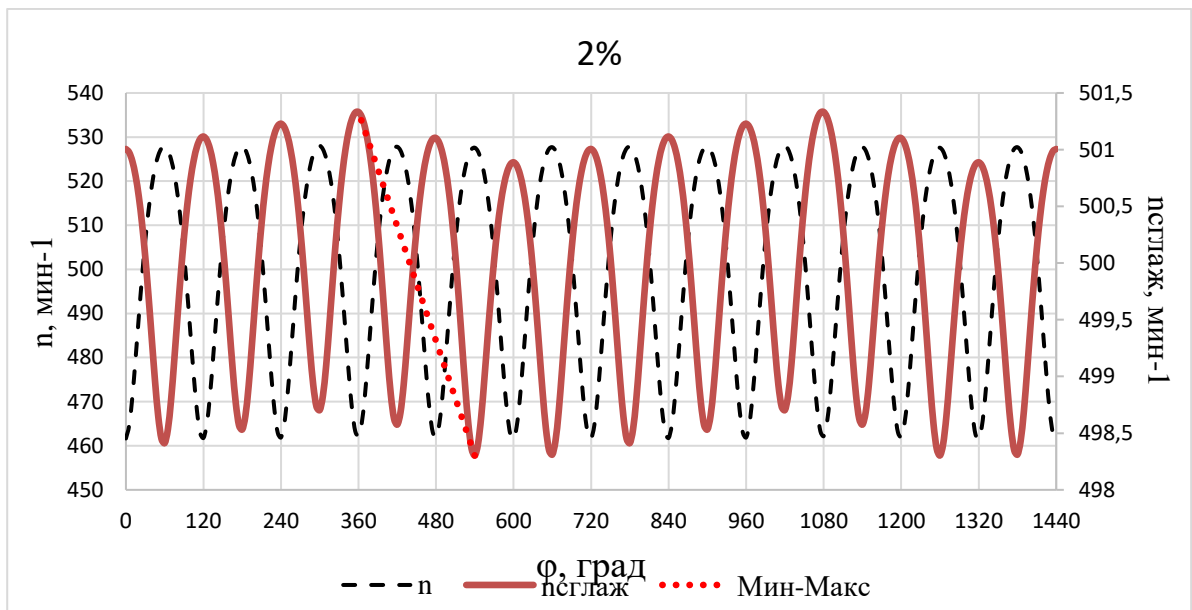


Рис. 3.65 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении длины шатуна в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС на 2%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

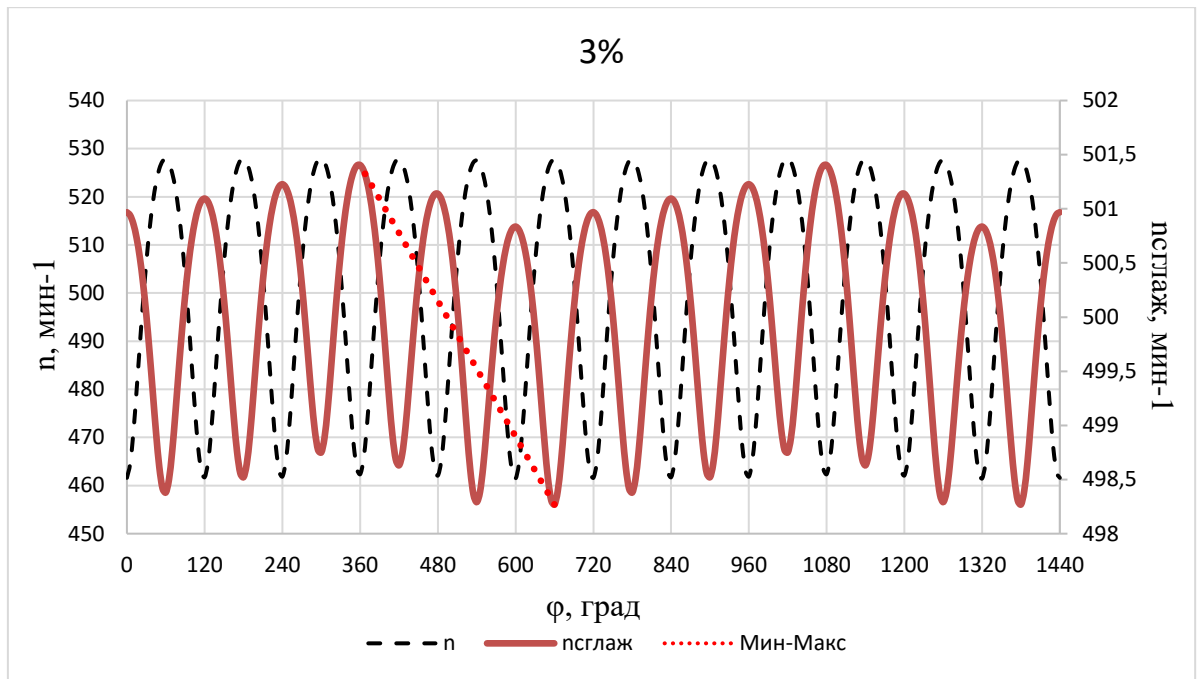


Рис. 3.66 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении длины шатуна в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрического ДВС на 3%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

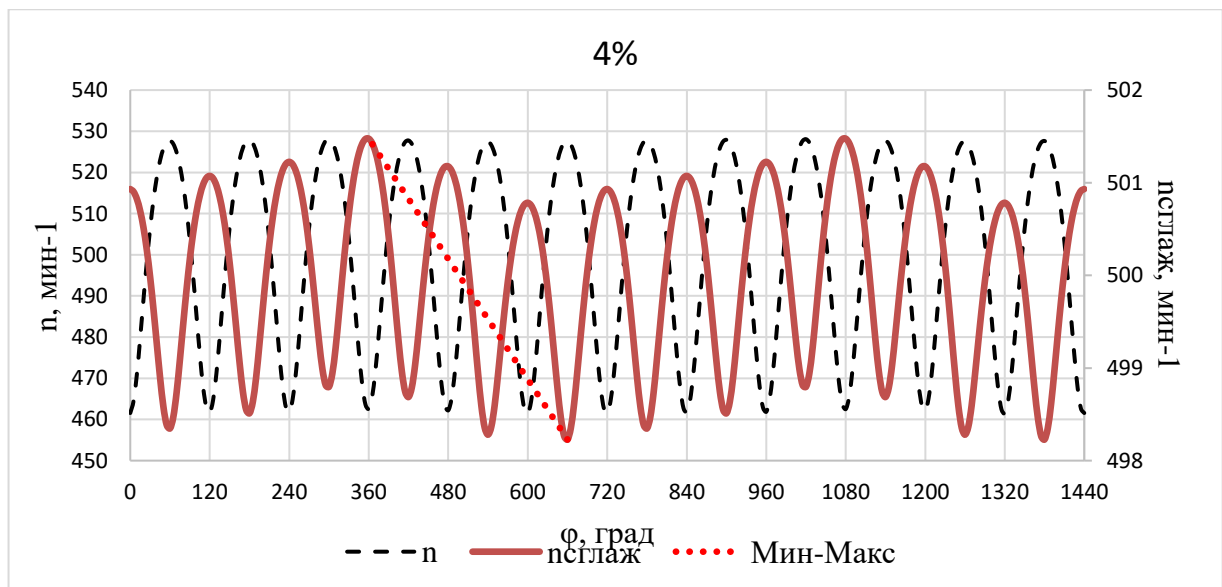


Рис. 3.67 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении длины шатуна в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрического ДВС на 4%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

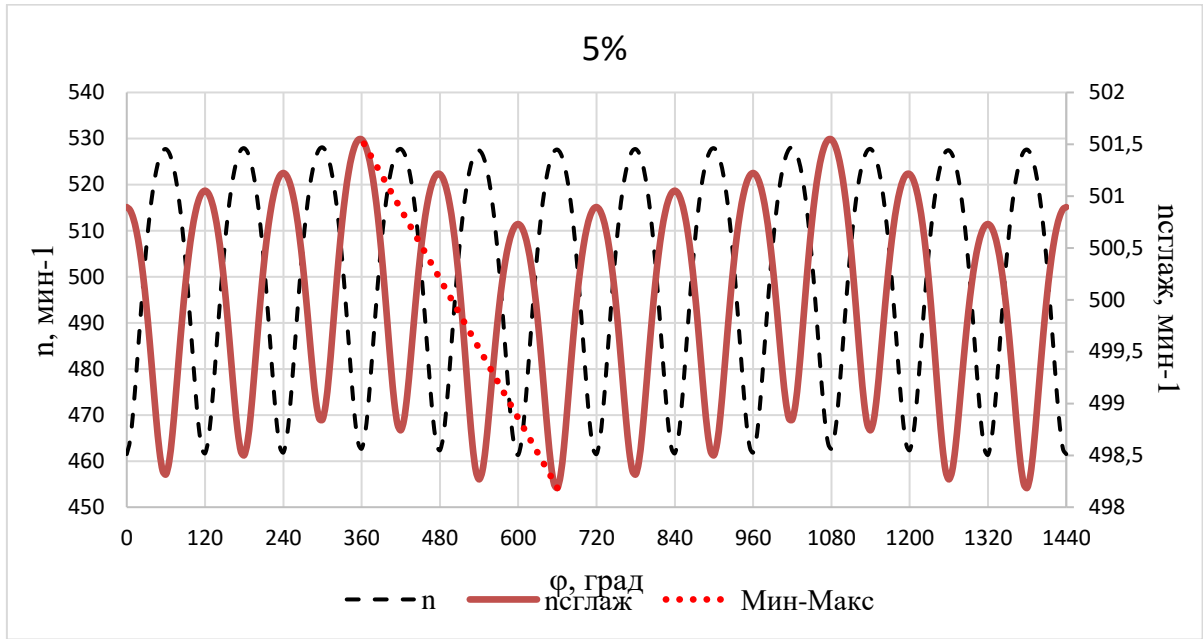


Рис. 3.68 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении длины шатуна в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрического ДВС на 5%, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

Значения для точек минимума и максимума неравномерности мгновенной частоты вращения, точки пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения за цикл, значения указанной точки пересечения, минимального и максимального значения показателя tg наличия неисправности, а также их отношение представлены в Таблице 3.15.

Расчетные значения при влиянии изменения длины шатуна в 1-м цилиндре

Доля изменения длины шатуна в 1-м цилиндре	$\Pi_{\text{мин}}$, [МИН ⁻¹]	$\Pi_{\text{макс}}$, [МИН ⁻¹]	$\Phi_{\text{мин}}$, [град]	$\Phi_{\text{макс}}$, [град]	Φ_x , [град]	tg'_{max}	tg'_{min}	$\text{tg}'_{\text{max}}/\text{tg}'_{\text{min}}$
1%	498,31	501,26	540	360	437,03	0,016	0,005	3
2%	498,3	501,33	540	360	439,17	0,017	0,006	3
3%	498,27	501,4	660	360	494,37	0,01	0,007	1,4
4%	498,23	501,48	660	360	496,28	0,011	0,008	1,4
5%	498,19	501,55	660	360	498,06	0,011	0,008	1,4

Рис. 3.69 Характер изменения значений показателя наличия неисправности tg'_{max} в зависимости от доли изменения длины шатуна 1-го цилиндра 6-ти цилиндрического ДВС.

Полученные расчетные значения, соответствующие углу поворота коленчатого вала (φ_x), для точки пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения за цикл, находятся в интервале $437,03^0-498,06^0$ ПКВ. Кроме того, значения tg'_{max} в 1,4 – 3 раза больше tg'_{min} , что позволяет использовать наибольшее значение показателя tg' для определения зоны отклонения среднего значения мгновенной частоты вращения при изменении длины шатуна, а также значения tg'_{max} находятся примерно на одном уровне, что не позволяет определить явную зависимость между tg'_{max} и изменением длины шатуна.

Таким же образом проведем расчет влияния отклонения угла кривошипа 1-го цилиндра от нормы на неравномерность частоты вращения коленчатого вала. На рис. 3.70 представлены полученные значения частоты вращения коленчатого вала в графическом виде при изменении угла отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы на 0,5 градуса, 1 градуса, 2 градуса, 3 градуса и 4 градуса по углу поворота коленчатого вала.

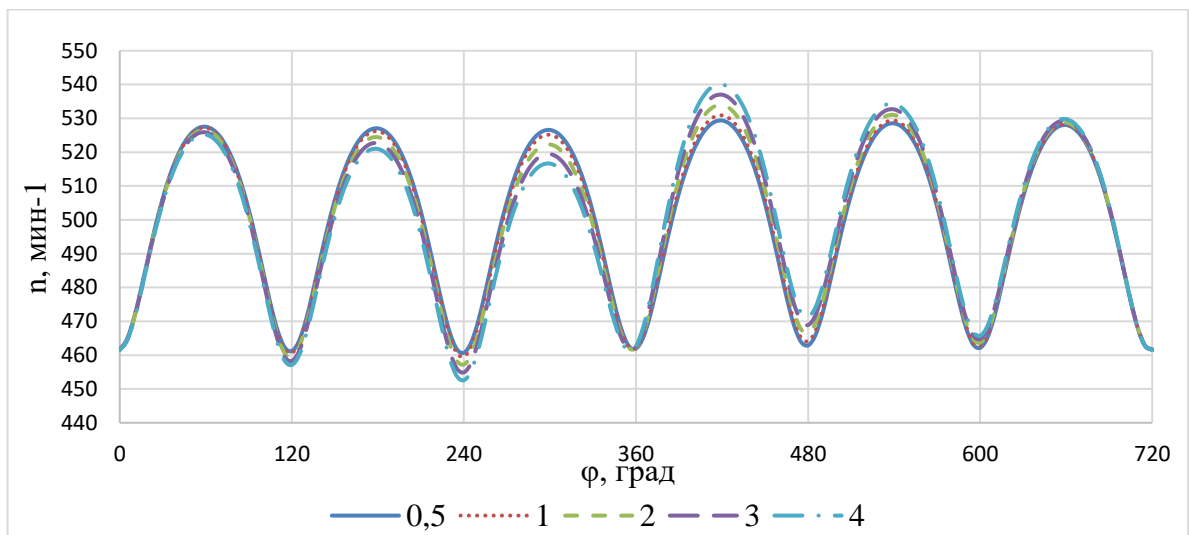


Рис. 3.70 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала при изменении угла отклонения кривошипа от нормы для 1-го цилиндра 6-ти цилиндрического ДВС на 0,5 градуса, 1 градус, 2 градуса, 3 градуса и 4 градуса по углу поворота коленчатого вала.

Проведем сглаживание рассчитанных значений частоты вращения коленчатого вала и определим углы поворота коленчатого вала, соответствующие максимальному и минимальному значениям этих частот. На рис. 3.71-3.75 приведены графики неравномерности частоты вращения коленчатого вала 6-ти цилиндрового двигателя при средней частоте вращения за цикл равной 500 мин^{-1} при влиянии угла отклонения кривошипа 1-го цилиндра на 0,5 градуса, 1 градус, 2 градуса, 3 градуса и 4 градуса соответственно.

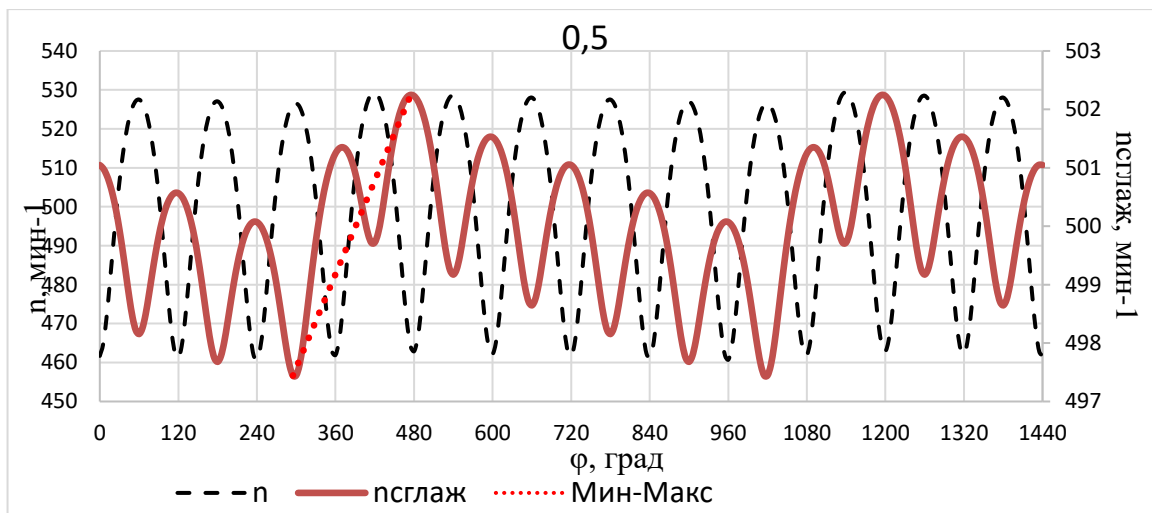


Рис. 3.71 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при отклонении угла кривошипа 1-го цилиндра 6-ти цилиндрового ДВС от нормы на 0,5 градуса, где ---- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

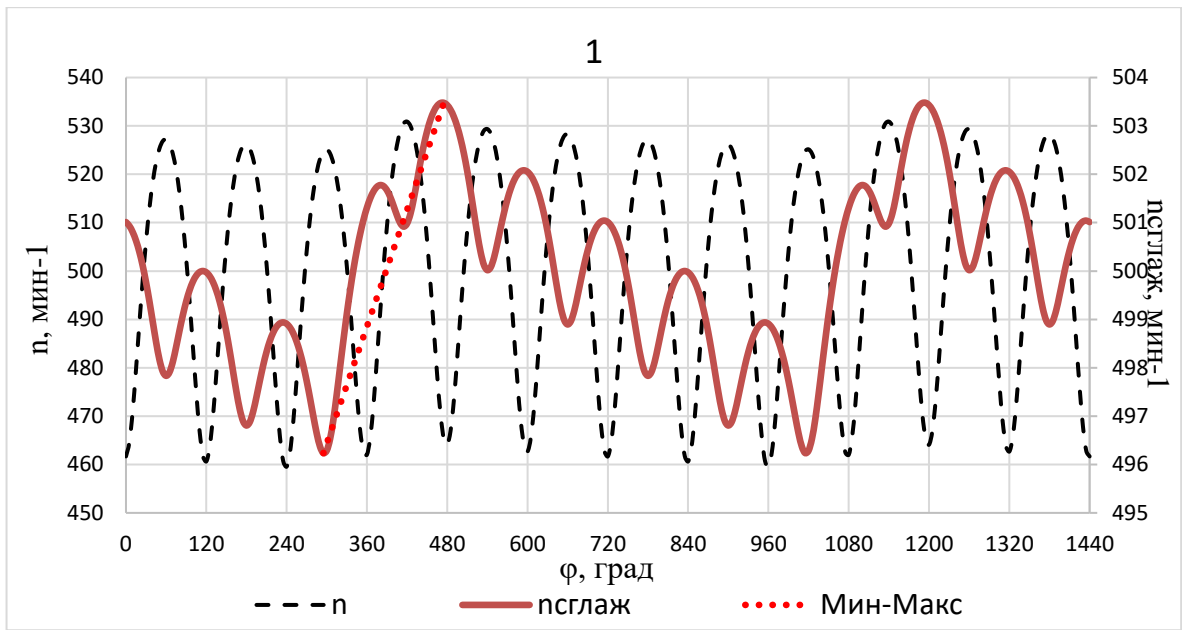


Рис. 3.72 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при отклонении угла кривошипа 1-го цилиндра 6-ти цилиндрового ДВС от нормы на 1 градус, где -- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

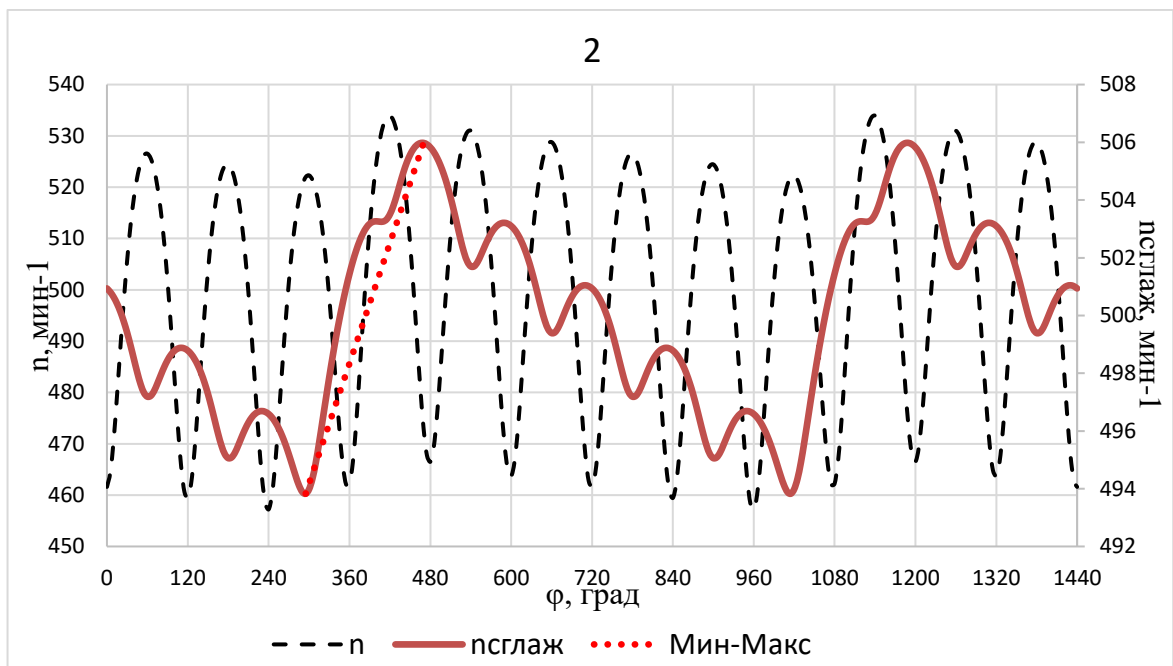


Рис. 3.73 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при отклонении угла кривошипа 1-го цилиндра 6-ти цилиндрового ДВС от нормы на 2 градуса, где --- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты

вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

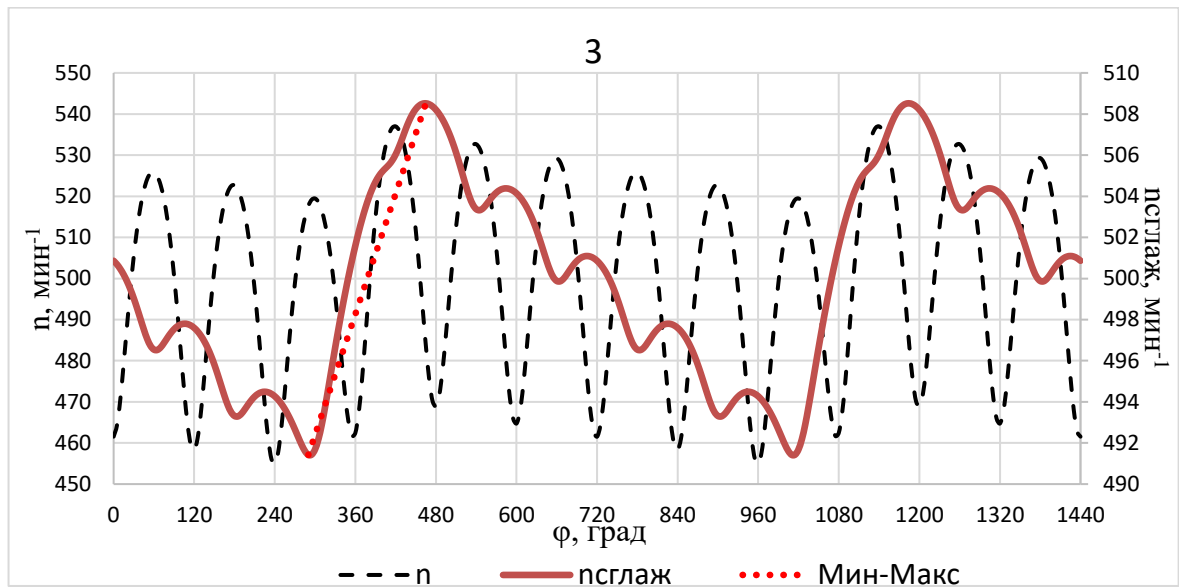


Рис. 3.74 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при отклонении угла кривошипа 1-го цилиндра 6-ти цилиндрового ДВС от нормы на 3 градуса, где --- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

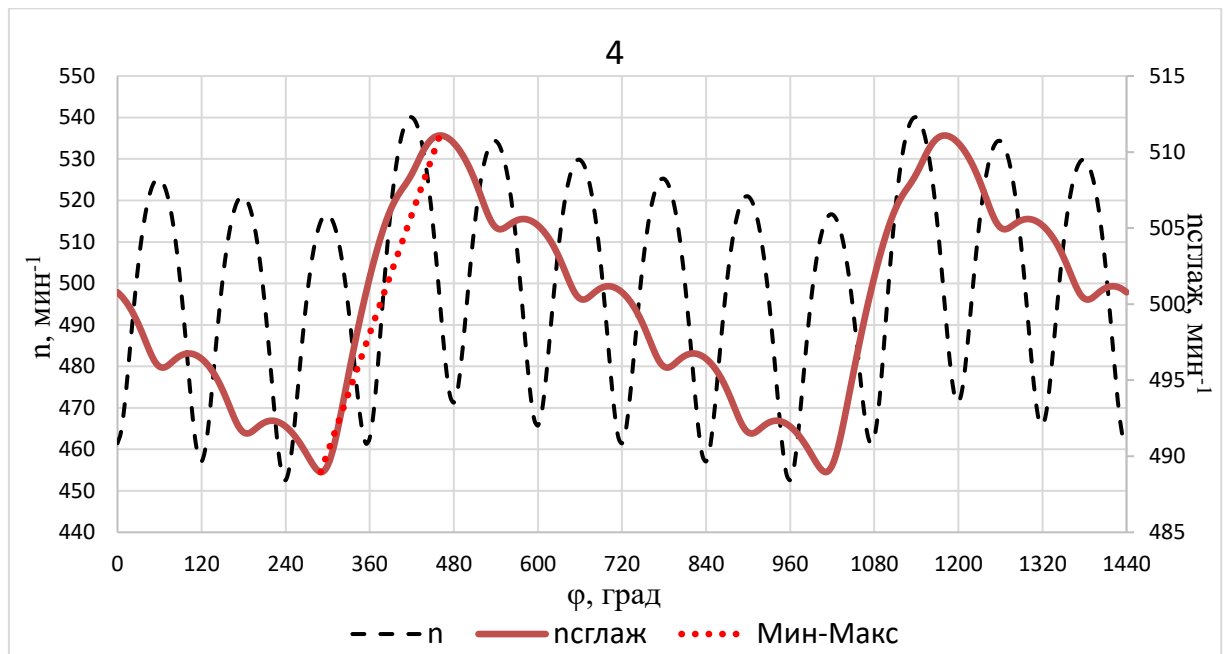


Рис. 3.75 Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при отклонении угла кривошипа 1-го цилиндра 6-ти цилиндрового ДВС от нормы на 4 градуса, где --- n частота вращения коленчатого вала, — $n_{\text{сглаж}}$ сглаженное по 25 точкам значение частоты

вращения коленчатого вала, ... прямая, проходящая через точки максимального и минимального значения частоты вращения.

Значения для точек минимума и максимума неравномерности мгновенной частоты вращения коленчатого вала, точки пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения за цикл, значения указанной точки пересечения, минимального и максимального значения показателя tg'' наличия неисправности, а также их отношение представлены в Таблице 3.16.

Таблица 3.16

Расчетные значения при влиянии угла отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы

Угол отклонения кривошипа 1-го цилиндра от нормы [град]	Π_{\min} , [мин ⁻¹]	Π_{\max} , [мин ⁻¹]	Φ_{\min} , [град]	Φ_{\max} , [град]	Φ_x , [град]	tg''_{\max}	tg''_{\min}	tg''_{\max}/tg''_{\min}
0,5	497,44	502,25	295	475	390,76	0,027	0,009	3
1	496,24	503,48	295	475	388,57	0,04	0,013	3
2	493,83	505,98	295	470	383,9	0,069	0,022	3,1
3	491,42	508,52	290	465	377,81	0,098	0,031	3,1
4	488,96	511,09	290	460	374,8	0,13	0,04	3,2

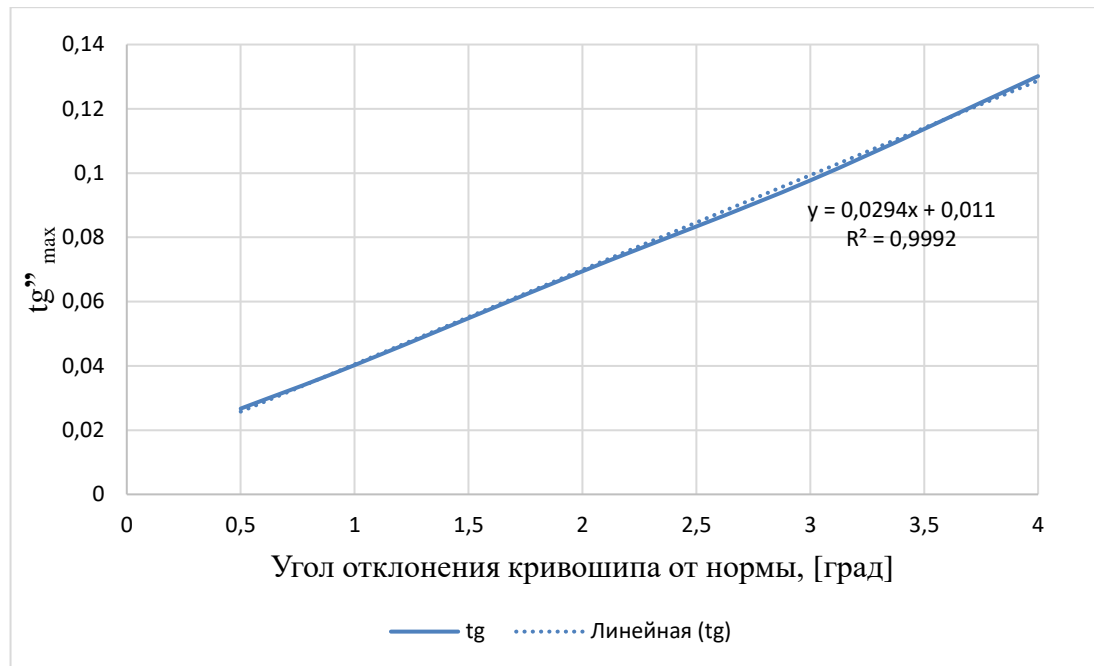


Рис. 3.76 Характер изменения значений показателя наличия неисправности tg''_{\max} в зависимости от отклонения угла кривошипа 1-го цилиндра 6-ти цилиндрического ДВС от нормы.

Полученные расчетные значения, соответствующие углу поворота коленчатого вала (φ_x), для точки пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения за цикл, лежат в интервале $374,8^0$ - $390,76^0$ ПКВ. При этом, tg''_{\max} в 3-3,2 раза больше значения tg''_{\min} , что позволяет использовать наибольшее значение показателя tg'' для определения зоны отклонения среднего значения мгновенной частоты вращения при изменении угла отклонения кривошипа от нормы, а также значение показателя tg''_{\max} при увеличении значения угла отклонения кривошипа от нормы также возрастает и определяется уравнением $tg'' = 0,0294 \cdot \Delta\varphi + 0,011$.

Проведем анализ полученных значений φ_x , представленных в таблицах 3.14-3.16. Диапазон значений φ_x возникновения приведенных выше неисправностей составляет от $374,8^0$ до $498,06^0$ ПКВ. При этом, исходя из того, что частота вращения и удельная тангенциальная сила связаны между собой через производную (раздел 2.3), то необходимо учитывать смещение значений по фазе в соответствии с углом чередования вспышек многоцилиндрового ДВС, при этом

смещение по фазе для 6-ти цилиндрического двигателя с чередованием вспышек 120° ПКВ будет составлять 60° ПКВ. Таким образом, с учетом того, что рабочий ход в 1-м цилиндре составляет от 360° до 540° (рабочий ход от ВМТ к НМТ), то можно сделать вывод, что полученный диапазон значений φ_x полностью лежит в области значений, соответствующих рабочему ходу в 1-м цилиндре. Соответственно, значение угла ПКВ φ_x позволяет локализовать неисправный цилиндр, и оно может быть выбрано в качестве диагностического показателя.

Проанализируем полученные наибольшие значения показателя tg_{\max} , приведенные в таблицах 3.14-3.16, при значениях изменения длины шатуна, угла отклонения кривошипа от нормы, которые находятся в допуске на производство этих деталей, и сопоставим со значениями $tg\alpha$ при влиянии доли снижения давления в цилиндре. Исходя из раздела 3.1 допуск на изготовление шатуна по длине составляет 1%. При этом значении изменения длины шатуна расчетное значение tg'_{\max} составляет 0,016. Допуск по углу отклонения кривошипа от нормы при производстве составляет $\pm 0,5$ градуса, при котором tg''_{\max} равен 0,04. Таким образом, приведенные значения tg_{\max} соответствуют отклонениям мгновенной частоты вращения в пределах допуска на производство деталей двигателя, то есть при значениях tg_{\max} меньше или равных $tg'_{\max} + tg''_{\max} = 0,04 + 0,016 = 0,056$ двигатель считается исправным. При сопоставлении значений tg^*_{\max} доли снижения давления в цилиндре двигателя (Таблица 3.14) и значение $tg_{\text{порог}} = 0,056$, характеризующее значение «шума», при котором влияющие на неравномерность частоты вращения отклонения параметров лежат в допусках, получаем, что значения доли снижения давления в цилиндре большие или равные 10% могут быть определены по неравномерности частоты вращения.

Таким образом, исходя из приведенных расчетных значений можно сделать следующие выводы:

1. В результате проведенных расчетных исследований подтверждено, что в качестве косвенных показателей технического состояния двигателя могут быть использованы изменение суммарной удельной тангенциальной силы и/или

мгновенная частота вращения коленчатого вала. При этом использование изменения суммарной удельной тангенциальной силы является более предпочтительным, чем изменение мгновенной частоты вращения, однако в настоящее время определение мгновенной частоты вращения коленчатого вала представляется более простым и дешевым ввиду наличия на большинстве современных автомобилей датчиков положения коленчатого вала.

2. Расчетный однофакторный анализ влияния изменения давления в цилиндре, влияния изменения длины шатуна и влияния отклонения угла кривошипа от нормы показал, что изменения этих параметров оказывают значительное влияние на неравномерность частоты вращения коленчатого вала по времени, характеризующимся углом поворота коленчатого вала.
3. По неравномерности мгновенной частоты вращения коленчатого вала возможно определить цилиндр, в котором проявляется влияние отклонения выбранных параметров (факторов) от нормы, что исключает необходимость проведения дополнительных расчетов для нахождения отклонения суммарной удельной тангенциальной силы.
4. При увеличении значения доли снижения давления в цилиндре показатель tg^*_{\max} наличия неисправности также возрастает.
5. Значения tg'_{\max} при изменении длины шатуна находятся примерно на одном уровне, что не позволяет определить явную зависимость между изменением длины шатуна и значением tg_{\max} .
6. Значения tg''_{\max} при увеличении значения угла отклонения кривошипа от нормы также возрастает.
7. Значения доли снижения давления в цилиндре больше или равные 10% могут быть определены по неравномерности частоты вращения.

Выводы по главе 3.

1. Разработана программа для проведения расчетных исследований в приложении MS Excel влияния конструктивных и режимных параметров (факторов) на изменение крутящего момента (удельной тангенциальной силы) и на изменение мгновенной частоты вращения коленчатого вала, позволяющая исследовать для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС:

- изменение давления в цилиндре двигателя (от 5% до 40%);
- неравномерность массы поршневой группы (от 1% до 10%);
- отклонение длины шатуна от нормы в интервале (от 1% до 5%);
- отклонение угла кривошипа от нормы (на $0,5^{\circ} - 4^{\circ}$ ПКВ),

на режимах холостого хода при 500 мин^{-1} и на номинальном при 3000 мин^{-1} .

2. Результаты расчетных исследований влияния параметров оценивались по среднеквадратическому отклонению $D_{\Sigma \Delta t}$ удельной тангенциальной силы от нормального значения показали:

- изменение давления в одном цилиндре двигателя от 5% до 40% приводит к увеличению $D_{\Sigma \Delta t}$ от 0,16 до 10,13 МПа. для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС на всех исследованных режимах работы;

- отклонение длины шатуна от нормы для 1-го цилиндра двигателя от 1% до 5% приводит к увеличению $D_{\Sigma \Delta t}$ от 0,0004 до 0,0116 МПа при 500 мин^{-1} холостого хода и к увеличению $D_{\Sigma \Delta t}$ от 0,0004 до 0,011 на номинальном режиме при 3000 мин^{-1} для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС;

- неравномерность массы поршневой группы, заключающейся в отклонении массы 1-го цилиндра, приводит к росту $D_{\Sigma \Delta t}$ в пределах от $1,42 \cdot 10^{-6}$ до $3,56 \cdot 10^{-5}$ МПа для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС на 500 мин^{-1} , при этом при равной частоте вращения для исследуемых двигателей не зависит от количества цилиндров в ДВС, а изменяется лишь с увеличением частоты вращения и при частоте вращения 3000 мин^{-1} $D_{\Sigma \Delta t}$ растет в пределах от 0,0018 до 0,18 МПа;

- отклонение угла кривошипа от нормы 1-го цилиндра приводит к увеличению $D_{\Sigma \Delta t}$ от 0,015 до 1,054 МПа при 500 мин^{-1} и от 0,012 до 0,87 МПа при 3000 мин^{-1} для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС.

3. Результаты расчетных исследований влияния параметров на отклонения удельной тангенциальной силы от среднего значения показали:

- изменение давления в первом цилиндре от 5% до 40% для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических ДВС, при этом наибольшее значение $D_{\Sigma \Delta t}$ относится к участкам 3 (360-540 °ПКВ), 4 (360-480 °ПКВ) и 7 (360-420 °ПКВ) соответственно на всех исследованных частотах вращения, что соответствует такту рабочего хода в первом цилиндре этих ДВС;

- отклонение длины шатуна от нормы для 1-го цилиндра двигателя от 1% до 5% при 500 мин⁻¹ и при 3000 мин⁻¹ приводит к незначительным изменениям $D_{\Sigma \Delta t}$ у 4-х цилиндрического ДВС по участкам, что не позволяет локализовать неисправный цилиндр, у 6-ти цилиндрического ДВС наибольшее значение $D_{\Sigma \Delta t}$ относится участку 4, соответствующему рабочему ходу в 1-м цилиндре, у 12-ти цилиндрического ДВС - на 8 участок, то есть на следующий по порядку работы после первого цилиндра, а именно на участок рабочего хода в седьмом цилиндре;

- неравномерность массы поршневой группы, заключающейся в отклонении массы первого цилиндра, при 500 мин⁻¹ и при 3000 мин⁻¹ приводит к незначительным изменениям $D_{\Sigma \Delta t}$ для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических ДВС по участкам, что не позволяет локализовать неисправный цилиндр;

- отклонение угла между осями кривошипов от нормы 1-го для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических ДВС показало, что наибольшее значение $D_{\Sigma \Delta t}$ относится к участкам 3 (360-540 °ПКВ), 4 (360-480 °ПКВ) и 7 (360-420 °ПКВ) соответственно на всех исследованных частотах вращения, что соответствует такту рабочего хода в первом цилиндре этих ДВС.

4. В процессе эксплуатации для локализации неисправного цилиндра удобнее использовать изменения мгновенной частоты вращения для чего был разработан алгоритм поиска. Результаты расчетных исследований локализации неисправного цилиндра по разработанному алгоритму показали для режима холостого хода при 500 мин⁻¹:

- в зоне работы неисправного цилиндра наблюдается изменение среднего значения частоты вращения, которое предлагается оценивать показателем наличия неисправности tg равным отношению изменения частоты вращения Δn к продолжительности участка по углу поворота коленчатого вала $\Delta\phi$;

- за зону проявления неисправности принимается участок, где tg имеет наибольшее значение, а неисправный цилиндр определяется по углу поворота коленчатого вала, соответствующему точке пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума мгновенной частоты вращения и прямой, соответствующей средней частоте вращения за цикл;

- для 6-ти цилиндрового двигателя зона неисправности для 1-го цилиндра находится в диапазоне 360-480 °ПКВ, для 2-го – 120-240 °ПКВ, для 3-го – 600-720 °ПКВ, для 4-го – 240-360 °ПКВ, для 5-го – 480-600 °ПКВ и для 6-го – 0-120 °ПКВ;

- различия между наибольшим и наименьшим показателями наличия неисправности в зависимости от наличия отклонений параметров составили tg_{max} от 1,4 до 3,2 раз больше, чем tg_{min} , что позволяет использовать наибольший показатель tg_{max} для определения зоны проявления неисправности.

5. Определены пороговые (минимальные) значения показателя наличия неисправности для допустимых значений параметров:

- длина шатуна (1%) $tg'_{max} = 0,016$;

- отклонения угла между осями кривошипов от нормы (0,5 градусов) $tg''_{max} = 0,04$

и определено пороговое значение показателя наличия неисправности $tg_{порог} = 0,056$, при превышении которого двигатель необходимо считать неисправным.

6. Значения доли снижения давления в цилиндре больше или равные 10% могут быть определены по неравномерности частоты вращения коленчатого вала, для которых $tg^* \geq 0,06$.

7. Достоверность теоретических расчетных исследований необходимо проверить экспериментально на действующем двигателе для чего необходимо

создать экспериментальную установку, позволяющую регистрировать мгновенные значения частоты вращения, и оценить правомерность разработанного алгоритма.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

4.1 Экспериментальная установка

Эксперимент проводился на дизельном шестицилиндровом двигателе IVECO F4HE9687P*J101 (основные технические характеристики двигателя представлены в приложении 2 [46]) с рядным расположением цилиндров, рабочим объемом равным $6,73 \text{ дм}^3$, максимальной мощностью 175 кВт и максимальным крутящим моментом 1020 Нм.

Неравномерность вращения коленчатого вала двигателя определялась по показаниям штатного датчика положения коленчатого вала со штатным инкрементным колесом, имеющим 58 зубьев с угловым шагом 6° ПКВ и свободный от зубьев сектор, а также МОТОР-ТЕСТЕР MT Pro (основные технические характеристики МОТОР-ТЕСТЕР представлены в приложении 3 [47]). С целью определения ВМТ 1-го цилиндра был использован мультимарочный сканер Delphi DS150E (основные технические характеристики сканера представлены в приложении 4 [48]).

Принципиальная схема установки приведена на рисунке 4.1, где 1 - двигатель IVECO F4HE9687P*J101, 2 - аккумулятор, 3 – МОТОР-ТЕСТЕР MTPro; 4 – персональный компьютер, 5 – штатный датчик положения коленчатого вала; 6 - мультимарочный сканер Delphi DS150E.

Для питания электронной системы управления двигателем 1, а также обеспечения запуска двигателя 1, производится подключение к аккумуляторной батарее 2. Сканер Delphi 6 подключается через диагностический разъем OBD2 к электронному блоку управления и к персональному компьютеру 4, с помощью которого по показаниям угла опережения впрыска топлива в первый цилиндр двигателя 1 определяется ВМТ этого цилиндра. Кроме того, МОТОР-ТЕСТЕР подключается к сигнальному контакту штатного датчика 5 положения коленчатого

вала и также к персональному компьютеру 4. Блок 7 внесения неисправности подключен к форсункам и служит для отключения подачи топлива по меньшей мере одной форсункой.

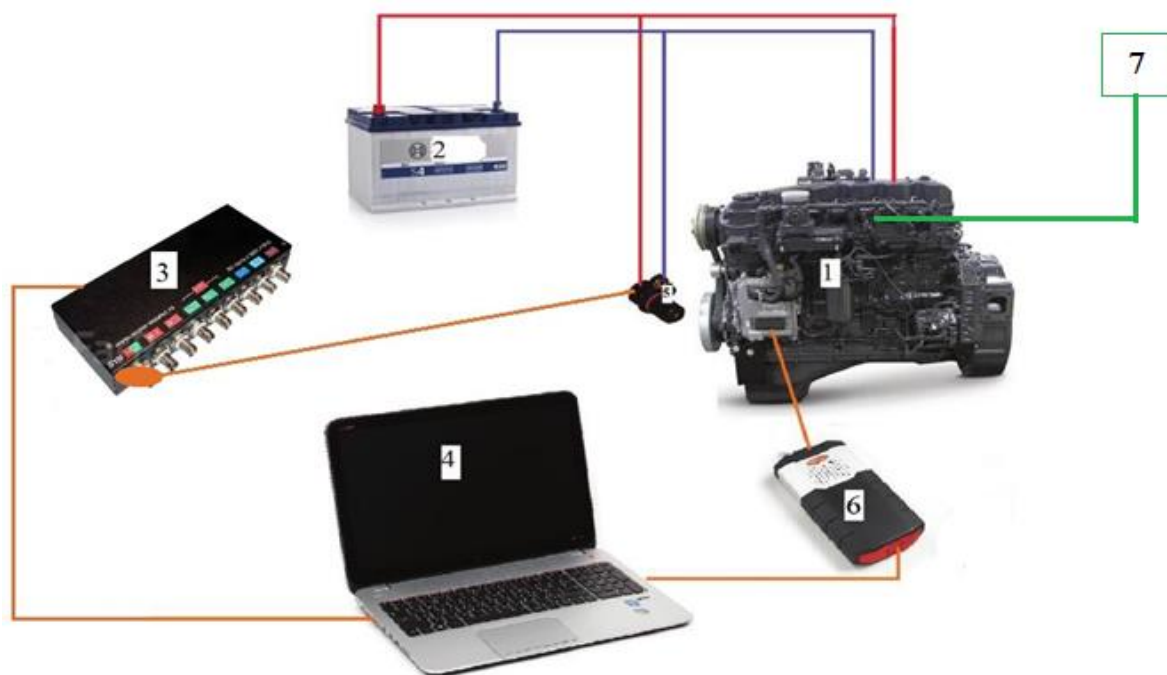


Рис. 4.1 - Принципиальная схема установки. 1 - двигатель IVECO F4HE9687P*J101, 2 - аккумулятор, 3 – МОТОР-ТЕСТЕР МТPro; 4 - компьютер, 5 – штатный датчик положения коленчатого вала; 6 - мультимарочный сканер Delphi DS150E, 7 - блок внесения неисправности.

4.2. Методика экспериментальных исследований

Методика экспериментальных исследований включала в себя:

1. Определение мгновенной частоты вращения коленчатого вала по углу поворота коленчатого вала исправного двигателя.
2. Определение мгновенной частоты вращения коленчатого вала по углу поворота коленчатого вала при отключенной подаче топлива в выбранный цилиндр двигателя.
3. Экспериментальное выявление неисправного цилиндра по мгновенной частоте вращения коленчатого вала.

- Определение неравномерности частоты вращения коленчатого вала по углу поворота коленчатого вала исправного двигателя проводилось следующим образом:

А). Холодный двигатель (с температурой от +15 °С до 20 °С) прогревался при оборотах 800 мин-1 холостого хода до температуры охлаждающей жидкости, составляющей 80-90°С. После прогрева двигателя до рабочей температуры считывались показания со штатного датчика положения коленчатого вала с помощью МОТОР-ТЕСТЕР МТPro.

В). Полученные значения сохранялись на диск компьютера для дальнейшей обработки.

С). Обработка полученных значений проводилась по следующей методике:

- Производилась выборка значений напряжений в местах перехода значения от положительного к отрицательному и, соответственно, определялись две точки, одна из которых имела положительное значение, а вторая – отрицательное значение напряжения.

- По уравнению прямой, проходящей через две точки

$$\frac{y - y_1}{y_2 - y_1} = \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} \quad (57)$$

определялась точка пересечения этой прямой с прямой, проходящей через ось ОХ, соответствующей значению напряжения равному 0 В, с целью определения времени t мкс, соответствующему началу зуба инкрементного колеса.

- По разнице между временем $\Delta t = t_2 - t_1$ соседних зубьев определялась мгновенная частота вращения коленчатого вала на участке, соответствующем повороту коленчатого вала от начала первого зуба до начала второго зуба.

- Производилось сглаживание полученных значений мгновенной частоты вращения по углу поворота коленчатого вала.

- Производилась выборка минимальных и максимальных значений частоты вращения и соответствующие им значения углов поворота коленчатого вала за два цикла.

- Определялись значения угла φ_x поворота коленчатого, соответствующие точке пересечения прямых, проходящих через точки минимума и максимума, и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения коленчатого вала. Также определялось значение показателя tg наличия неисправности, равного отношению изменения мгновенной частоты вращения Δn к продолжительности участка по углу поворота коленчатого вала $\Delta\varphi$

- Из полученных значений tg выбиралось максимальное значение с целью определения участка поворота коленчатого вала, соответствующего наибольшему изменению мгновенной частоты вращения, это значение tg_{max} сопоставлялось с определенным в разделе 3.7 пороговым значением $tg_{порог} = 0,056$, а также по этому значению tg_{max} выбиралось соответствующее ему значение угла поворота φ_x для локализации неисправного цилиндра.

-Получение неравномерности частоты вращения коленчатого вала по углу поворота при отключенной подачи топлива в выбранный цилиндр проводилось следующим образом:

А). Холодный двигатель (с температурой от $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $20\text{ }^{\circ}\text{C}$) прогревался при оборотах 800 мин^{-1} холостого хода до температуры охлаждающей жидкости, составляющей $80-90^{\circ}\text{C}$. После прогрева двигателя до рабочей температуры производилось отключение подачи топлива форсункой заданного цилиндра (1-го цилиндра ДВС) и считывались показания со штатного датчика положения коленчатого вала с помощью МОТОР-ТЕСТЕР МТPro.

В). Полученные значения сохранялись на диск компьютера для дальнейшей обработки.

С). Обработка полученных значений проводилась по следующей методике:

- Производилась выборка значений напряжений в местах перехода значения от положительного к отрицательному и, соответственно, определялись две точки, одна из которых имела положительное значение, а вторая – отрицательное значение напряжения.

- По уравнению прямой (57), проходящей через две точки определялась точка пересечения этой прямой с прямой, проходящей через ось ОХ, соответствующей значению напряжения равному 0 В, с целью определения времени t мкс, соответствующему началу зуба инкрементного колеса.

- По разнице между временем $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ соседних зубьев определялась частота вращения коленчатого вала на участке, соответствующем повороту коленчатого вала от начала первого зуба до начала второго зуба.

- Производилось сглаживание полученных значений частоты вращения по углу поворота коленчатого вала.

- Производилась выборка минимальных и максимальных значений неравномерности частоты вращения и соответствующие им значения углов поворота коленчатого вала за два цикла.

- Определялись значения угла φ_x поворота коленчатого, соответствующие точке пересечения прямых, проходящих через точки минимума и максимума, и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения коленчатого вала. Также определялось значение показателя tg наличия неисправности.

- Из полученных значений tg выбиралось максимальное значение с целью определения участка поворота коленчатого вала, соответствующего наибольшему изменению неравномерности частоты вращения, это значение tg_{max} сопоставлялось с определенным в разделе 3.7 пороговым значением $tg_{порог} = 0,056$, а также по этому значению tg_{max} выбиралось соответствующее ему значение угла поворота φ_x для локализации неисправного цилиндра.

4.3. Программа экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований была определена исходя из алгоритма анализа технического состояния двигателя и состояла из следующих этапов:

1. Определение неравномерности частоты вращения исправного двигателя на режиме холостого хода.

В процессе определения неравномерности частоты вращения исправного двигателя средняя частота вращения на холостом ходу и температура охлаждающей жидкости двигателя были постоянны.

Испытания двигателя проводились при частоте вращения равной 800 мин^{-1} .

Температура охлаждающей жидкости двигателя составляла $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате обработки экспериментальных данных были определены мгновенные частоты вращения исправного двигателя, проведено сглаживание полученных значений, выбраны минимальное и максимальное значения из сглаженных значений частоты вращения и определен показатель tg наличия неисправности.

2. Экспериментальное выявление и локализация неисправности, заключающейся в отсутствии подачи топлива в одном из цилиндров двигателя.

Определение мгновенной частоты вращения двигателя с отключенной подачей топлива в одном из цилиндров на режиме холостого хода.

В процессе определения мгновенной частоты вращения двигателя с отключенной подачей топлива в одном из цилиндров средняя частота вращения на холостом ходу и температура охлаждающей жидкости двигателя были постоянны.

Испытания двигателя проводились при частоте вращения равной 800 мин^{-1} .

Температура охлаждающей жидкости двигателя составляла $85 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В результате обработки экспериментальных данных были определены мгновенные частоты вращения двигателя с отключенной подачей топлива в один из цилиндров, проведено сглаживание полученных значений, выбраны минимальное и максимальное значения из сглаженных значений частоты вращения и определен показатель tg_{\max} наличия неисправности.

4.4. Результаты экспериментальных исследований

4.4.1. Обработка экспериментальных данных для исправного двигателя.

Для того, чтобы оценить показатель tg двигателя с неисправностью, необходимо получить значение tg и для исправного двигателя на холостом ходу. Для достижения этой цели были проведены экспериментальные исследования по методике и программе, описанных в разделах 4.2-4.3. За начало отсчета выбиралась ВМТ 1-го цилиндра начала такта впуска.

Графики неравномерности частоты вращения n и сглаженной частоты вращения по 19 точкам $n_{сглаж}$ коленчатого вала за два цикла при средней частоте вращения 800 мин^{-1} для исправного двигателя представлены на рис. 4.2. Из значений сглаженной частоты вращения $n_{сглаж}$ коленчатого вала были выбраны точки минимального и максимального значений, а также рассчитаны показатели tg для прямых, проходящих через эти точки, а также отношение максимального и минимального значений показателя tg , и сведены в таблицу 4.1 и также представлены на рис. 4.2

Таблица 4.1

Расчетные значения для исправного двигателя

$n_{\text{мин}},$ [мин ⁻¹]	$n_{\text{макс}},$ [мин ⁻¹]	$\varphi_{\text{мин}},$ [град]	$\varphi_{\text{макс}},$ [град]	$\varphi_x,$ [град]	tg	$tg_{\text{макс}}/tg_{\text{мин}}$
796,9	803,1	576	30	287,2	0,011	3,27
		576	750	668,0	0,036	

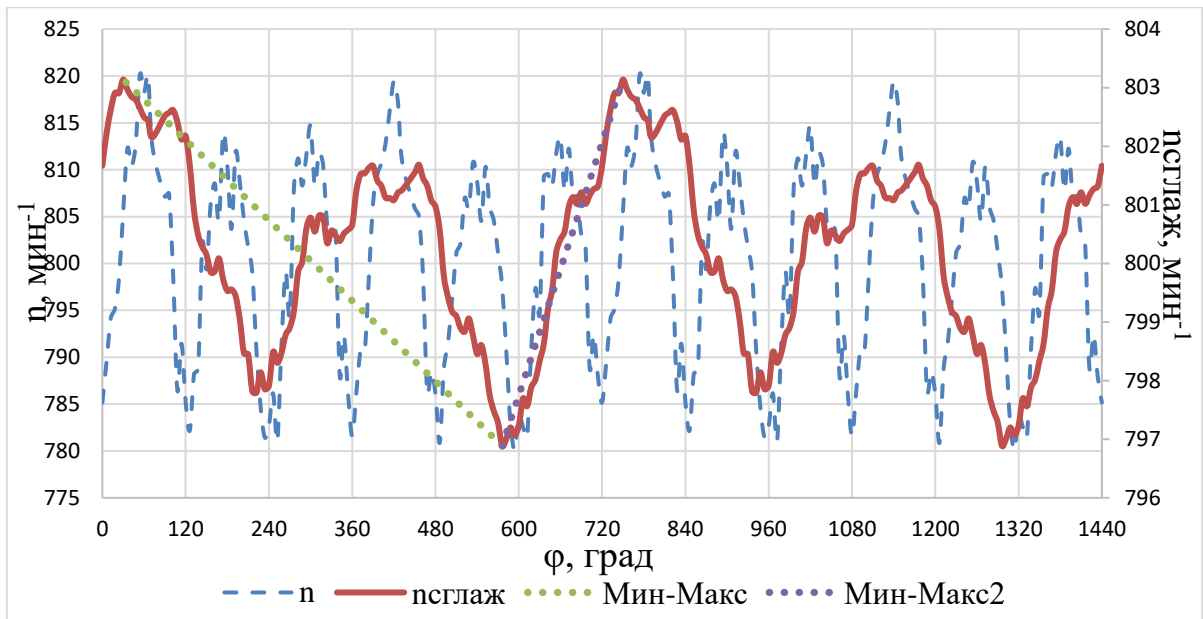


Рис. 4.2 Частота вращения коленчатого вала исправного двигателя по углу поворота коленчатого вала, где --- частота вращения по углу поворота коленчатого вала, — сглаженная частота вращения по 19 точкам, ... прямые, соединяющие минимальные и максимальные точки значений частоты вращения коленчатого вала.

Как видно, наибольшее значение tg_{\max} в 3,27 раза больше минимального значения tg_{\min} , что позволяет использовать наибольшее значение показателя наличия неисправности. Из полученных значений tg выбирается то, которое имеет большее значение, а именно $tg_{\max} = 0,036$. Исходя из определенного в разделе 3.7 значения $tg_{\text{порог}} = 0,056$, меньше которого оказывают своё влияние допуски на производство деталей двигателя, можно сделать вывод о том, что определенное в результате эксперимента значение $tg_{\max} = 0,036$ меньше порогового значения $tg_{\text{порог}} = 0,056$ для «шума», что соответствует исправному двигателю.

4.4.2. Обработка экспериментальных данных для двигателя с отключенной подачей топлива в 1-м цилиндре.

При постановке эксперимента, характеризующего отсутствие подачи топлива в цилиндр двигателя IVECO F4HE9687P*J101, отключался разъем подключения форсунки 1-го цилиндра к ЭБУ, управляющего системой подачи топлива Common Rail, и получали данные со штатного датчика положения коленчатого вала. При этом, за начало отсчета выбирается ВМТ 1-го цилиндра начала такта впуска.

Аналогичным образом, как и для исправного двигателя были получены значения и построены графики неравномерности частоты вращения n , сглаженной частоты вращения по 19 точкам $n_{\text{сглаж}}$ коленчатого вала за два цикла при средней частоте вращения 800 мин^{-1} для двигателя с отключенной форсункой 1-го цилиндра представлены на рисунке 4.3. Из значений сглаженной частоты вращения $n_{\text{сглаж}}$ коленчатого вала были выбраны точки минимального и максимального значений, а также рассчитаны показатели tg и отношение $tg_{\text{max}}/tg_{\text{min}}$, и сведены в таблицу 4.2 и также представлены на рисунке 4.3

Таблица 4.2

Расчетные значения для двигателя с отключенной подачей топлива в 1-м цилиндре

$n_{\text{мин}}$, [мин ⁻¹]	$n_{\text{макс}}$, [мин ⁻¹]	$\Phi_{\text{мин}}$, [град]	$\Phi_{\text{макс}}$, [град]	Φ_x , [град]	tg	$tg_{\text{max}}/tg_{\text{min}}$
790,9	809,9	576	318	449,6	0,074	1,8
		576	1038	802,3	0,041	

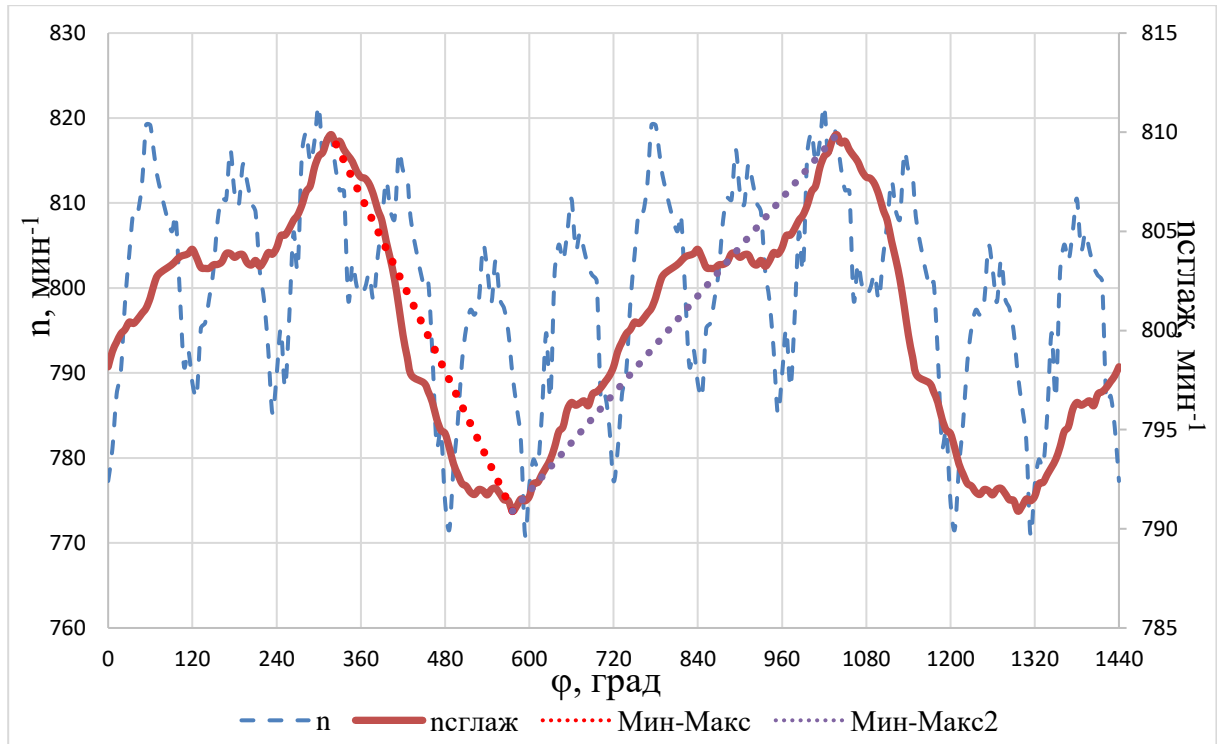


Рис. 4.3 Частота вращения коленчатого вала с отключенной подачей топлива в 1-м цилиндре по углу поворота коленчатого вала, где --- частота вращения по углу поворота коленчатого вала, — сглаженная частота вращения по 19 точкам, ... прямые, соединяющие минимальные и максимальные точки значений частоты вращения коленчатого вала.

Как видно из таблицы 4.2 и графиков, представленных на рис. 4.3, были получены значения tg для двух прямых, проходящих через определенные в ходе выборки точки минимальных и максимальных значений мгновенной сглаженной частоты вращения. Наибольшим из рассчитанных значений tg является 0,074, который в 1,8 раза, чем наименьшее значение показателя tg и относится к прямой, проходящей через точки $\varphi_{\text{мин}} = 576^0$ ПКВ и $\varphi_{\text{макс}} = 318^0$ ПКВ. При этом, выбранный показатель $tg = 0,074$ больше порогового значения $tg_{\text{порог}} = 0,056$, что позволяет сделать вывод о наличии неисправности. Значение угла поворота коленчатого вала для точки пересечения этой прямой и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения коленчатого вала, составляет $\varphi_x = 449,6^0$ ПКВ. При этом, $\varphi_x = 449,6^0$ ПКВ относится к интервалу $360^0 - 480^0$ ПКВ, соответствующему такту рабочего хода в 1-м цилиндре.

4.4.3. Сопоставление расчетных и экспериментальных исследований.

Для сопоставления полученных экспериментально значений показателя tg и угла φ_x при отключенной подаче топлива в 1-м цилиндре двигателя IVECO F4HE9687P*J101 проведем расчетный анализ частоты вращения при отключенной подаче топлива в 1-м цилиндре, используя параметры, соответствующие реальному двигателю IVECO F4HE9687P*J101 и режиму работы двигателя при проведении эксперимента, по методике, приведенной в главе 3. Для этого зададимся исходными значениями параметров, полученными тепловым расчетом, для расчета суммарной тангенциальной силы при отключенной подаче топлива в 1-м цилиндре и последующего расчета частоты вращения. Исходные данные приведены в таблице 4.3

Таблица 4.3

Исходные параметры для расчета кинематики и динамики двигателя IVECO

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
N_e , [кВт]	0	D , [мм]	104	Нумерация цилиндров левого ряда	153624
n , [мин ⁻¹]	800	S , [мм]	132	Угол между кривошипами, [град]	120
i	6	h_m	0,077	Углы между вспышками, [град]	120
e_δ	17,5	Тактность	4	D_M , [м]	0,5
P_r , [МПа]	0,097	λk	0,29	B_M , [м]	0,025
P_a , [МПа].	0,097	m_n , [кг/м ²]	200		
n_1	1,38	$m_{ш}$, [кг/м ²]	300		

P_z , [МПа]	5,04	Расположение цилиндров	рядное
n_2	1,38	Угол развала цилиндров, [град]	0
P_b , [МПа]	0,097	Порядок работы цилиндров	153624

Полученные результаты значений суммарной тангенциальной силы и неравномерности частоты вращения коленчатого вала при отключенной подаче топлива в 1-м цилиндре приведены в Приложении 1 Таблица 29.

Аналогичным образом, как и при обработке экспериментальных данных были получены значения и построены графики частоты вращения n , сглаженной частоты вращения $n_{\text{сглаж}}$ коленчатого вала за два цикла при средней частоте вращения 800 мин^{-1} , полученных по результатам расчетов, для двигателя с отключенной форсункой 1-го цилиндра представлены на рисунке 4.4. Из значений сглаженной частоты вращения $n_{\text{сглаж}}$ коленчатого вала были выбраны точки минимального и максимального значений частоты вращения, а также рассчитаны наибольшее и наименьшее значения показателей tg , и сведены в таблицу 4.4 и также представлены на рисунке 4.4

Таблица 4.4

Результаты расчетного эксперимента при отключенной подаче топлива в 1-м цилиндре

$n_{\text{мин}}$, [мин ⁻¹]	$n_{\text{макс}}$, [мин ⁻¹]	$\varphi_{\text{мин}}$, [град]	$\varphi_{\text{макс}}$, [град]	φ_x , [град]	tg	$tg_{\text{макс}}/$ $tg_{\text{мин}}$
793,22	807,96	530	305	415,65	0,065	2,24
		530	1038	788,17	0,029	

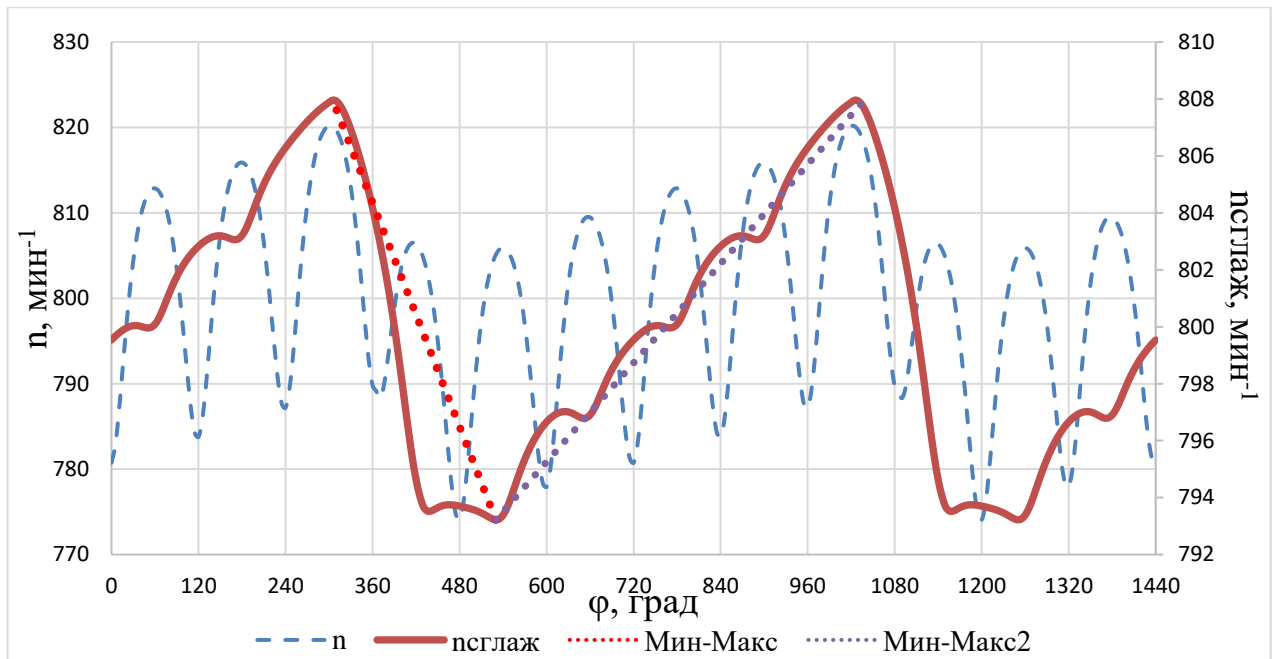


Рис. 4.4. Частота вращения коленчатого вала с отключенной подачей топлива в 1-м цилиндре по углу поворота коленчатого вала, полученные в результате расчетного эксперимента, где --- частота вращения по углу поворота коленчатого вала, — сглаженная частота вращения, ... прямые, соединяющие минимальные и максимальные точки значений частоты вращения коленчатого вала.

Как видно из таблицы 4.4 и графиков, представленных на рис. 4.4, были получены значения tg для двух прямых, проходящих через определенные в ходе выборки точки минимальных и максимальных значений сглаженной частоты вращения. Наибольшим из рассчитанных значений tg является 0,065. При этом, выбранное значение $tg_{\max} = 0.065$ больше порогового значения $tg_{\text{порог}} = 0,056$. tg_{\max} в 2,24 раза больше минимального значения tg_{\min} и относится к прямой, проходящей через точки $\varphi_{\min} = 530^{\circ}$ ПКВ и $\varphi_{\max} = 305^{\circ}$ ПКВ, а значение угла поворота коленчатого вала для точки пересечения этой прямой и прямой, соответствующей среднему значению частоты вращения коленчатого вала, составляет $\varphi_x = 415,65^{\circ}$ ПКВ. При этом, $\varphi_x = 415,65^{\circ}$ ПКВ относится к интервалу $360^{\circ} - 480^{\circ}$ ПКВ, соответствующему такту рабочего хода в 1-м цилиндре.

Сопоставим полученные в ходе расчета данные с экспериментальными, приведенными в разделе 4.4.2. На рис. 4.4.1 приведены графики частот вращения коленчатого вала с отключено подачей топлива в 1-м цилиндре двигателя IVECO, полученные экспериментально и расчетно.

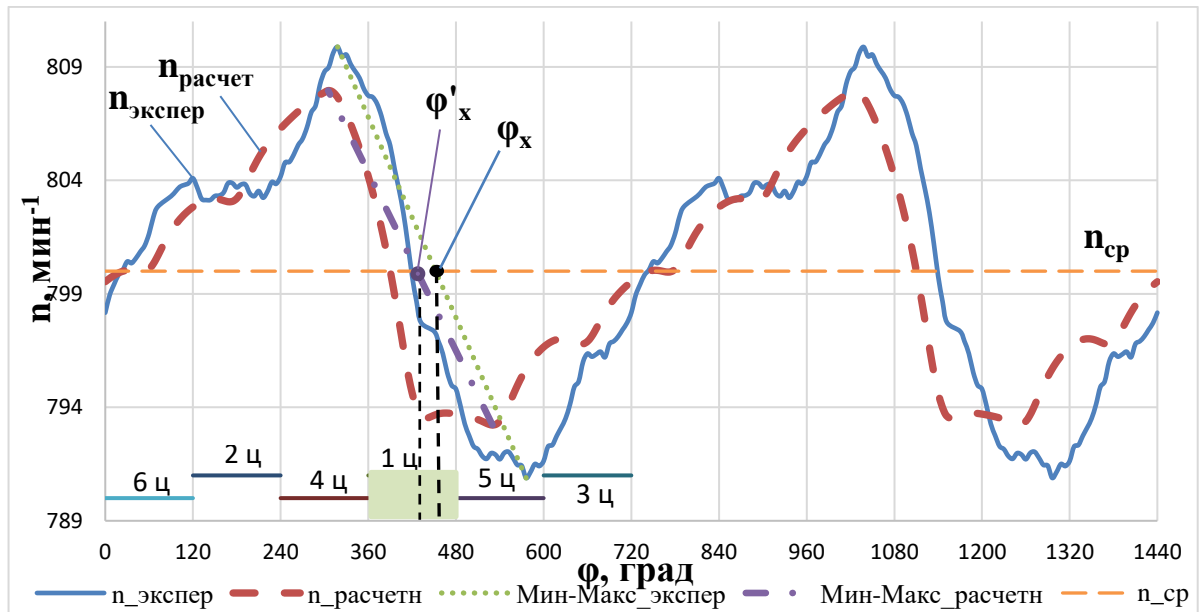


Рис. 4.4.1. Частоты вращения коленчатого вала с отключенной подачей топлива в 1-м цилиндре по углу поворота коленчатого вала, полученные в результате эксперимента и расчета, где — частота вращения, полученная экспериментально, --- частота вращения, полученная расчетно, ... прямая, соединяющая минимальную и максимальную точки значений частоты вращения, полученной экспериментально, — · прямая, соединяющая минимальную и максимальную точки значений частоты вращения, полученной расчетно.

Для сопоставления результатов расчетного эксперимента и реального эксперимента сведем полученные значение в Таблицу 4.4.1

Результаты расчетного эксперимента и реального эксперимента при отключенной подаче топлива в 1-м цилиндре

Эксперимент				Расчет				Локализация эксп./расчет
tg_{max}	tg_{min}	φ_x , [град]	$tg_{max}/$ tg_{min}	tg_{max}	tg_{min}	φ'_x , [град]	$tg_{max}/$ tg_{min}	
0,074	0,041	449,6	1,8	0,065	0,029	415,65	2,24	1 ц/1 ц
$\Delta tg = 0,033$				$\Delta tg = 0,036$				

Сопоставив минимальное и максимальное значения показателей tg для эксперимента получили, что абсолютные значения отклонения $\Delta tg = 0,033$, а относительное - в 1,8 раза, а также полученные расчетным моделированием – абсолютное значение отклонения составило $\Delta tg = 0,036$, а относительное отклонение составило 2,2 раза. Таким образом получим, что наибольшее значение показателя tg , может быть выбрано в качестве критерия наличия неисправности. Кроме того, значения Δtg для эксперимента и для расчета близки по своей величине, что позволяет сделать вывод о правомерности выбора показателя tg , в качестве критерия наличия неисправности в цилиндре двигателя.

Как видно, полученные углы φ_x для эксперимента и расчета относятся к участку 360-480° ПКВ, что соответствует рабочему ходу в 1-м цилиндре. Сопоставим разницу между полученными углами ПКВ с интервалом рабочего хода одного цилиндра 6-ти цилиндрового ДВС, а именно со 120°. Таким образом, $\Delta\varphi_x = 33,95^\circ$ в 3,54 раза меньше, чем указанный диапазон для локализации цилиндра, что позволяет с достаточной достоверностью определить неисправный цилиндр. Исходя из сказанного выше следует, что результаты расчета и экспериментальное исследование позволили локализовать один и тот же цилиндр, а именно 1-ый

цилиндр, и, как следствие, разработанный алгоритм диагностики позволяет по результатам регистрации мгновенной частоты вращения коленчатого вала локализовать цилиндр с неисправностью.

4.5. Перспективы развития метода оценки протекания рабочих процессов в двигателе по неравномерности частоты вращения коленчатого вала [35].

Разрабатывая методику оценки протекания рабочих процессов в двигателе по неравномерности вращения коленчатого вала, предполагается ее применение в условиях имитации работы двигателя по внешней скоростной характеристике - на режиме свободного ускорения коленчатого вала двигателя при положении органа управления мощностью, соответствующего ее максимальному значению. В этом случае избыточная мощность двигателя расходуется на повышение кинетической энергии его подвижных деталей при увеличении частоты вращения коленчатого вала.

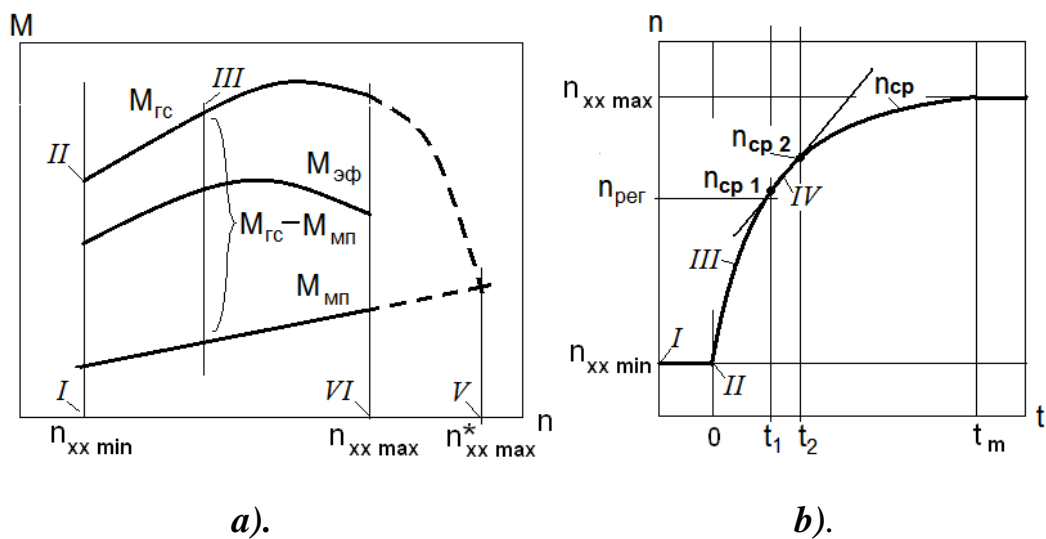


Рис.4.5. Характеристики протекания крутящего момента (a) и характер изменения средней частоты вращения коленчатого вала (b) при свободном разгоне двигателя

Для анализа рабочих процессов во всех цилиндрах многоцилиндрового двигателя, работающего по четырехтактному циклу, достаточно, при достижении выбранной исследователем частоты вращения $n_{пер}$ во время свободного ускорения

двигателя, регистрации мгновенной частоты вращения в течение двух полных оборотов коленчатого вала. Алгоритм испытания при этом предполагается следующим.

1. Двигатель прогревается на режиме холостого хода, при этом частота вращения равна минимально устойчивым оборотам холостого хода $n_{xx \min}$, а эффективный момент $M_{эф}$ равен нулю (точка *I* на рис.4.5).
2. В момент времени, равный $t = 0$ (точка *II* на рис. 4.5), орган управления мощностью двигателя переводится в положение максимальной мощности; среднее индикаторное давление цикла становится максимальным при данной частоте вращения коленчатого вала и наибольшего значения достигает условный крутящий момент газовых сил $M_{гс}$, приведенный к коленчатому валу.
3. Частота вращения коленчатого вала увеличивается за счет разницы между положительным моментом газовых сил $M_{гс}$ и отрицательным моментом механических потерь $M_{мп}$ (линия *III* на рис. 4.5). Увеличение частоты происходит до тех пор, пока условный момент механических потерь не станет равен условному моменту газовых сил ($n_{xx \max}^*$, точка *V* на рис. 4.5а), либо частота вращения не превысит предельную частоту $n_{xx \max}$ и электронный блок управления не отключит подачу топлива (точка *VI* на рис. 4.5а).
4. При достижении частоты вращения больше заданной $n_1 > n_{рег}$, поступает команда на запись информации о текущей частоте вращения коленчатого вала на протяжении 2-х оборотов коленчатого вала (участок *IV* на рис. 4.5b). Во время регистрации, за время $t_2 - t_1$ частота вращения изменится от n_1 до n_2 . Изменение за два оборота средней частоты при разгоне можно учесть в дальнейшем расчете, приняв в первом приближении линейный характер изменения средней частоты (рис. 4.5а).

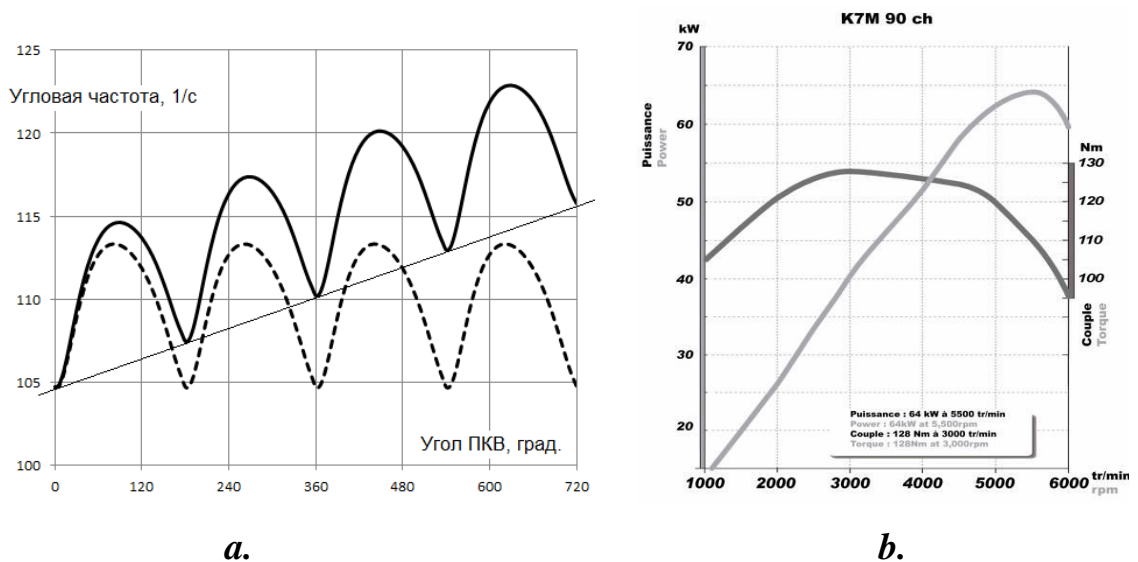


Рис. 4.6. *a*). - характер изменения мгновенной частоты вращения коленчатого вала за два оборота 4-цилиндрового ДВС при свободном разгоне
b). - экспериментальная характеристика двигателя Рено *K7M 90ch* [49]

Предлагается, реальное значение мгновенной частоты вращения коленчатого вала (сплошная линия на рис. 4.6*a*) заменить мгновенной частотой, приведенной к постоянной средней частоте (пунктирная линия на рис. 4.6*a*) путем вычитания линеаризованной средней частоты вращения коленчатого вала (тонкая прямая линия) при разгоне. Погрешность такого допущения незначительна. Она оценена решением задачи типового разгона двигателя с известными характеристиками: внешней скоростной характеристикой по крутящему моменту и закономерностью изменения момента механических потерь в функции частоты вращения коленчатого вала двигателя.

В качестве объекта для оценки был выбран 4-цилиндровый рядный бензиновый двигатель Рено *K7M 90ch* с рабочим объемом $iV_h = 1,6$ л, имеющим диаметр цилиндра $D_{\text{цил}} = 0,0795$ м и ход поршня $S_{\text{пор}} = 0,0805$ м, внешняя скоростная характеристика которого приведена на рис. 4.6*b*. Момент инерции подвижных деталей рядного автомобильного двигателя, приведенных к коленчатому валу составляет 10...30 % от момента инерции маховика [25], который получим, как момент инерции диска по известной геометрии маховика $1,15 \cdot J_{\text{МХВ}} = 0,53 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Известно, что среднее условное давление механических потерь в поршневых двигателях, с достаточной для практических расчетов точностью аппроксимируется зависимостью, вида

$$p_{мп} = a + b \cdot c_{пор} = a + b \cdot \frac{S_{пор} \cdot n}{30}, \quad (56)$$

где $c_{пор}$ - средняя скорость поршня, вычисляемая через частоту вращения коленчатого вала n и ход поршня $S_{пор}$;

$a = 0,08$ и $b = 0,016$ - эмпирические коэффициенты (значения взяты для рядного 4-цилиндрового короткоходного $D_{цил} / S_{пор} < 1$ двигателя с искровым зажиганием [50])

Условный тормозной момент, возникающий на коленчатом вале двигателя вследствие механических потерь может быть получен, исходя из того, что для 4-тактного двигателя связь между крутящим моментом $M_{кр}$ и средним давлением $p_{ср}$ имеет вид

$$M_{кр} = \frac{9550 \cdot iV_h \cdot p_{ср}}{120}. \quad (57)$$

Таким образом, тормозной момент на валу двигателя $K7M$ в функции частоты вращения коленчатого вала может быть описан выражением

$$M_{мп} = 10,2 + 0,00547 \cdot n. \quad (58)$$

На рис. 4.7а приведен график этой функции. Там же приведена аппроксимация экспериментальной (из рис. 4.6b) внешней скоростной характеристики $M_{эф}$ полиномом третьего порядка.

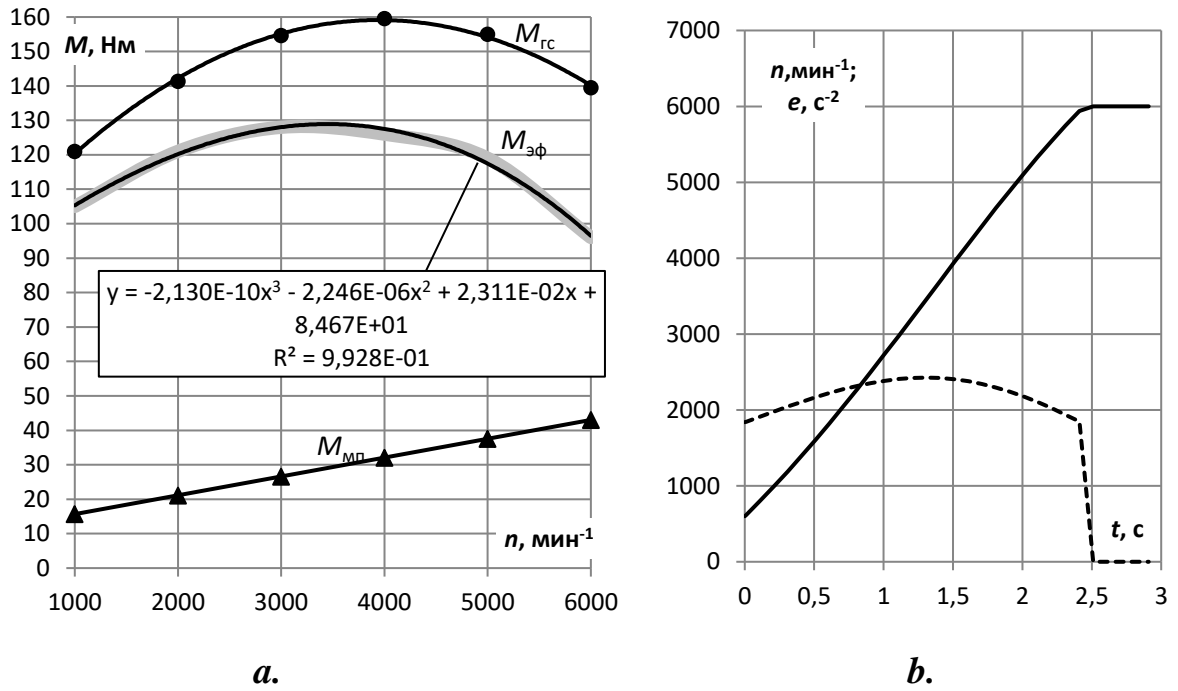


Рис. 4.7. *a*). - характер протекания экспериментальной кривой крутящего момента двигателя *K7M 90ch* (толстая бледная линия $M_{эф}$), линии аппроксимирующей внешнюю скоростную характеристику (тонкая линия $M_{эф}$), момента механических потерь $M_{мп}$ и момента от газовых сил $M_{гс}$ в функции частоты вращения коленчатого вала
b). - угловое ускорение (пунктирная линия) и изменение частоты вращения (сплошная линия) коленчатого вала двигателя *K7M 90ch* при свободном разгоне

На графике рис. 4.7*a* приведена кривая условного момента газовых сил

$$M_{гс} = M_{эф} + M_{мп}, \quad (59)$$

условного индикаторного момента, который развивался бы на коленчатом валу при работе по внешней скоростной характеристике при отсутствии внутренних потерь в двигателе. При свободном разгоне механические потери присутствуют, газовые силы близки к соответствующим значениям без учета переходных процессов в системе впуска, топливоподающей аппаратуре и системе охлаждения, поэтому разгон будет происходить под действием момента, близкого по своим значениям эффективному крутящему моменту, развиваемому двигателем при работе по внешней скоростной характеристике. При этом в двигателе с искровым зажиганием переходными процессами во впускной системе можно пренебречь, так как

двигатель не имеет инерционной системы газотурбинного наддува. Переходные процессы в топливоподающей аппаратуре также несущественны, так как двигатель оснащен системой топливоподачи аккумуляторного типа и быстродействующими электромагнитными форсунками [93].

На рис. 4.7*b* приведен график изменения углового ускорения e и частоты ω вращения коленчатого вала при свободном разгоне полученных интегрированием выражения

$$e = \frac{M_{\text{эф}}(n)}{1,15 \cdot J_{\text{МХВ}}} = \frac{-2,13 \cdot 10^{-10} \cdot n^3 - 2,246 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 + 2,311 \cdot 10^{-2} \cdot n + 84,67}{1,15 \cdot J_{\text{МХВ}}}. \quad (60)$$

Из графиков видно, что линейризация частоты вращения на участке двух оборотов коленчатого вала вполне допустима.

В ходе исследований проведен параметрический анализ влияния различных факторов на достоверность диагностирования рабочего процесса в каждом из цилиндров 4-х цилиндрового двигателя, используя эмулятор информации, которая может поступать с двигателя при регистрации мгновенной частоты вращения коленчатого вала.

Методика состоит в том, что для исследования влияния различных условий проведения эксперимента и методов обработки результатов, была разработана математическая модель, состоящая из двух блоков (рис. 4.8). Блоки математической модели независимы. Первый блок моделирует неравномерность вращения коленчатого вала, выбранного в качестве примера, рядного четырехцилиндрового бензинового двигателя в силу подавляющего распространения такой схемы и типа на легковых автомобилях. Методика расчета включает тепловой, кинематический и динамический расчет ДВС.

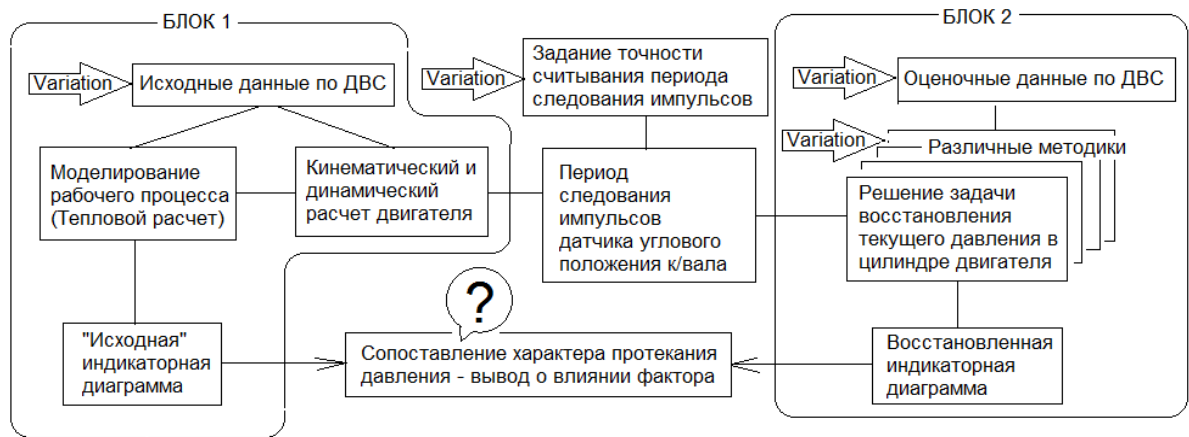


Рис. 4.8. Блок-схема математической модели

Второй блок служит для решения обратной задачи, восстановления текущего давления в каждом цилиндре во время рабочего хода по заданной (первым блоком) неравномерности вращения коленчатого вала. Таким образом, появляется возможность вносить погрешности в обрабатываемый массив данных, добавляя «шумовую составляющую» в первом блоке, менять точность регистрации временных интервалов датчиком, с помощью которого осуществляется регистрация неравномерности вращения коленчатого вала и опробовать эффективность различных методик обработки данных. В качестве критерия можно использовать как сопоставление, закладываемой в первый блок индикаторной диаграммы и кривой текущего давления на участке рабочего хода, получаемой обработкой «данных эксперимента», так и интегральный показатель рабочего процесса – среднее индикаторное давление. При получении данных с реального двигателя необходимо учитывать и точность сигнала, полученного с датчика положения коленчатого вала, установленного штатно на автомобиле или установленного дополнительно, что необходимо для двигателей без системы электронного управления [89]. Анализ таких датчиков приведен в разделе 2.5.

В математической модели эмуляция параметров реального двигателя сводится к следующему. Расчет текущего давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания может быть осуществлен различными способами от

классического метода Гриневецкого-Мазинга до моделирования кинетики химических реакций и газодинамики в многомерной постановке [51]. Для решения задачи имитации протекания текущего давления в цилиндре реального ДВС с последующим сопоставлением с восстановленной кривой давления, целесообразно использовать простую модель, достоверно описывающую основные особенности рабочего процесса поршневого ДВС [52]. В результате моделирования имеем зависимость $p_{\text{газ}} = f(\varphi_i)$. Для удобства дальнейших расчетов функция определяется в виде таблицы значений $p_{\text{газ}i}$ в диапазоне изменения угла поворота коленчатого вала (ПКВ) $\varphi = 0 \dots 720^\circ \text{ПКВ}$ с постоянным шагом угловым шагом $\varphi_{\text{ш}}$, определяемым числом импульсов на оборот углового отметчика I_m .

Под кинематикой кривошипно-шатунного механизма (КШМ) подразумевается описание перемещения $S_{\text{п}}$, скорости $W_{\text{п}}$ и ускорения $J_{\text{п}}$ поршня (точка a на рис. 4.9) в функции угла поворота коленчатого вала φ при известных значениях радиуса кривошипа r_{ob} и длине шатуна l_{ab} . Перемещение может быть найдено по точной формуле

$$S_{\text{п}} = r_{ob} \left[(1 - \cos\varphi) + \frac{l_{ab}}{r_{ob}} (1 - \cos\beta) \right], \text{ где } \beta = \arcsin \left(\frac{r_{ob}}{l_{ab}} \sin\varphi \right). \quad (70)$$

или по более удобной для расчетов, приближенной [25]

$$S_{\text{п}} = r_{ob} \left[(1 - \cos\varphi) + 0,25 \frac{r_{ob}}{l_{ab}} (1 - \cos 2\varphi) \right], \quad (80)$$

точность, которой, тем не менее, достаточна для практических задач.

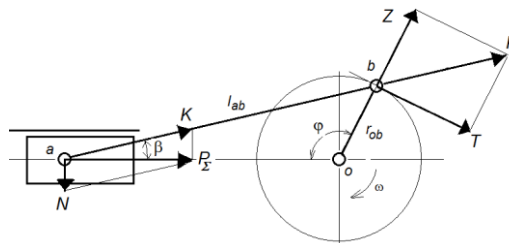


Рис.4.9. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма

Скорость и ускорение поршня при угловой скорости вращения кривошипа ω , находятся последовательным дифференцированием зависимости для перемещения

$$W_{\text{п}} = \omega \cdot r_{ob} \left[\sin\varphi + 0,5 \frac{r_{ob}}{l_{ab}} \sin 2\varphi \right], \quad (81) \quad J_{\text{п}} = \omega^2 \cdot r_{ob} \left[\cos\varphi + \frac{r_{ob}}{l_{ab}} \cos 2\varphi \right] \quad (82)$$

С точки зрения динамики КШМ нас интересует сила T , определяющая крутящий момент на валу двигателя $M_{\text{кр}}$. Она может быть получена из силы P_{Σ} , действующей вдоль оси поршня ao по следующей зависимости

$$T = P_{\Sigma} \cdot \sin(\varphi + \beta) / \cos\beta \quad (83)$$

Суммарная сила $P_{\Sigma} = P_{\text{газ}} + P_{\text{ин}}$, действующая на поршень, складывается из силы, определяемой давлением рабочего тела

$$P_{\text{газ}} = (p_{\text{газ}} - p_0) F_{\text{п}}, \quad (84)$$

где p_0 - давление, действующее на поршень со стороны картера (близкое по величине к атмосферному и может быть принято ему равным);

$$F_{\text{п}} = \pi \cdot D_{\text{ц}}^2 / 4 - \text{площадь поршня};$$

$$D_{\text{ц}} - \text{диаметр цилиндра}$$

и силы инерции деталей, движущихся возвратно-поступательно

$$P_{\text{ин}} = J_{\text{п}} \cdot m_{\text{пр}}, \quad (85)$$

где $m_{\text{пр}}$ - приведенная масса деталей (масса поршня, поршневого пальца, поршневых колец, стопорных колец и 1/3 массы шатуна).

Таким образом, зная суммарную силу в каждом из цилиндров, вычисляем крутящий момент для каждого из цилиндров

$$M_{\text{кр}} = T \cdot r_{ob} \quad \text{или} \quad M_{\text{кр}} = P_{\Sigma} \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \cdot r_{ob} \quad (86)$$

а также суммарный момент от 4-х цилиндров M_{Σ} , с учетом порядка их работы и сдвига тактов в каждом из цилиндров по углу ПКВ. Используя значения суммарного момента, определяем средний крутящий момент $M_{\text{ср}}$ и развиваемую двигателем мощность

$$N_e = M_{cp} \cdot n / 9550. \quad (87)$$

Обычно на этом динамический расчет заканчивается, однако в нашем случае необходимо вычислить мгновенную скорость вращения коленчатого вала. Порядок расчета при этом следующий. Приняв момент инерции подвижных деталей двигателя, приведенный к коленчатому валу, равным $J_{прв}$, рассчитывается мгновенное ускорение коленчатого вала ε_i , мгновенная скорость коленчатого вала ω_i и период следования импульсов от углового отметчика T_i :

$$\varepsilon_i = (M_i - M_{cp}) / J_{прв} \quad (88); \quad \omega_{i+1} = \omega_i + \varepsilon_i \cdot T_m; \quad T_i = \frac{\varphi_{ш} \cdot \pi}{180 \cdot \omega_i}. \quad (89)$$

Рассчитанные значения периода следования импульсов T_i описываются в программе числами с 15 значащими цифрами, однако при переходе к моделированию работы реальной схемы диагностирования точность регистрации ограничивается быстродействием канала аналогово-цифрового преобразователя. В табличном процессоре *Excel* значение периода следования импульсов для дальнейших расчетов огрубляется, путем обработки оператором «ОТБР», который, оставляя заданное число десятичных знаков dzn , отбрасывает остальные значащие цифры

$$\bar{T}_i = \text{ОТБР}(T_i; dzn). \quad (90)$$

Дальнейшие расчеты относятся к независимому от первого второму блоку математической модели - блоку анализа. Следует отметить, что исходные данные для расчета во втором блоке мы выбираем, абстрагируясь от значений параметров двигателя, выбранных для расчета в первом блоке, и основываясь только на марке анализируемого двигателя, как это и происходит в реальных условиях. Перечислим данные, необходимые для выполнения дальнейшего анализа и источника их получения (см. табл. 4.5).

Используя значения \bar{T}_i как исходные данные, имитирующие экспериментальные, восстанавливаем мгновенную скорость вращения коленчатого вала $\bar{\omega}_i$

$$\bar{\omega}_i = \frac{\varphi_{ш} \cdot \pi}{180 \cdot T_i}, \quad (91)$$

и его ускорение $\bar{\varepsilon}_i$

$$\bar{\varepsilon}_i = (\bar{\omega}_i - \bar{\omega}_{i-1}) / T_m. \quad (92)$$

Таблица 4.5

Параметры ДВС, используемые для моделирования

№ п/п	Параметр	Источник
1.	Диаметр цилиндра ($D_{ц}$), ход поршня ($S_{п}$), отношение длины шатуна к радиусу кривошипа ($\lambda_{кш}$), степень сжатия (ε), номинальная мощность ($N_{e_ном}$) и номинальная частота вращения ($n_{ном}$)	Технические характеристики двигателя
2.	Массы и размеры подвижных деталей двигателя: поршней в комплекте, шатунов, маховика	Измерения, данные каталогов. Момент инерции подвижных деталей двигателя, приведенный к коленчатому валу $J_{прв}$ на 10...25 % больше момента инерции маховика двигателя [50]
3.	Частота вращения коленчатого вала двигателя (n)	Режимный параметр, задается
4.	Число импульсов (I_m) на оборот углового отметчика	Технические характеристики датчика
5.	Число разрядов, регистрируемых цифровым запоминающим осциллографом (dzn)	Технические характеристики осциллографа
6.	Давление в цилиндре 4-тактного ДВС с искровым зажиганием на такте наполнения (p_a)	Для режимов с полностью открытым дросселем, $p_a = 0,080 \dots 0,095$ МПа [52]
7.	Противодавление на выпуске (p_r)	$p_r = 0,105 \dots 0,120$ МПа [52]
8.	Средние показатели политроп сжатия (n_1) и расширения (n_2)	$n_1 = 1,34 \dots 1,37$; $n_2 = 1,20 \dots 1,30$ [52]

Сглаживание расчетных значений проведем методом скользящего среднего по 3-м точкам

$$\bar{\bar{\varepsilon}}_i = \frac{\bar{\varepsilon}_{i-1} + \bar{\varepsilon}_i + \bar{\varepsilon}_{i+1}}{3}. \quad (93)$$

Кривые на рис. 4.10 иллюстрируют, что при частоте вращения коленчатого вала двигателя 1000 мин^{-1} и заведомо заниженным разрешении регистрирующей аппаратуры $\delta T_{os} = \pm 1 \text{ мкс}$, вычисленные значения ускорения после сглаживания достаточно хорошо описывают исходную кривую и могут быть использованы для дальнейшего анализа.

Полученное ускорение используется для восстановления суммарного крутящего момента M_i^* от всех цилиндров двигателя, который, также подвергается сглаживанию методом скользящего среднего \bar{M}_i^*

$$M_i^* = M_{\text{ср}}^* + J_{\text{прв}}^* \cdot \bar{\bar{\varepsilon}}_i, \quad (94) \quad \bar{M}_i^* = \frac{M_{i-1}^* + M_i^* + M_{i+1}^*}{3}. \quad (95)$$

Момент инерции подвижных деталей двигателя $J_{\text{прв}}^*$, приведенный к коленчатому валу, определяется в соответствии с данными табл. 4.5. Средний момент $M_{\text{ср}}^*$ на частоте вращения n при полностью открытой дроссельной заслонке может быть определен по известной эмпирической зависимости профессора С.Р. Лейдермана

$$M_{\text{ср}}^* = \frac{30 \cdot N_{e \text{ ном}}}{\pi \cdot n} \left[\frac{n}{n_{\text{ном}}} + \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 - \left(\frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3 \right], \quad (96)$$

а также значениям номинальной мощности $N_{e \text{ ном}}$ и номинальной частоты вращения $n_{\text{ном}}$ исследуемого двигателя (табл. 4.5).

Крутящий момент возникает вследствие воздействия, как газовых сил, так и инерции. Проведя условный динамический расчет двигателя, в котором газовые силы приняты равными нулю $P_{\text{газ}} = 0$ и суммарная сила определяется только инерционными силами деталей массой $m_{\text{пр}}$, движущихся возвратно-поступательно

$P_{\Sigma} = P_{ин} = J_{п} \cdot m_{пр}$, получим условный суммарный крутящий момент на валу двигателя, обусловленный только инерционными силами M_j .

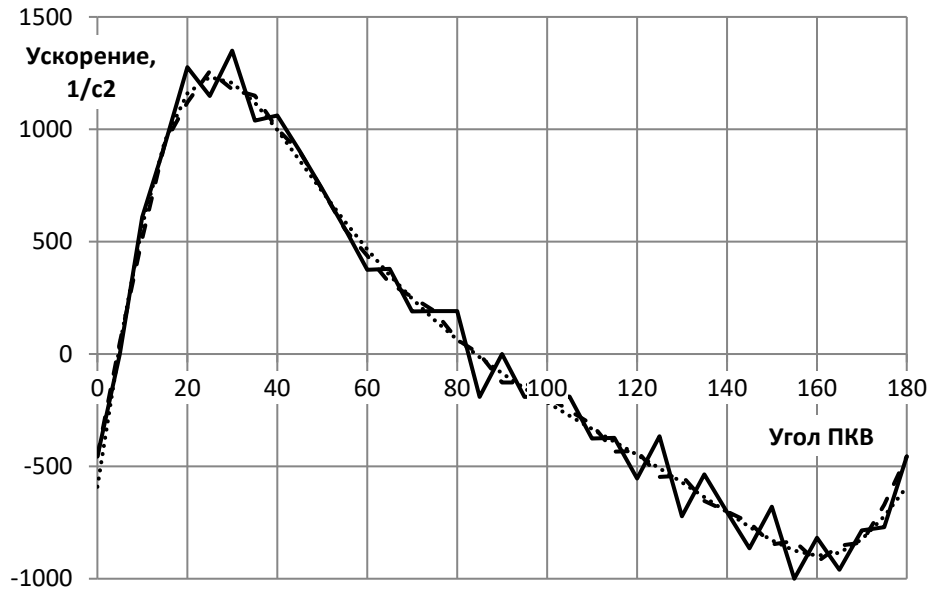


Рис.4.10. «Истинное» угловое ускорение, полученное прямым расчетом (.....), ускорение, восстановленное по «значениям с углового датчика» с точностью до 1 мкс (——) (6 десятичных знаков) и сглаженное методом скользящего среднего (-----)

Вычитая M_j из восстановленного крутящего момента \bar{M}_i^* , получим составляющую крутящего момента, определяемую только газовыми силами, действующими на поршни во всех четырех цилиндрах $M_{газ} = \bar{M}_i^* - M_j$. На рис. 4.11 приведены графики момента, вычисляемого по различным формулам.

Наиболее важным для нас является такт рабочего хода, определяющий в основном эффективность рабочего цикла в каждом из цилиндров. Исключим из суммарного момента, определяемого газовыми силами моменты обусловленные наполнением, сжатием и выпуском

$$M_{рх} = M_{газ} - M_{вп} - M_{сж} - M_{вып}. \quad (97)$$

Для этого проведем условный динамический расчет, исключив инерционные силы (приняв массу подвижных деталей, связанных с коленчатым валом равной

нулю) $P_{\Sigma} = P_{\text{газ}}$. Неизвестными параметрами в расчете будут давления в цилиндре во время впуска p_a и выпуска p_r , которые в силу из незначительности могут быть приняты постоянными и определены приближенно (табл. 4.5), а также текущее давление при сжатии, которое можно рассчитать по известной степени сжатия ε исследуемого двигателя, ориентировочно и значению среднего показателя политропы сжатия n_1 . Соответственно сила, действующая на поршень и соответствующий момент на валу двигателя при наполнении, сжатии и выпуске будут, равны

$$P_{\text{газ_вп}} = (p_a - p_0) \cdot F_{\Pi}, \quad (98) \quad P_{\text{газ_сж}} = \left[p_a \left(\frac{V_a}{V} \right)^{n_1} - p_0 \right] \cdot F_{\Pi}, \quad (99) \quad P_{\text{газ_вып}} = (p_r - p_0) \cdot F_{\Pi} \quad (100)$$

$$M_{\text{вп}} = P_{\text{газ_вп}} \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \cdot r_{ob}, \quad (101) \quad M_{\text{сж}} = P_{\text{газ_сж}} \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \cdot r_{ob}, \quad (102)$$

$$M_{\text{вып}} = P_{\text{газ_вып}} \cdot \frac{\sin(\varphi + \beta)}{\cos\beta} \cdot r_{ob} \quad (103)$$

Моменты от газовых сил при впуске $M_{\text{вп}}$ (короткие жирные штрихи на рис. 4.11) и при выпуске $M_{\text{вып}}$ (длинные жирные штрихи на рис. 4.11), как видно из приведенного графика, незначительны по своей величине. Момент от газовых сил при сжатии $M_{\text{сж}}$ отрицателен и по абсолютной величине вначале растет, по мере приближения поршня к верхней мертвой точке (ВМТ), за счет увеличения давления на поршень сжимаемого рабочего тела, а затем падает до нуля в ВМТ, в силу особенностей кинематики кривошипно-шатунного механизма.

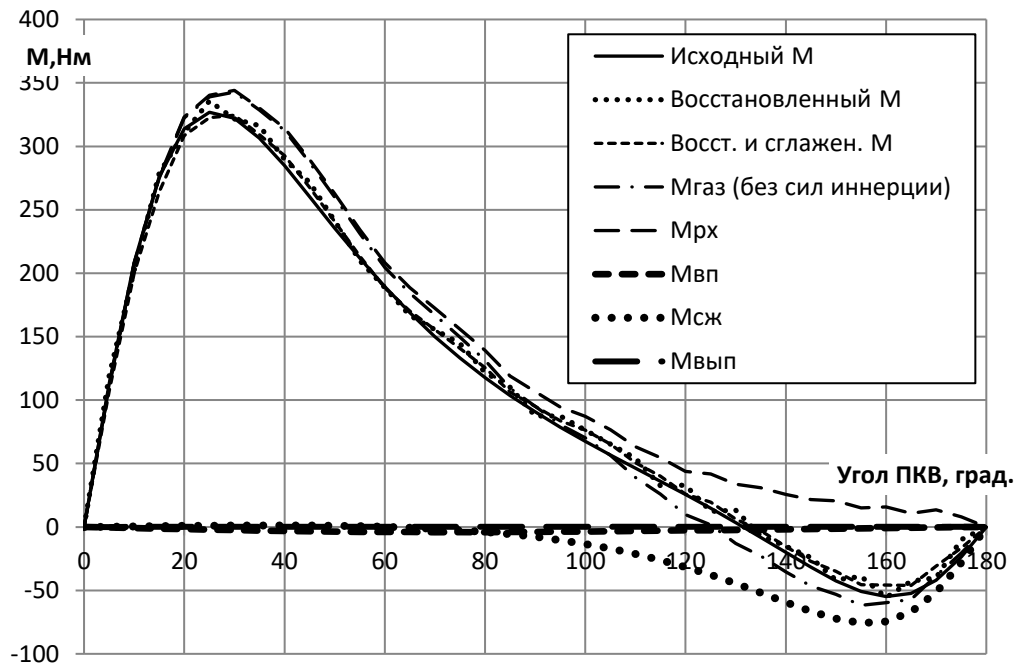


Рис. 4.11. Характер изменения момента, передаваемого на коленчатый вал двигателя, от различных составляющих рабочего процесса

Так как абсолютные значения момента при сжатии $M_{сж}$ достигают наибольших значений ближе к концу цикла, видимо в этой области в наибольшей степени скажутся погрешности восстановления цикла от неправильно заданных параметров сжатия (среднего показателя политропы сжатия, реальной степени сжатия).

По полученному моменту $M_{рх}$ восстанавливается давление в цилиндре во время рабочего хода

$$p_{газ_i} = \frac{2 \cdot M_{рх} \cdot \cos \beta}{S_{п} \cdot F_{п} \cdot \sin(\varphi + \beta)}. \quad (104)$$

На рис.4.12 показаны исходная и восстановленная кривые изменения текущего давления в цилиндре на такте рабочего хода. Для объективной оценки метода было подсчитано среднее индикаторное давление модельного цикла (блок 1 математической модели) и среднее индикаторное давление восстановленного цикла (блок 2). Разница в тестовом варианте составила от 1 до 7 % в зависимости от выбора параметров расчетной модели расчетного блока 2.

Следует отметить, что характер изменения в зависимости от частоты вращения коленчатого вала углового ускорения коленчатого вала, как видно из рис. 4.13, существенно меняется, в связи с изменением соотношения между инерционными и газовыми силами, которые могут изменяться в зависимости от качественного состава топливовоздушной смеси [94, 95]. Вследствие этого, требуется детальное исследование работоспособности метода обработки при изменении режимных параметров.

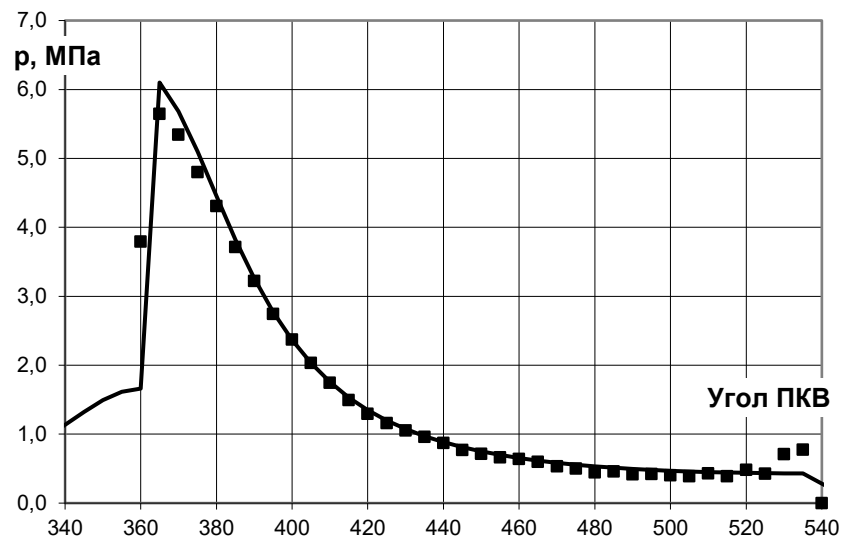


Рис. 4.12. Кривая давления на участке рабочего хода в функции угла поворота коленчатого вала, задаваемая в 1-м блоке имитационном математической модели (сплошная линия) и аналогичная кривая, восстановленная во 2-м блоке (показана маркерами ■)

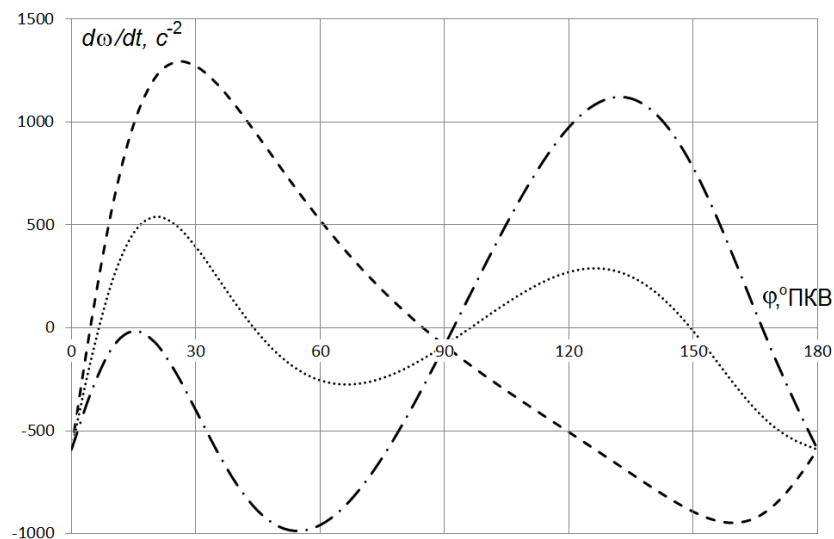


Рис. 4.13. Характер изменения углового мгновенного ускорения коленчатого вала

$d\omega/dt$ в функции угла ПКВ при различных частотах вращения коленчатого вала:

$n = 800 \text{ мин}^{-1}$ (пунктирная линия), $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$ (линия из точек),

$n = 4100 \text{ мин}^{-1}$ (штрих-пунктирная линия)

Проведя такое исследование можно подготовить рекомендации по выбору параметров, используемых при диагностировании (табл. 4.5), привести возможные погрешности при отклонении этих параметров.

В качестве выводов по изложенному материалу следует заключить следующее.

1. Показана возможность использования рассмотренной методики для восстановления интегральных характеристик рабочего процесса (среднего индикаторного давления или индикаторного КПД) в каждом из цилиндров 4-цилиндрового автомобильного двигателя с искровым зажиганием.
2. Методика позволяет на наиболее информативном режиме работы двигателя по динамической внешней скоростной характеристике, когда орган управления мощностью двигателя стоит в положении максимума, сравнивать интегральные индикаторные показатели рабочего процесса в каждом из цилиндров, выявляя отклонения от средних значений.
3. Методика не требует демонтажа деталей, систем и агрегатов двигателя, может применяться в любой эксплуатационной обстановке и практически мгновенно может дать оценку идентичности рабочего процесса в каждом из цилиндров многоцилиндрового двигателя.
4. Требуется провести развернутый параметрический анализ [90] влияния точности задания параметров моделирования для оценки влияния на конечные результаты диагностирования. Однако представляется, что возможность определения давления в цилиндре двигателя по углу поворота коленчатого вала представляет достаточно большие сложности по точности определения, а также необходимость проведения большого количества расчетов существенно снижает

достоверность полученных результатов. Таким образом, имеющееся аппаратное обеспечение не позволяет получать достоверные данные протекания процессов в цилиндрах двигателя по неравномерности вращения коленчатого вала.

Выводы по главе 4.

1. Создана экспериментальная установка на базе дизельного двигателя с электронным управлением IVECO F4HE9687P*J101, которая позволяет проводить исследования по влиянию технического состояния двигателя на колебания частоты вращения коленчатого вала и оценить правомерность разработанного алгоритма.

2. Разработаны программа и методика экспериментальных исследований, для локализации цилиндра 6-ти цилиндрового двигателя с неисправностью, заключающейся в снижении давления в этом цилиндре из-за отсутствия подачи топлива. По разработанной программе и методике проведены экспериментальные исследования при частоте вращения 800 мин^{-1} и рабочей температуре от 80 до 90 °С.

3. Результаты экспериментов показали, что при неисправности в первом цилиндре двигателя показатель наличия неисправности $tg_{\max} = 0,074$ (больше допустимого значения $tg_{\text{порог}} = 0,056$), а значение угла локализации составляет $\varphi_x = 449,6$ ПКВ (находится в интервале для первого цилиндра $360-480^0$ ПКВ), что подтверждает правомерность разработанного алгоритма локализации неисправности.

4. Сопоставление между расчетными и экспериментальными значениями показателя наличия неисправности tg и отношения tg_{\max}/tg_{\min} показало хорошее совпадение (расчет - $\Delta tg = 0,036$; $tg_{\max}/tg_{\min} = 2,2$ и эксперимент - $\Delta tg = 0,033$; $tg_{\max}/tg_{\min} = 1,8$). Расхождение расчетных и экспериментальных параметров по локализации неисправного цилиндра в 3,54 раза меньше диапазона локализации для данного цилиндра.

5. Проведен анализ возможности оценки протекания рабочих процессов в двигателе с построением индикаторной диаграммы по неравномерности частоты вращения коленчатого вала. Показана возможность использования рассмотренной методики для восстановления интегральных характеристик рабочего процесса (среднего индикаторного давления или индикаторного КПД) в каждом из цилиндров 4-цилиндрового автомобильного двигателя с искровым зажиганием. С целью обеспечения такой возможности аппаратное обеспечение должно удовлетворять следующим требованиям:

- высокая точность регистрации временных интервалов между поступающими импульсами с датчика положения коленчатого вала;
- частота дискретизации цифрового осциллографа $f_{\text{дис}}$ должна составлять порядка 100 МГц;
- погрешность регистрации временного интервала между импульсами должна быть $\delta T_{\text{ос}} \leq \pm 0,01$ мкс.

Заключение

1. Технологии по мониторингу состояния различных систем техники в режиме реального времени занимают лидирующие позиции в различных областях. Такие технологии постоянно совершенствуются с целью повышения автономности процессов управления, диагностики, ремонта и последующей утилизации. В настоящее время блоки управления двигателем запрограммированы таким образом, что позволяют проводить диагностику только тех элементов, которые управляются этими блоками управления по электрическим сигналам, поэтому разработанный метод позволяет расширить возможности диагностирования по косвенным методам и получить данные о техническом состоянии двигателя без остановки двигателя.

2. Проведен анализ возможности диагностирования двигателей внутреннего сгорания по косвенным показателям, в качестве которых могут быть использованы изменение крутящего момента (удельной тангенциальной силы) на стационарном режиме работы двигателя и мгновенная частота вращения и ее изменение. Для чего определены и исследованы конструктивные и режимные параметры, оказывающие значимое влияние на косвенные показатели, на режимах холостого хода при 500 мин⁻¹ и на номинальном при 3000 мин⁻¹:

- изменение давления в цилиндре двигателя (от 5% до 40%);
- неравномерность массы поршневой группы (от 1% до 10%);
- отклонение длины шатуна от нормы в интервале (от 1% до 5%);
- отклонение угла кривошипа от нормы (на 0,5° – 4° ПКВ).

3. В результате проведенных расчетных исследований подтверждено, что в качестве косвенных показателей технического состояния двигателя могут быть использованы изменение суммарной тангенциальной силы и/или мгновенная частота вращения коленчатого вала. При этом использование изменения суммарной удельной тангенциальной силы является более предпочтительным, чем

изменение мгновенной частоты вращения, однако в настоящее время определение мгновенной частоты вращения коленчатого вала представляется более простым и дешевым в виду наличия на большинстве современных автомобилей датчиков положения коленчатого вала.

4. Разработан алгоритм поиска неисправного цилиндра двигателя, который показал:

- в зоне работы неисправного цилиндра наблюдается изменение среднего значения частоты вращения, которое предлагается оценивать показателем наличия неисправности tg равным отношению изменения частоты вращения Δn к продолжительности участка по углу поворота коленчатого вала $\Delta\varphi$;

- за зону проявления неисправности принимается участок, где tg имеет наибольшее значение, а неисправный цилиндр определяется по углу поворота коленчатого вала, соответствующему точке пересечения прямой, проходящей через точки минимума и максимума мгновенной частоты вращения и прямой, соответствующей средней частоте вращения за цикл (угол локализации φ_x);

- для 6-ти цилиндрового двигателя зона неисправности для 1-го цилиндра находится в диапазоне 360-480 °ПКВ, для 2-го – 120-240 °ПКВ, для 3-го – 600-720 °ПКВ, для 4-го – 240-360 °ПКВ, для 5-го – 480-600 °ПКВ и для 6-го – 0-120 °ПКВ;

- различия между наибольшим и наименьшим показателями наличия неисправности в зависимости от наличия отклонений параметров составили tg_{max} от 1,4 до 3,2 раз больше, чем tg_{min} , что позволяет использовать наибольший показатель tg_{max} для определения зоны проявления неисправности.

5. Определены пороговые (минимальные) значения показателя tg наличия неисправности для допустимых значений параметров:

- длина шатуна (1%) $tg'_{max} = 0,016$;

- отклонения угла кривошипа от нормы (0,5 градусов) $tg''_{max} = 0,04$

и определено пороговое значение показателя наличия неисправности $tg_{порог} = 0,056$, при превышении которого двигатель необходимо считать неисправным. Таким образом, значения доли снижения давления в цилиндре больше или равные 10%

могут быть определены по неравномерности частоты вращения коленчатого вала, для которых $tg^* \geq 0,06$.

6. Создана экспериментальная установка на базе дизельного двигателя с электронным управлением IVECO F4HE9687P*J101, которая позволила провести исследования по влиянию технического состояния двигателя на колебания частоты вращения коленчатого вала и оценить правомерность разработанного алгоритма. Результаты экспериментов показали, что при неисправности в первом цилиндре двигателя показатель наличия неисправности $tg_{max} = 0,074$ (больше допустимого значения $tg_{порог} = 0,056$), а значение угла локализации составляет $\varphi_x = 449,6$ ПКВ (находится в интервале для первого цилиндра $360-480^0$ ПКВ), что подтверждает правомерность разработанного алгоритма локализации неисправности.

7. Сопоставление между расчетными и экспериментальными значениями показателя наличия неисправности tg и отношения tg_{max}/tg_{min} показало хорошее совпадение (расчет - $\Delta tg = 0,036$; $tg_{max}/tg_{min} = 2,2$ и эксперимент - $\Delta tg = 0,033$; $tg_{max}/tg_{min} = 1,8$). Расхождение расчетных и экспериментальных параметров по локализации неисправного цилиндра в 3,54 раза меньше диапазона локализации для данного цилиндра.

Литература

1. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., Оценка различных методик безразборного диагностирования и определения технической возможности исследования метода диагностирования по неравномерности вращения коленчатого вала двигателя/ Альтернативные источники энергии на автомобильном транспорте: проблемы и перспективы рационального использования: в 2 т. : сб. науч. трудов по материалам Международной науч.-практ. Конф., Воронеж, 20-21 марта 2014 г. / под общ. Ред. А.И. Новикова; ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, 2014, стр. 206-209
2. Диагностика технического состояния двигателя [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: <http://stroy-technics.ru/article/diagnostika-tekhnicheskogo-sostoyaniya-dvigatelya> (дата обращения 29.08.2019).
3. Топливо для карбюраторных двигателей. [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: <http://stroy-technics.ru/article/toplivo-dlya-karbyuratornykh-dvigateli> (дата обращения 29.08.2019).
4. Емелькин, Г. Вдох-выдох// За рулем, 2002 № 4, с.186.
5. Визуально-оптический контроль авиационных конструкций с применением жёсткого линзового и гибкого волоконного эндоскопов [Электронный ресурс]: электрон. метод. указания к лаб. работе / М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т); авт.-сост. И. М. Макаровский; С. Н. Тиц. – Электрон. текстовые и граф. дан. (0,54 Мбайт). - Самара, 2010. - 1 эл. опт. диск (CDROM). С.4-16
6. Генкин, М.Д, Соколова, А.Г., Виброакустическая диагностика машин и механизмов. –М.: Машиностроение, 1987. -288с. С. 23-28
7. Гусаков, С.В., Новиков, В.А. Преимущества и недостатки различных методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания/ Труды VI Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2013», посвященной 100-летию юбилею первого ректора РУДН профессора С.В.

Румянцева. Москва, 24-26 апреля 2013 г. [Текст] / под общ. ред. К.А. Пупкова. – М.: РУДН, 2013. с. 349-353

8. Нигматуллин, Р.Г., Нигматуллин, В.Р., Нигматуллин, И.Р. Диагностика ДВС по анализу моторного масла. – Уфа: ГУП РБ «Уфимский полиграфкомбинат», 2011. – 297 с. С.93-108

9. Пособие начинающим диагностам./ [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: <http://chiptuner.ru/content/beginner/> (дата обращения 29.08.2019).

10. Гусаков, С.В. Влияние фаз газораспределения на токсичность отработавших газов дизеля.// Пути снижения токсичности отработавших газов./ Реф. сб. -М.: ЦНИИТЭИтракторсельхозмаш, 1977. С. 16-21.

11. Горбунов, В.В., Патрахальцев, Н.Н. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. - М.: Изд-во Российского университета дружбы народов, 1998. - 216с

12. Гусаков, С.В., Анджана Прияндака Метод расчета выбросов NOx и сажи на переходных режимах работы дизеля. Матер. IX Междуна-родю науч. – практ. Семинара, г. Владимир, 2003, С.240-243.

13. ГОСТ 17.2.2.01-84. Дизели автомобильные. Дымность отработавших газов. Нормы и методы измерения. -М.: Изд-во стандартов, 2006. – 10 с.

14. ГОСТ Р 41.49-99. Дизели автомобильные. Выбросы вредных веществ. Нормы и методы измерения. -М.: Изд-во стандартов, 2001. – 43 с.

15. 365C Angle encoder set. AVL product description/[Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: <https://www.avl.com/documents/10138/885965/angle-encoder-365C-PS-2010-ENG+neu.pdf> (дата обращения 29.08.2019).

16. AVL, "AVL Boost Users Guide Version 3.4", AVL List GmbH, Graz Austria, 1998

17. Гусаков, С.В. Алгоритм получения закономерностей сгорания альтернативных топлив путем обработки индикаторных диаграмм поршневых ДВС //Международный научно-технический журнал «Транспорт на альтернативном топливе» № 2 (26) / 2012 г. С.8-14

18. Малышев, В.С. , Корегин, А.Ю., Техническая диагностика двигателей методом косвенного индицирования [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL:http://www.mstu.edu.ru/science/conferences/anniversary_ntk/materials/section2/section2_4.html (дата обращения 29.08.2019).

19. Диагностика по сигналу датчика частоты вращения коленчатого вала с помощью USB Autoscope // Информационный канал сайта subscribe.ru [Электронный ресурс] URL: <http://subscribe.ru/archive/tech.auto.autodiagnos/201103/29110223.html> (дата обращения 03.11.2013).

20. Багно, А.М., Звонкин, Ю.З., Блаженков, Е.И., Болдин, А.П. Предпосылки использования электронных средств для управления и диагностирования ДВС по измерению мгновенной угловой скорости вращения коленчатого вала/ Материалы X международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей». Владимир, 27-29 июня 2005. – Изд-во ВГУ. – 2005.

21. Analysis of diagnostic utility of instantaneous angular speed fluctuation of diesel engine crankshaft. // Информационный канал сайта <http://ilot.edu.pl> [Электронный ресурс] URL: http://ilot.edu.pl/kones/2011/1_2011/2011_dereszewski_charchalis_analysis_of_diagnostic_utility.pdf (дата обращения 03.11.2013).

22. Способ измерения неравномерности вращения коленчатого вала двигателя внутреннего сгорания: пат. 2291411 Рос. Федерация. № 2004133590/28, заявл. 17.11.2004, опубл. 27.04.2006, Бюл. № 12

23. Mocanu, F. and Taraza, D., "Estimation of Main Combustion Parameters from the Measured Instantaneous Crankshaft Speed," SAE Technical Paper 2013-01-0326, 2013, doi: 10.4271/2013-01-0326

24. Desbazeille, M., Randall, R.B., Guillet, F., El Badaoui, M., Hoisuard, C., Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft, Me-chanical Systems and Signal Processing, Vol.24, issue 5, 2010

25. Колчин, А.И., Демидов, В.П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. школа, 1980. 400 с.
26. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн.2. Динамика и конструирование: Учебник для вузов/В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др.; Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – 3-е изд. перераб.-М.: Высш. Шк., 2007.- 400 с.: ил.
27. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. Пособие для вузов/А.И. Колчин, В.П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. Шк., 2008. – 496 с.:ил.
28. Рабочие процессы, конструкция и основы расчета энергетических установок с двигателем внутреннего сгорания [Текст] : учебник/ Ю.М. Крохотин, Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков; М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО «ВГЛТА», ФГБОУ ВПО «МГТУ им Н.Э. Баумана». – Воронеж, 2011. – 600 с.
29. Динамика двигателей внутреннего сгорания: Методические указания / Сост.Ю.П. Макушев, И.И. Ширлин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 48 с.
30. Лиханов, В.А., Девятьяров, Р.Р. Расчет двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие». - 3-е изд., испр. и доп. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 69 с.
31. Бирюков, М., Маслов, В., Системы управления бензиновыми двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание.- М.: ООО Книжное издательство «За рулем», 2005, -432с. Ил. С.271-275
32. Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента. Под редакцией чл.-корр. АН СССР Н.П. Бусленко. Из-во «Мир», Москва, 1972
33. Blair, G.P. Design and Simulation of Four-Stroke Engines, SAE, 1999
34. Каталог продукции фирмы Iskra Tela d.d., Словения/ [Электронный ресурс]. - Режим доступа: URL: <http://www.iskra.si/products/20071212152244/> (дата обращения: 03.11.2013).
35. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., Математическая модель для исследования возможностей диагностики двигателя внутреннего сгорания по неравномерности

вращения коленчатого вала/ Журнал «Приборы и системы. управление, контроль, диагностика 2014 № 4», с.8-19

36. Устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС: Пат. 137387 Рос. Федерация № 2013146356/28, заявл. 17.10.2013, опубл.: 10.02.2014 Бюл. № 4

37. Осциллограф цифровой запоминающий специальный ОЦЗС-02(100USB) ЗАО Руднев-Шилев [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL:<http://www.rudshel.ru/show.php?dev=126&pos=1> (дата обращения 29.08.2019).

38. Устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС: Пат. 156397 Российская Федерация № 2015103025/06, заявл. 30.01.2015, опубл.: 10.11.2015 Бюл. № 31

39. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн.2. Динамика и конструирование: Учебник для вузов/В.Н. Луканин, И.В. Алексеев, М.Г. Шатров и др.; Под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – 3-е изд. перераб.-М.: Высш. Шк., 2007.- 400 с.: ил. стр. 132

40. Лейбо, А. Н. Справочник механика нефтеперерабатывающего завода [Текст] / А. Н. Лейбо, Э. Б. Хесин, Я. С. Черняк. - Москва : Гостоптехиздат, 1963. - 802 с., 2 л. черт. : ил.; 22 см. стр. 437

41. ГОСТ Р 53813-2010 Двигатели автомобильные. Шатуны. Технические требования и методы испытаний М.: Из-во Стандартиформ, 2010, -13 с.

42. Лиханов, В.А., Девятьяров, Р.Р. Расчет двигателей внутреннего сгорания: Учебное пособие». - 3-е изд., испр. и доп. – Киров: Вятская ГСХА, 2008. – 69 с.].

43. Гусаков, С.В., Патрахальцев, Н.Н. Планирование, проведение и обработка данных экспериментальных исследований ДВС (учеб. пособие). - М.: Изд-во РУДН, 2004, 168 с.

44. Гусаков, С.В., Епифанов, И.В., Уклейкин, В.Е., Эльгобаши Эльхагар М.М. Исследовательские тормозные стенды для испытаний малогабаритных ДВС // Вестник РУДН: Серия «Инженерные исследования». – М.: Изд-во РУДН, 2009г., №2, С.92 – 98

45. Звонов, В.А., Фурса, В.В. Применение метода математического планирования эксперимента для оценки токсичности двигателя//Двигатели внутреннего сгорания: Сборник. - Вып.17. – Харьков: Высшая школа, 1973.
46. Iveco. NEF Tier 3 series. Technical and repair manual. – Milan: - Satiz technical publishing, 2007. – 580p.
47. Технические характеристики МОТОР-ТЕСТЕР МТПРО [Электронный ресурс]. <https://motor-master.ru/oscmotor/product/view/387/702> (дата обращения: 19.02.2019).
48. Технические характеристики датчика мультимарочного сканера Delphi DS150E. [Электронный ресурс]. URL: <http://elmscan.ru/products/delphi-ds150e-usb-bluetooth> (дата обращения: 19.02.2019)
49. Клуб любителей Рено Логан // Форум портала logan.ru [Электронный ресурс] URL: <http://forum.logan.ru/viewtopic.php?p=599826#599826> (дата обращения 03.11.2013)
50. Шароглазов, Б.А., Фарафонов, М.Ф., Клементьев, В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов: Учебник по курсу «Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания». – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2004. 344 с.
51. Гусаков, С.В. Физико-химические основы процессов смесеобразования и сгорания в ДВС. Основы теории горения: Учеб. пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2001. 134 с.
52. Гусаков, С.В. Тепловой расчет рабочих циклов двигателей внутреннего сгорания. Методическое пособие. – М.: Изд-во РУДН, 2004. 16 с.
53. Ахметзянов, И.Р. Разработка метода безразборной диагностики двигателя МТА на основе переходных функций его систем с применением алгоритма Байеса: дис. ... канд. техн. наук. Казанский ГАУ/ И.Р. Ахметзянов. - Казань , 2017. - 171 с.
54. Грибков, В. М. Справочник по оборудованию для технического обслуживания и ремонта тракторов и автомобилей/ В. М. Грибков. М.: Россельхозиздат, 1984.-223 с.

55. Кривцов, С.Н. Методологические основы диагностики автомобилей с дизельными двигателями, оснащёнными аккумуляторными топливоподающими системами: дис. ... докт. техн. наук. Иркутский НИТУ/ С.Н. Кривцов. - Иркутск, 2017. - 441 с.

56. Мелисаров, В.М. Тепловой расчет и тепловой баланс карбюраторного двигателя и двигателя с впрыском топлива: учебное пособие/ В.М. Мелисаров [и др.]. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2009. – 128 с.

57. Неговора, А. В. Улучшение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей совершенствованием конструкции и технологии диагностирования топливоподающей системы: Дис.д-ра техн. наук: 05.04.02/ А. В. Неговора. - СПб., 2004. - 343 с.

58. Никитин, Е.А. Диагностирование дизелей/ Е.А. Никитин. - М.: Машиностроение, 1987. - 224 с.

59. Новицкий, И.В. Автомобильные и тракторные двигатели: учебное пособие/ И.В. Новицкий. – Минск: «Ураджай», 1977. – 160 с.

60. Ольшевский, С.Н. Научное обоснование и разработка методов, технологии и средств диагностирования тракторных двигателей в эксплуатационных условиях: дис. ... докт. техн. наук. ФГБУ НСФНЦА РАН/ С.Н. Ольшевский. - Новосибирск, 2017. - 372 с.

61. Сидоров, В.И. Техническая диагностика двигателей/ В.И. Сидоров. - М.: МАДИ, 1998. - 70 с.

62. Пучин, Е.А., Новиков, В.С., Очковский, Н.А. Технология ремонта машин / Е.А. Пучин, В.С. Новиков, Н.А. Очковский и др.: под ред. Е.А. Пучина. - М.: КолосС, 2007. - 488 с.

63. Шульга, Е.Ф., Щукина, В.Н. Мониторинг качества движения и технического состояния транспортных средств/ Е.Ф. Шульга, В.Н. Щукина/ Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» – 2017. - №4(80). – С. 18 – 22.

64. Шульга, Е.Ф., Щукина, В.Н., Девянин, С.Н. Надежность упреждения потерь с использованием мониторинга транспортных средств/ Е.Ф. Шульга, В.Н. Щукина, С.Н. Девянин/ Вестник Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский государственный агроинженерный университет имени В.П. Горячкина» – 2017. - №5(81). – С. 16 – 20.

65. Анализ технического уровня и тенденции развития двигателей внутреннего сгорания/ под ред. Р.И. Давтяна. -М.: Информцентр НИИД, 1998.- Вып.26. -92с.

66. Александров, А.В. Методические основы разработки диагностического комплекса для оценки технического состояния автомобильных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. Моск. автомобильно-дорожный гос. Университет/ А.В. Александров. - Москва , 2005. - 154 с.

67. Блинов, А. Д. Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков/ А. Д. Блинов, П. А. Голубев, Ю. Е. Драган и др. Под ред. В. С. Папонова и А. М. Минеева. М.: НИЦ Инженер., 2000.- 332 с.

68. Буряков, А. Т. Справочник по механизации полеводства/ А. Т. Буряков, М. В. Кузьмин М.: Колос, 1971. - 352 с.

69. Габбасов, А. Г. Улучшение показателей тракторного дизеля совершенствованием топливоподачи и смесеобразования: Дис.канд. техн. наук: 05.04.02 / А. Г. Габбасов. Уфа, 2005. - 132 с.

70. Карунин, А.Л. Технология двигателестроения: учебник/ А.Л. Карунин, О.А. Дащенко, В.И. Гладков и др.. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк. , 2006, - 608 с.

71. Матросов, Л.В. Совершенствование динамических, топливно-экономических и экологических показателей автомобильного дизеля путем электронного управления внешней скоростной характеристикой: дис. ... канд. техн. наук/ Л.В. Матросов - Ярославль, 2000. - 185 с.

72. Савич, Е.Л. Инструментальный контроль автотранспортных средств: учебное пособие/ Е.Л. Савич, А.С. Кручек. – Минск: Новое знание, 2008. – 399 с.: ил.
73. Степанов, В.Н. Тюнинг автомобильных двигателей / В.Н. Степанов. СПб.: Альфа, 2000. - 82 с.
74. Стефановский, Б.С. Испытания двигателей внутреннего сгорания/ Б.С. Стефановский. М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.
75. Гаврилов, А.А. Расчет циклов поршневых двигателей: Учебное пособие/ А.А. Гаврилов, М.С. Игнатов, В.В. Эфрос. Владимир: Владим. гос. ун-т., 2003. - 124 с.
76. Горелик, Г.Б. Двигатели внутреннего сгорания: теория автоматического регулирования и управления: Учебное пособие/ Г.Б. Горелик. Хабаровск: изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2010.- 144 с.
77. Грановский, В.А. Методы обработки экспериментальных данных при измерениях/ В.А. Грановский, Т.Н. Сирая.- Л.: Энергоатомиздат, 1990.-288 с.
78. Ананьин, А.Д., Михлин, В.М., Габитов, И.И. Диагностика и техническое обслуживание машин: Учебник для студентов высш. учеб. заведений/ А.Д. Ананьин, В.М. Михлин, И.И. Габитов и др. М.: Издательский центр «Академия», 2008. 432 с.
79. Диагностика электронных систем автомобилей Самара: НПП«НТС», 2008. - 178 с.
80. Диагностирование автотракторных двигателей. Под ред. Ждановского.- Л.: Колос, 1977.- 264 с.
81. Дьяченко, В.Г. Теория двигателей внутреннего сгорания: учебник/ В.Г. Дьяченко. Харьков: ХНАДУ, 2009. - 500 с.
82. Патрахальцев, Н.Н. Характеристики двигателей внутреннего сгорания: учебное пособие/ Н.Н. Патрахальцев. - М.: Изд-во РУДН, 2007.–63с
83. Покровский, Г.П. Электронное управление автомобильными двигателями/ Г.П. Покровский, Е.А. Белов, С.Г. Драгомиров [и др.]. - М.: Машиностроение, 1994. - 336 с.

84. Оппенгейм, А.В., Шафер, Р.В. Цифровая обработка сигналов/ А.В. Оппенгейм, Р.В. Шафер. Пер.с англ. – М.: Техносфера, 2006. - 856 с.
85. Проектирование систем цифровой и смешанной обработки сигналов. Под ред. У. Кестера. М.: Техносфера, 2010. - 328 с.
86. Рынок мониторинга автотранспорта, цифры и факты [Электронный ресурс]. URL: vestnik-glonass.ru/~ygp4w (дата обращения: 26.08.2019).
87. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., Ощепков, П.П., Епифанов, И.В., Оценка динамической составляющей работы ДВС// Вестник РУДН: Серия «Инженерные исследования». – М.: Изд-во РУДН, 2013г., №3, с.26 – 31
88. Horlock, J.H. and Winterbone, D.E. editors, The Thermodynamics and Gas Dynamics of Internal Combustion Engines, Volume II, Clarendon Press, Oxford, 1986.
89. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., О возможностях восстановления давления в цилиндре во время рабочего хода по неравномерности вращения коленчатого вала двигателя// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение», 2014. №5, с.130-130.
90. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., Параметрический анализ математической модели диагностики ДВС по неравномерности вращения коленчатого вала// Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: Проблемы и перспективы рационального использования. Сборник научных трудов по материалам ежегодных конференций. Выпуск 1. Ответственный редактор канд. Техн. Наук. А. И. Новиков. ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». Воронеж, 2014. с. 119-121.
91. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., Сравнительный анализ методов индицирования ДВС// Труды VIII Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2015», Москва, 20-22 апреля 2015 г. / под общ. ред. Н.К. Пономарева – М.: РУДН, 2015. с. 524-527.
92. Гусаков, С.В., Новиков, В.А., Расчетная оценка возможностей повышения КПД действительного цикла дизеля за счет организации процесса сгорания при постоянном объеме// Автомобильная промышленность. 2016. №5. с. 11-13.

93. Gusakov, S.V., Novikov, V., Abu-Nidzhim, R., Kamyshnikov, O.V., Kamyshnikov, R.O., Analysis of ways to optimize the operating conditions of an internal combustion engine to reduce its fuel consumption// Scientific Journal “Herald National Academy of Managerial Staff of Culture and Arts”, ISSN 2226–3209 (Print), ISSN 2409–0506 (Online), № 1, 2018. [URL: <http://jrhnamsca.icu/index.php/hnamsca/article/view/471>]

94. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 156883 Рос. Федерация № 2015120471/06, заявл. 29.05.2015, опубл.: 20.11.2015 Бюл. № 32.

95. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 182134 Рос. Федерация № 2017146556/06, заявл. 28.12.2017, опубл.: 03.08.2018 Бюл. № 22.

96. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 189396 Рос. Федерация № 2018139719, заявл. 12.11.2018, опубл.: 21.05.2019 Бюл. № 15.

97. A method and apparatus for measurement of crankshaft acceleration in an internal combustion engine Ford motor company limited, EP Patent № 0475566, (18.03.1992)

98. Angular position extrapolation of a rotating crankshaft corrected for crankshaft acceleration and deceleration. Richard J. Gauer, US Patent № 5,297,048 (22 Mar. 1994).

99. Detonation restriction control procedure of two-stroke IC engine, involves judging detonation generation when peak position of angular acceleration of crankshaft is advanced with respect to decision area. Kokusan Denki Co LTD, JP № 3743221 (08.02.2006).

100. Fuel supply abnormality determination method used in multi-cylinder internal combustion engine of vehicle, involves comparing corrected correlation of angular acceleration of crankshaft and set fuel supply amount with predetermined standard. Toyota Jidosha KK, JP № 2009085078 (23.04.2009).

101. Method and control system for controlling an engine function based on crankshaft acceleration. Julian R. Verdejo, US Patent № 7,918,212 (05.04.2011).

102. Method for operating internal combustion engine of vehicle, involves determining angular accelerations of crankshaft and working cycles of cylinders, while determining mean value of angular acceleration as a function of accelerations. Volkswagen Aktiengesellschaft, DE Patent № 10201111412 (28.02.2013).

103. Engine misfire detection with compensation for normal acceleration of crankshaft. Jay C. McCombie, US Patent № 5,574,217 (12.11.1996).

104. Fuel identification based on crankshaft acceleration. Ford Global Technologies LLC, US Patent № 8401764 (19.03.2013).

105. Operating method for an internal combustion engine of an automotive system involves filtering of crankshaft acceleration signal through identification of frequency of the signal to be filtered and filtering out the identified frequency. GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS INC, GB № 2495755 (24.04.2013).

106. Cylinder valve deactivation monitoring method for e.g. variable displacement engine, in passenger vehicle, involves indicating degradation of cylinder valve actuator in engine based on crankshaft acceleration of set of firing events. FORD GLOBAL TECHNOLOGIES, LLC, US Patent № 7900509 (08.03.2011).

107. Method of detecting low compression pressure responsive to crankshaft acceleration measurement and apparatus therefor. Motorola Inc. US Patent № 5915272 (22.06.1999).

108. Шатров, М.Г. Автомобильные двигатели: Курсовое проектирование: учебное пособие/ М.Г. Шатров, И.В. Алексеев, С.Н. Богданов [и др.]; под ред. М.Г.Шатрова. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 256 с.

109. Шароглазов, Б. А. Двигатели внутреннего сгорания теория, моделирование и расчет процессов / Б. А. Шароглазов, М. Ф. Фарафонов, В. В. Клементьев.- Челябинск: ЮУрГУ, 2004.-160 с.

110. Чайнов, Н.Д. Конструирование двигателей внутреннего сгорания/ Н.Д. Чайнов [и др.]. - М.: Машиностроение, 2008. - 496 с., ил.

111. Ховах, М.С. Автомобильные двигатели/ М.С. Ховах, Г.С. Маслов. - Изд. 2-е, пер. и доп. М.: Машиностроение, 1971. - 456 с.
112. Уханов, А. П. Особенности рабочего процесса транспортных дизелей в экспериментальном режиме холостого хода / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, А. В. Отрадных // Нива Поволжья. 2007. - №4 (5). - С. 47-53.
113. Уханов, А. Управление режимом холостого хода / А. Уханов, Д. Уханов, А. Отрадных // Сельский механизатор. 2007. - № 9. - С. 48.
114. Хайкин, С., нейронные сети: полный курс, пер. с англ. - 2-е изд. / С. Хайкин. - М.: Изд. Дом "Вильямс", 2006. - 1104 с.
115. Уайт, Ч. Системы управления и впрыск топлива/ Ч. Уайт. – М.: АльфаМер, 2004. – 288 с.
116. Управление бензиновыми двигателями системы Motronic Bosch, перевод с английского. Учебное пособие – М.: ЗАО «Легион – автодата», 2010. - 1391 с.
117. Система управления двигателем дизельными двигателями: узлы и агрегаты. – Германия: BOSCH, 2004, - 480 с.
118. Соснин, Д.А., Яковлев, В.Ф. Новейшие автомобильные электронные системы/ Д.А. Соснин, В.Ф. Яковлев - М.: СОЛОН-Пресс, 2005. - 240 с.
119. Келер, К.А. Диагностика автомобильного двигателя/ К.А. Келер. - Ужгород: Изд-во "Карпаты", 1977. 160 с.
120. Buttsworth D. R. "Spark Ignition Internal Combustion Engine Modelling using Matlab", Faculty of Engineering & Surveying Technical Reports, University of Southern Queensland, 2002.
121. Chan S. H. and Zhu J. "Modelling of engine in-cylinder thermodynamics under high values of ignition retard", Int. J. Therm. Sci., vol. 40, 1999, pp. 94-103
122. Depcik C. "Open-Ended Thermodynamic Cycle Simulation", M.S. Thesis, University of Michigan, Ann Arbor, 2000.
123. Дунаев, А.В. Исследование диагностических параметров, разработка методов и средств их контроля для совершенствования диагностирования и

технического обслуживания МТП АПК [Текст]/ А.В. Дунаев, С.А. Соловьев //М.:ГОСНИТИ, 2014.- 360 с. -ISBN 978-5-98231-0163.

124. Яманин, А.И., Жаров, А.В. Динамика поршневых двигателей: Учебное пособие. -М.: Машиностроение, 2003. -464 с.

125. Патрахальцев, Н.Н. Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания. Монография. М.: РУДН. 2009. 380 с. Глава 12. Методы и средства диагностирования и испытаний ДВС при НУР. С. 340 – 353.

126. Патрахальцев, Н.Н., Сеницын, А. К., Соловьёв Д. Е. Испытания и диагностирование дизелей с использованием неустановившихся режимов их работы (статья)// Вестник РУДН, 2003, № 1. С. 132 – 135.

127. Патрахальцев, Н. Н., Сеницын, А. К., Соловьёв Д.Е., Архипов А.Ф. Диагностирование состояния дизеля в режиме выбега //Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2005, № 7. С. 42 – 45.

128. Арапов, В. В., Кононенко, Л. Ф., Патрахальцев, Н. Н. Приборы диагностики ДВС. НИИИНФОРМТЯЖМАШ. 1977. 19-3-77. 42 с.

129. Арапов, В. В., Павлович, Л. М., Патрахальцев, Н. Н. Определение достоверной характеристики при исследовании неустановившегося режима работы дизеля.//Повышение эффективности использования тепловых процессов в тепловых двигателях. Сб. науч. труд. УДН. 1985. С. 77 - 82.

130. Патрахальцев, Н. Н. Развитие методов испытания и диагностики ДВС при неустановившихся режимах работы // Двигателестроение. 1982, № 9. С. 28 - 31.

131. Леонов, О. Б., Арапов, В. В., Патрахальцев, Н.Н. Устройство для регистрации на осциллограмме углов поворота коленчатого вала ДВС (статья) // ДВС.-НИИИНФОРМТЯЖМАШ. 1972. 4-72-16.

132. Арапов, В. В., Леонов, О. Б., Патрахальцев, Н.Н. Двухканальное устройство импульсной регистрации на осциллограмме углов поворота вала (статья) // «Стенды, приборы, машины». М. МВТУ. 1973, №3.

133. Патрахальцев, Н.Н. Развитие методов испытания и диагностики ДВС при неустановившихся режимах работы (Статья) // «Двигателестроение». 1982. № 9. С. 28 - 31.

134. Тапия, К.М., Патрахальцев, Н.Н., Казаков, С.А. Методика диагностирования автотранспортного дизеля, работающего в экстремальных условиях окружающей среды (статья) // Автомобильная промышленность, 2009. № 6. С. 29 – 32.

135. Анализатор Герметичности Цилиндров./ [Электронный ресурс]/ Режим доступа: URL: <https://eksacom.ru/shop/upload/edial/agz2b.pdf> (дата обращения 29.08.2019).

136. С.Н. Девянин, Новиков, В.А. Использование неравномерности крутящего момента для оценки технического состояния ДВС / С.Н. Девянин, В.А. Новиков // Сборник трудов Международной научной конференции, посвященной 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова. Том. Выпуск 292. Часть I. ISBN: 978-5-9675-1757-0. -Москва. -2020. -С. 218-225

Приложения

Приложение №1

Таблица 1

Результаты расчета тангенциальной силы с отклонением, заключающимся в снижении давления в 1-м цилиндре

ПКВ	Значения сил и величин отклонений для 1-го и/или 2-го цилиндров									
	$K_{рг1}$	$K_{мп1}$	$K_{мп2}$			$K_{ш}$			$\Delta\phi$, град	$\Delta\phi$, град
φ , град	0,05	0	0			0			0	0
	$P_{г1}$, МПа	P_{1jn} , МПа	P_{2jn} , МПа	P_1 1, МПа	P_1 2, МПа	β , рад	$P_{ш1}$, МПа	$P_{ш2}$, МПа	T_1 , МПа	T_2 , МПа
0	0,003515	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,000	-0,029	-0,029	0,000	0,000
5	-0,00124	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,025	-0,034	-0,034	-0,004	-0,004
10	-0,00599	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	0,050	-0,038	-0,038	-0,009	-0,009
15	-0,00599	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	0,075	-0,037	-0,038	-0,012	-0,012
20	-0,00599	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	0,099	-0,036	-0,036	-0,016	-0,016
25	-0,00599	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,123	-0,034	-0,034	-0,018	-0,018
30	-0,00599	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,146	-0,032	-0,032	-0,020	-0,020
35	-0,00599	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	0,167	-0,030	-0,030	-0,021	-0,021
40	-0,00599	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	0,187	-0,027	-0,028	-0,021	-0,021
45	-0,00599	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,207	-0,025	-0,025	-0,021	-0,021
50	-0,00599	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,224	-0,022	-0,022	-0,019	-0,020
55	-0,00599	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	0,240	-0,019	-0,019	-0,017	-0,018
60	-0,00599	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	0,254	-0,016	-0,016	-0,015	-0,015
65	-0,00599	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,266	-0,012	-0,013	-0,012	-0,013

70	-0,00599	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,276	-0,009	-0,010	-0,009	-0,010
75	-0,00599	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,284	-0,006	-0,007	-0,006	-0,007
80	-0,00599	0,00	0,00	0,00	0,00	0,290	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
85	-0,00599	0,01	0,01	0,00	0,00	0,293	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
90	-0,00599	0,01	0,01	0,00	0,00	0,294	0,001	0,001	0,001	0,001
95	-0,00599	0,01	0,01	0,00	0,00	0,293	0,004	0,003	0,003	0,003
100	-0,00599	0,01	0,01	0,01	0,01	0,290	0,006	0,005	0,005	0,005
105	-0,00599	0,01	0,01	0,01	0,01	0,284	0,007	0,007	0,006	0,006
110	-0,00599	0,01	0,01	0,01	0,01	0,276	0,009	0,008	0,007	0,007
115	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,266	0,010	0,010	0,008	0,007
120	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,254	0,011	0,011	0,008	0,007
125	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,240	0,012	0,011	0,008	0,007
130	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,224	0,012	0,012	0,007	0,007
135	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,207	0,012	0,012	0,007	0,007
140	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,188	0,013	0,012	0,006	0,006
145	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,167	0,013	0,012	0,005	0,005
150	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,146	0,013	0,012	0,005	0,005
155	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,123	0,013	0,012	0,004	0,004
160	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,099	0,012	0,012	0,003	0,003
165	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,075	0,012	0,012	0,002	0,002
170	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,050	0,012	0,012	0,002	0,001
175	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,025	0,012	0,012	0,001	0,001
180	-0,00599	0,02	0,02	0,01	0,01	0,000	0,012	0,012	0,000	0,000
185	-0,00583	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,025	0,012	0,012	-0,001	-0,001
190	-0,00537	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,050	0,013	0,013	-0,002	-0,002
195	-0,00459	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,075	0,014	0,013	-0,003	-0,002
200	-0,00348	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,099	0,015	0,015	-0,004	-0,004
205	-0,00201	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,123	0,017	0,016	-0,005	-0,005
210	-0,00016	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,145	0,018	0,018	-0,007	-0,007
215	0,002108	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,167	0,021	0,021	-0,009	-0,009
220	0,004848	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,187	0,024	0,024	-0,012	-0,012

225	0,008116	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,206	0,027	0,027	-0,015	-0,015
230	0,011983	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,224	0,030	0,031	-0,018	-0,019
235	0,016539	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,240	0,035	0,036	-0,023	-0,023
240	0,021892	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,254	0,040	0,041	-0,028	-0,029
245	0,028177	0,02	0,02	0,04	0,05	-0,266	0,045	0,047	-0,035	-0,036
250	0,03556	0,01	0,01	0,05	0,05	-0,276	0,052	0,054	-0,042	-0,044
255	0,044247	0,01	0,01	0,06	0,06	-0,284	0,060	0,062	-0,051	-0,053
260	0,054494	0,01	0,01	0,07	0,07	-0,290	0,069	0,072	-0,061	-0,064
265	0,066624	0,01	0,01	0,08	0,08	-0,293	0,080	0,083	-0,074	-0,077
270	0,081044	0,01	0,01	0,09	0,09	-0,294	0,092	0,097	-0,088	-0,093
275	0,098274	0,01	0,01	0,10	0,11	-0,293	0,108	0,113	-0,106	-0,111
280	0,118977	0,00	0,00	0,12	0,13	-0,290	0,127	0,133	-0,126	-0,132
285	0,14401	0,00	0,00	0,14	0,15	-0,284	0,150	0,158	-0,150	-0,158
290	0,174482	0,00	0,00	0,17	0,18	-0,276	0,178	0,188	-0,178	-0,187
295	0,211838	-0,01	-0,01	0,21	0,22	-0,266	0,213	0,225	-0,210	-0,222
300	0,25796	-0,01	-0,01	0,25	0,26	-0,254	0,257	0,271	-0,248	-0,261
305	0,315299	-0,01	-0,01	0,30	0,32	-0,240	0,312	0,329	-0,291	-0,307
310	0,387018	-0,02	-0,02	0,37	0,39	-0,224	0,381	0,402	-0,339	-0,358
315	0,47712	-0,02	-0,02	0,46	0,48	-0,207	0,469	0,495	-0,393	-0,414
320	0,590479	-0,02	-0,02	0,57	0,60	-0,188	0,580	0,611	-0,449	-0,474
325	0,732582	-0,02	-0,02	0,71	0,75	-0,167	0,719	0,758	-0,505	-0,532
330	0,908624	-0,03	-0,03	0,88	0,93	-0,146	0,892	0,941	-0,554	-0,584
335	1,12134	-0,03	-0,03	1,09	1,15	-0,123	1,102	1,161	-0,585	-0,617
340	1,366911	-0,03	-0,03	1,34	1,41	-0,099	1,344	1,416	-0,583	-0,615
345	1,629036	-0,03	-0,03	1,60	1,68	-0,075	1,602	1,688	-0,531	-0,559
350	1,873907	-0,03	-0,03	1,84	1,94	-0,051	1,844	1,943	-0,412	-0,434
355	2,052861	-0,03	-0,03	2,02	2,13	-0,025	2,021	2,129	-0,228	-0,240
360	3,149918	-0,03	-0,03	3,12	3,28	0,000	3,117	3,283	-0,002	-0,002
365	6,553765	-0,03	-0,03	6,52	6,87	0,025	6,523	6,868	0,729	0,767
370	6,473465	-0,03	-0,03	6,44	6,78	0,050	6,449	6,791	1,435	1,510
375	6,098927	-0,03	-0,03	6,07	6,39	0,075	6,085	6,407	2,008	2,114

380	5,443853	-0,03	-0,03	5,41	5,70	0,099	5,441	5,729	2,356	2,480
385	4,62143	-0,03	-0,03	4,59	4,84	0,123	4,628	4,873	2,453	2,583
390	3,884282	-0,03	-0,03	3,86	4,06	0,145	3,900	4,106	2,417	2,545
395	3,255724	-0,02	-0,02	3,23	3,40	0,167	3,278	3,452	2,299	2,421
400	2,735076	-0,02	-0,02	2,71	2,86	0,187	2,763	2,909	2,138	2,251
405	2,310335	-0,02	-0,02	2,29	2,41	0,206	2,342	2,466	1,960	2,064
410	1,966034	-0,02	-0,02	1,95	2,05	0,224	2,001	2,107	1,780	1,874
415	1,687155	-0,01	-0,01	1,68	1,76	0,240	1,724	1,816	1,607	1,692
420	1,460675	-0,01	-0,01	1,45	1,53	0,254	1,500	1,579	1,445	1,522
425	1,275905	-0,01	-0,01	1,27	1,34	0,266	1,316	1,386	1,297	1,366
430	1,124317	0,00	0,00	1,12	1,18	0,276	1,165	1,227	1,162	1,224
435	0,9992	0,00	0,00	1,00	1,05	0,284	1,041	1,095	1,040	1,095
440	0,895305	0,00	0,00	0,90	0,94	0,290	0,937	0,986	0,931	0,980
445	0,80853	0,01	0,01	0,81	0,86	0,293	0,850	0,894	0,832	0,876
450	0,735661	0,01	0,01	0,74	0,78	0,294	0,776	0,817	0,743	0,782
455	0,674168	0,01	0,01	0,68	0,72	0,293	0,714	0,751	0,663	0,698
460	0,622052	0,01	0,01	0,63	0,67	0,290	0,661	0,695	0,591	0,622
465	0,577724	0,01	0,01	0,59	0,62	0,284	0,615	0,647	0,526	0,553
470	0,539911	0,01	0,01	0,55	0,58	0,276	0,576	0,606	0,467	0,491
475	0,50759	0,02	0,02	0,52	0,55	0,266	0,542	0,570	0,414	0,435
480	0,479935	0,02	0,02	0,50	0,52	0,254	0,513	0,539	0,366	0,384
485	0,456271	0,02	0,02	0,47	0,50	0,240	0,487	0,512	0,322	0,338
490	0,43605	0,02	0,02	0,45	0,48	0,224	0,465	0,489	0,281	0,296
495	0,418822	0,02	0,02	0,44	0,46	0,207	0,446	0,469	0,244	0,257
500	0,404219	0,02	0,02	0,42	0,44	0,188	0,430	0,452	0,210	0,221
505	0,387163	0,02	0,02	0,41	0,43	0,167	0,411	0,432	0,177	0,186
510	0,370373	0,02	0,02	0,39	0,41	0,146	0,393	0,413	0,145	0,153
515	0,358253	0,02	0,02	0,38	0,40	0,123	0,380	0,399	0,117	0,123
520	0,328778	0,02	0,02	0,35	0,36	0,100	0,349	0,366	0,086	0,091
525	0,302301	0,02	0,02	0,32	0,34	0,075	0,321	0,337	0,060	0,063
530	0,261653	0,02	0,02	0,28	0,29	0,051	0,280	0,294	0,035	0,037

535	0,211867	0,02	0,02	0,23	0,24	0,025	0,230	0,241	0,014	0,015
540	0,187604	0,02	0,02	0,21	0,22	0,000	0,206	0,216	0,000	0,000
545	0,144665	0,02	0,02	0,16	0,17	-0,025	0,163	0,170	-0,010	-0,010
550	0,130565	0,02	0,02	0,15	0,16	-0,050	0,149	0,156	-0,018	-0,019
555	0,092786	0,02	0,02	0,11	0,12	-0,075	0,111	0,116	-0,021	-0,022
560	0,059921	0,02	0,02	0,08	0,08	-0,099	0,079	0,082	-0,019	-0,020
565	0,045869	0,02	0,02	0,06	0,07	-0,123	0,065	0,067	-0,020	-0,021
570	0,036501	0,02	0,02	0,05	0,06	-0,145	0,056	0,057	-0,020	-0,021
575	0,031255	0,02	0,02	0,05	0,05	-0,167	0,050	0,052	-0,022	-0,022
580	0,017765	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,187	0,037	0,038	-0,018	-0,018
585	0,017765	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,206	0,037	0,038	-0,020	-0,021
590	0,017765	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,224	0,036	0,037	-0,022	-0,023
595	0,017765	0,02	0,02	0,03	0,04	-0,240	0,036	0,037	-0,024	-0,024
600	0,017765	0,02	0,02	0,03	0,04	-0,254	0,035	0,036	-0,025	-0,026
605	0,017765	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,266	0,035	0,036	-0,026	-0,027
610	0,017765	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,276	0,033	0,034	-0,027	-0,028
615	0,017765	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,284	0,032	0,033	-0,027	-0,028
620	0,017765	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,290	0,030	0,031	-0,027	-0,028
625	0,017765	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,293	0,029	0,029	-0,026	-0,027
630	0,017765	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,294	0,026	0,027	-0,025	-0,026
635	0,017765	0,01	0,01	0,02	0,02	-0,293	0,024	0,025	-0,023	-0,024
640	0,017765	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,290	0,021	0,022	-0,021	-0,022
645	0,017765	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,284	0,018	0,019	-0,018	-0,019
650	0,017765	0,00	0,00	0,01	0,02	-0,276	0,015	0,016	-0,015	-0,016
655	0,017765	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,266	0,012	0,013	-0,012	-0,013
660	0,017765	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,254	0,009	0,010	-0,009	-0,010
665	0,017765	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,240	0,006	0,007	-0,005	-0,006
670	0,017765	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,224	0,003	0,004	-0,002	-0,003
675	0,017765	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,207	0,000	0,001	0,000	-0,001
680	0,017765	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,188	-0,003	-0,002	0,002	0,002
685	0,017765	-0,02	-0,02	-0,01	0,00	-0,167	-0,006	-0,005	0,004	0,003

690	0,017765	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,146	-0,008	-0,007	0,005	0,004
695	0,017765	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,123	-0,010	-0,009	0,005	0,005
700	0,017765	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,100	-0,012	-0,011	0,005	0,005
705	0,017765	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,075	-0,013	-0,012	0,004	0,004
710	0,017765	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,051	-0,014	-0,013	0,003	0,003
715	0,013015	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,026	-0,020	-0,019	0,002	0,002
720	0,008265	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	0,000	-0,025	-0,024	0,000	0,000

Таблица 2

Результаты расчета суммарной тангенциальной силы с отклонением для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых двигателей, заключающимся в снижении давления в 1-м цилиндре на 5%

ПКВ φ , град	4 цилиндра		6 цилиндров		12 цилиндров	
	$T_{\Sigma 4}$	$T_{\Sigma 4}$	$T_{\Sigma 6}$	$T_{\Sigma 6}$	$T_{\Sigma 12}$	$T_{\Sigma 12}$
	Без отклонений	С отклонением	Без отклонений	С отклонением	Без отклонений	С отклонением
	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа
0	0,000106049	0,000106049	3,37E-01	0,337	1,572344602	1,572344602
5	0,756291354	0,756298656	1,05E+00	1,050	2,078407606	2,078414908
10	1,485100981	1,485171316	1,74E+00	1,737	2,568552517	2,568622853
15	2,081631439	2,081735861	2,29E+00	2,288	2,937141951	2,937246373
20	2,444207288	2,44434452	2,60E+00	2,603	3,082503706	3,082640938
25	2,541390517	2,541558886	2,65E+00	2,653	2,972837098	2,973005467
30	2,498946709	2,499144175	2,56E+00	2,565	2,740905059	2,741102525
35	2,37007237	2,370296561	2,39E+00	2,393	2,450994088	2,451218278
40	2,201188384	2,201436632	2,17E+00	2,171	2,157429041	2,15767729
45	2,008217744	2,008487136	1,93E+00	1,932	1,901134076	1,901403468
50	1,813720837	1,814008263	1,69E+00	1,690	1,715876166	1,716163591
55	1,626745865	1,627048073	1,46E+00	1,456	1,613329317	1,613631525
60	1,451699219	1,452012874	1,24E+00	1,236	1,57234792	1,572661575

65	1,290203892	1,290525637	1,03E+00	1,029	2,078410527	2,078732272
70	1,142286362	1,142612876	8,32E-01	0,832	2,568554444	2,568880958
75	1,007099771	1,007427828	6,50E-01	0,650	2,93714234	2,937470397
80	0,883349286	0,883675805	4,80E-01	0,480	3,082502108	3,082828627
85	0,769533677	0,76985577	3,20E-01	0,320	2,972833187	2,973155281
90	0,664076503	0,664391514	1,76E-01	0,176	2,740898662	2,741213673
95	0,56539296	0,565698491	5,83E-02	0,059	2,450985197	2,451290728
100	0,471921476	0,472215408	-1,28E-02	-0,013	2,157417819	2,157711751
105	0,382139274	0,382419772	-3,04E-02	-0,030	1,901120847	1,901401346
110	0,294576132	0,294841646	2,63E-02	0,027	1,715861398	1,716126913
115	0,207839283	0,208088535	1,58E-01	0,158	1,613307704	1,613556955
120	0,120664529	0,120896493	3,37E-01	0,337	1,572348936	1,5725809
125	0,032014892	0,032228773	1,05E+00	1,050	2,078411419	2,0786253
130	-0,058740351	-0,058545145	1,74E+00	1,737	2,568555134	2,568750341
135	-0,15151588	-0,15133977	2,29E+00	2,288	2,937142892	2,937319002
140	-0,244998573	-0,244841838	2,60E+00	2,603	3,082502558	3,082659293
145	-0,338042157	-0,337904965	2,65E+00	2,653	2,972833588	2,972970779
150	-0,422080257	-0,421962692	2,56E+00	2,565	2,740899072	2,741016637
155	-0,484438234	-0,48434032	2,39E+00	2,393	2,45098568	2,451083595
160	-0,515657284	-0,515579006	2,17E+00	2,170	2,157418436	2,157496714
165	-0,489201265	-0,489142592	1,93E+00	1,932	1,901121649	1,901180323
170	-0,392400778	-0,392361672	1,69E+00	1,690	1,715862425	1,715901531
175	-0,221237192	-0,221217621	1,46E+00	1,456	1,613308977	1,613328548
180	1,73195E-06	1,78371E-06	1,24E+00	1,236	1,572350461	1,572350512
185	0,756208573	0,756189603	1,03E+00	1,029	2,078413208	2,078394239
190	1,485024903	1,484989903	8,32E-01	0,832	2,568557218	2,568522218
195	2,081574907	2,081529972	6,50E-01	0,650	2,937145291	2,937100357
200	2,444168147	2,444122693	4,80E-01	0,480	3,082505294	3,08245984
205	2,541358967	2,541326058	3,20E-01	0,320	2,972836682	2,972803773
210	2,498920461	2,49891725	1,76E-01	0,176	2,740902555	2,740899344
215	2,370049401	2,370097683	5,83E-02	0,058	2,450989591	2,451037873

220	2,201173531	2,20130041	-1,28E-02	-0,013	2,157422823	2,157549703
225	2,008203764	2,008442435	-3,04E-02	-0,030	1,90112657	1,901365241
230	1,813708004	1,814098644	2,63E-02	0,027	1,71586794	1,71625858
235	1,626734477	1,627325247	1,58E-01	0,158	1,613315141	1,61390591
240	1,451689584	1,452537731	3,37E-01	0,337	1,572357311	1,573205458
245	1,2901963	1,29136936	1,05E+00	1,051	2,078420751	2,079593811
250	1,142281054	1,143858135	1,74E+00	1,738	2,568565406	2,570142487
255	1,00709689	1,009170044	2,29E+00	2,290	2,937153997	2,939227151
260	0,883348821	0,886024479	2,60E+00	2,605	3,082514275	3,085189933
265	0,769535391	0,772935867	2,65E+00	2,657	2,972845532	2,976246008
270	0,664079843	0,668344872	2,56E+00	2,569	2,74091064	2,745175669
275	0,565396957	0,57068523	2,39E+00	2,398	2,450995967	2,456284241
280	0,471924612	0,478415229	2,17E+00	2,177	2,157426119	2,163916737
285	0,382139322	0,390032958	1,93E+00	1,939	1,901124835	1,909018471
290	0,294569958	0,304089386	1,69E+00	1,699	1,715858435	1,725377863
295	0,207822586	0,219211871	1,46E+00	1,467	1,613294066	1,624683351
300	0,120631499	0,134152579	1,24E+00	1,249	1,572319438	1,585840518
305	0,031957764	0,047882188	1,03E+00	1,045	2,078358913	2,094283337
310	-0,05883187	-0,040239941	8,32E-01	0,850	2,568469876	2,587061806
315	-0,151655332	-0,130171264	6,50E-01	0,671	2,937011756	2,958495823
320	-0,245203547	-0,220699584	4,80E-01	0,504	3,082308164	3,106812127
325	-0,338334993	-0,31087692	3,20E-01	0,347	2,972553512	3,000011586
330	-0,422488183	-0,392487021	1,76E-01	0,206	2,740505629	2,770506791
335	-0,48499196	-0,453416733	5,83E-02	0,089	2,450447222	2,482022449
340	-0,516386488	-0,485005415	-1,28E-02	0,018	2,15670375	2,188084824
345	-0,490125272	-0,461654457	-3,04E-02	-0,003	1,900209136	1,928679951
350	-0,393514647	-0,371435066	2,63E-02	0,047	1,714753818	1,7368334
355	-0,222504621	-0,210303294	1,58E-01	0,169	1,612042087	1,624243414
360	-0,001957848	-0,001858873	3,37E-01	0,335	1,570351993	1,570450967
365	0,752078268	0,713534824	1,05E+00	1,007	2,074220175	2,03567673
370	1,480965093	1,405087391	1,74E+00	1,657	2,564401189	2,488523486

375	2,077818672	1,971589396	2,29E+00	2,177	2,933246264	2,827016988
380	2,440921263	2,316252226	2,60E+00	2,475	3,079051849	2,954382812
385	2,538729598	2,408844294	2,65E+00	2,521	2,969914892	2,840029589
390	2,496846736	2,368787101	2,56E+00	2,435	2,738423409	2,610363774
395	2,368448556	2,246566773	2,39E+00	2,269	2,448839517	2,326957735
400	2,199961699	2,086569964	2,17E+00	2,056	2,155488005	2,04209627
405	2,007305599	1,903354696	1,93E+00	1,827	1,899311904	1,795361001
410	1,813059875	1,718670985	1,69E+00	1,594	1,714114168	1,619725278
415	1,626284379	1,541112526	1,46E+00	1,370	1,611611789	1,526439936
420	1,451395715	1,374859	1,24E+00	1,159	1,570094472	1,493557757
425	1,290025306	1,22144176	1,03E+00	0,960	2,074109229	2,005525683
430	1,142206364	1,080871931	8,32E-01	0,770	2,564419945	2,503085512
435	1,007097314	0,952328043	6,50E-01	0,595	2,933386529	2,878617258
440	0,883407414	0,834560615	4,80E-01	0,431	3,079313817	3,030467018
445	0,769638569	0,726121962	3,20E-01	0,276	2,970306997	2,926790389
450	0,664216703	0,625490943	1,76E-01	0,137	2,738961796	2,700236036
455	0,565558742	0,531136466	5,83E-02	0,023	2,449546136	2,415123861
460	0,472104314	0,441547484	-1,28E-02	-0,044	2,156385688	2,125828859
465	0,382331365	0,355247909	-3,04E-02	-0,058	1,900414725	1,87333127
470	0,294769948	0,27081022	2,63E-02	0,001	1,71541326	1,691453532
475	0,208027115	0,186880431	1,58E-01	0,135	1,613062134	1,59191545
480	0,120837981	0,10222936	3,37E-01	0,316	1,572261549	1,553652929
485	0,0321643	0,015851446	1,05E+00	1,030	2,07844696	2,062134106
490	-0,058626608	-0,07285608	1,74E+00	1,719	2,568685707	2,554456236
495	-0,151452193	-0,163783283	2,29E+00	2,272	2,937346454	2,925015364
500	-0,245002991	-0,255595608	2,60E+00	2,589	3,082761707	3,07216909
505	-0,338139483	-0,347020971	2,65E+00	2,642	2,973132276	2,964250789
510	-0,422298546	-0,42958035	2,56E+00	2,556	2,741225568	2,733943764
515	-0,484806531	-0,490673791	2,39E+00	2,385	2,451332894	2,445465634
520	-0,516214368	-0,520520174	2,17E+00	2,165	2,157770258	2,153464452
525	-0,489965289	-0,492934118	1,93E+00	1,928	1,901473675	1,898504846

530	-0,393374225	-0,39508842	1,69E+00	1,687	1,716202838	1,714488643
535	-0,222388706	-0,223085159	1,46E+00	1,455	1,613629422	1,612932968
540	-0,001853531	-0,001858397	1,24E+00	1,236	1,572661259	1,572656393
545	0,752161049	0,752629087	1,03E+00	1,029	2,078702525	2,079170562
550	1,481041171	1,481889771	8,32E-01	0,833	2,568838559	2,569687158
555	2,077875204	2,078781602	6,50E-01	0,651	2,937404962	2,938311361
560	2,440960404	2,44174203	4,80E-01	0,481	3,082744991	3,083526617
565	2,538761148	2,539509971	3,20E-01	0,321	2,973063742	2,973812565
570	2,496872985	2,497588716	1,76E-01	0,177	2,74111844	2,741834171
575	2,368471525	2,369186885	5,83E-02	0,059	2,451197989	2,451913349
580	2,199976551	2,200441167	-1,28E-02	-0,012	2,157609796	2,158074411
585	2,007319579	2,007841713	-3,04E-02	-0,030	1,901300534	1,901822667
590	1,813072708	1,813651535	2,63E-02	0,027	1,716021196	1,716600022
595	1,626295767	1,626930042	1,58E-01	0,158	1,613442444	1,614076719
600	1,451405351	1,45209332	3,37E-01	0,338	1,572471263	1,573159233
605	1,290032898	1,29077221	1,05E+00	1,051	2,078511124	2,079250436
610	1,142211673	1,142999293	1,74E+00	1,738	2,568646792	2,569434413
615	1,007100195	1,007932338	2,29E+00	2,288	2,937213411	2,938045553
620	0,883407879	0,884279949	2,60E+00	2,604	3,082553881	3,083425951
625	0,769636856	0,770543418	2,65E+00	2,654	2,972875368	2,97378193
630	0,664213362	0,665148132	2,56E+00	2,566	2,740933548	2,741868318
635	0,565554744	0,566510616	2,39E+00	2,394	2,451014939	2,451970811
640	0,472101178	0,473070273	2,17E+00	2,171	2,157437836	2,158406931
645	0,382331316	0,38330507	1,93E+00	1,933	1,901138767	1,90211252
650	0,294776122	0,295745397	1,69E+00	1,691	1,715877442	1,716846717
655	0,208043812	0,208999034	1,46E+00	1,457	1,613322151	1,614277373
660	0,120871011	0,121802325	1,24E+00	1,237	1,572362104	1,573293418
665	0,032221427	0,033118868	1,03E+00	1,030	2,078423633	2,079321074
670	-0,058535089	-0,057681419	8,32E-01	0,833	2,568566704	2,569420374
675	-0,151312741	-0,150512499	6,50E-01	0,651	2,93715409	2,937954332
680	-0,244798017	-0,244060441	4,80E-01	0,481	3,082513603	3,083251179

685	-0,337846647	-0,337180393	3,20E-01	0,320	2,972844635	2,973510889
690	-0,421890621	-0,421303612	1,76E-01	0,177	2,740910214	2,741497223
695	-0,484252805	-0,483752095	5,83E-02	0,059	2,45099695	2,45149766
700	-0,515485164	-0,515076817	-1,28E-02	-0,012	2,157429819	2,157838166
705	-0,489041281	-0,488730273	-3,04E-02	-0,030	1,901133095	1,901444103
710	-0,392260355	-0,392050492	2,63E-02	0,027	1,715873861	1,716083724
715	-0,221121276	-0,221043514	1,58E-01	0,158	1,613326213	1,613403975
720	0,000106049	0,000106049	3,37E-01	0,337	1,572344602	1,572344602

Результаты расчета тангенциальной силы с отклонением, заключающимся в изменении доли отклонения длины шатуна для 1-го и 2-го цилиндров на 1%

Значения сил и величин отклонений для 1-го и/или 2-го цилиндров										
ПКВ	$K_{pг1}$	$K_{мп1}$	$K_{мп2}$			$K_{ш}$			$\Delta\phi$, град	$\Delta\phi$, град
φ , град	0	0	0			0,01			0	0
	P_{r1} , МПа	P_{1jn} , МПа	P_{2jn} , МПа	P_1 1, МПа	P_1 2, МПа	β_1 , рад	$P_{ш1}$, МПа	$P_{ш2}$, МПа	T_1 , МПа	T_2 , МПа
0	0,0037	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,000	-0,029	-0,029	0,000	0,000
5	-0,0013	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,025	-0,034	-0,034	-0,004	-0,004
10	-0,0063	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	0,050	-0,038	-0,038	-0,009	-0,009
15	-0,0063	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	0,074	-0,038	-0,038	-0,012	-0,012
20	-0,0063	-0,03	-0,03	-0,04	-0,04	0,098	-0,036	-0,036	-0,016	-0,016
25	-0,0063	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,122	-0,034	-0,034	-0,018	-0,018
30	-0,0063	-0,03	-0,03	-0,03	-0,03	0,144	-0,032	-0,032	-0,020	-0,020
35	-0,0063	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	0,165	-0,030	-0,030	-0,021	-0,021
40	-0,0063	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	0,186	-0,028	-0,028	-0,021	-0,021
45	-0,0063	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,204	-0,025	-0,025	-0,021	-0,021
50	-0,0063	-0,02	-0,02	-0,02	-0,02	0,222	-0,022	-0,022	-0,020	-0,020
55	-0,0063	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	0,237	-0,019	-0,019	-0,018	-0,018
60	-0,0063	-0,01	-0,01	-0,02	-0,02	0,251	-0,016	-0,016	-0,015	-0,015
65	-0,0063	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	0,263	-0,013	-0,013	-0,013	-0,013
70	-0,0063	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,273	-0,010	-0,010	-0,010	-0,010
75	-0,0063	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,281	-0,007	-0,007	-0,007	-0,007
80	-0,0063	0,00	0,00	0,00	0,00	0,287	-0,004	-0,004	-0,004	-0,004
85	-0,0063	0,01	0,01	0,00	0,00	0,290	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001
90	-0,0063	0,01	0,01	0,00	0,00	0,291	0,001	0,001	0,001	0,001
95	-0,0063	0,01	0,01	0,00	0,00	0,290	0,003	0,003	0,003	0,003
100	-0,0063	0,01	0,01	0,01	0,01	0,287	0,005	0,005	0,005	0,005

105	-0,0063	0,01	0,01	0,01	0,01	0,281	0,007	0,007	0,006	0,006
110	-0,0063	0,01	0,01	0,01	0,01	0,273	0,008	0,008	0,007	0,007
115	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,263	0,010	0,010	0,007	0,007
120	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,251	0,011	0,011	0,008	0,008
125	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,237	0,011	0,011	0,007	0,007
130	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,222	0,012	0,012	0,007	0,007
135	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,204	0,012	0,012	0,007	0,007
140	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,186	0,012	0,012	0,006	0,006
145	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,165	0,012	0,012	0,005	0,005
150	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,144	0,012	0,012	0,005	0,005
155	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,122	0,012	0,012	0,004	0,004
160	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,098	0,012	0,012	0,003	0,003
165	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,074	0,012	0,012	0,002	0,002
170	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,050	0,012	0,012	0,001	0,001
175	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,025	0,012	0,012	0,001	0,001
180	-0,0063	0,02	0,02	0,01	0,01	0,000	0,012	0,012	0,000	0,000
185	-0,00614	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,025	0,012	0,012	-0,001	-0,001
190	-0,00565	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,050	0,013	0,013	-0,002	-0,002
195	-0,00483	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,074	0,013	0,013	-0,003	-0,003
200	-0,00366	0,02	0,02	0,01	0,01	-0,098	0,015	0,015	-0,004	-0,004
205	-0,00212	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,122	0,016	0,016	-0,005	-0,005
210	-0,00017	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,144	0,018	0,018	-0,007	-0,007
215	0,002219	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,165	0,021	0,021	-0,009	-0,009
220	0,005103	0,02	0,02	0,02	0,02	-0,186	0,024	0,024	-0,012	-0,012
225	0,008543	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,204	0,027	0,027	-0,015	-0,015
230	0,012614	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,222	0,031	0,031	-0,019	-0,019
235	0,017409	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,237	0,036	0,036	-0,024	-0,024
240	0,023045	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,251	0,041	0,041	-0,029	-0,029
245	0,029661	0,02	0,02	0,05	0,05	-0,263	0,047	0,047	-0,036	-0,036
250	0,037432	0,01	0,01	0,05	0,05	-0,273	0,054	0,054	-0,044	-0,044
255	0,046576	0,01	0,01	0,06	0,06	-0,281	0,062	0,062	-0,053	-0,053

260	0,057362	0,01	0,01	0,07	0,07	-0,287	0,072	0,072	-0,064	-0,064
265	0,07013	0,01	0,01	0,08	0,08	-0,290	0,083	0,083	-0,077	-0,077
270	0,08531	0,01	0,01	0,09	0,09	-0,291	0,097	0,097	-0,093	-0,093
275	0,103446	0,01	0,01	0,11	0,11	-0,290	0,113	0,113	-0,111	-0,111
280	0,125239	0,00	0,00	0,13	0,13	-0,287	0,133	0,133	-0,132	-0,132
285	0,151589	0,00	0,00	0,15	0,15	-0,281	0,158	0,158	-0,158	-0,158
290	0,183665	0,00	0,00	0,18	0,18	-0,273	0,188	0,188	-0,187	-0,187
295	0,222987	-0,01	-0,01	0,22	0,22	-0,263	0,225	0,225	-0,221	-0,221
300	0,271537	-0,01	-0,01	0,26	0,26	-0,251	0,271	0,271	-0,261	-0,261
305	0,331894	-0,01	-0,01	0,32	0,32	-0,237	0,329	0,329	-0,306	-0,306
310	0,407388	-0,02	-0,02	0,39	0,39	-0,222	0,402	0,402	-0,357	-0,357
315	0,502232	-0,02	-0,02	0,48	0,48	-0,205	0,494	0,494	-0,413	-0,413
320	0,621557	-0,02	-0,02	0,60	0,60	-0,186	0,611	0,611	-0,473	-0,473
325	0,771139	-0,02	-0,02	0,75	0,75	-0,166	0,758	0,758	-0,531	-0,531
330	0,956446	-0,03	-0,03	0,93	0,93	-0,144	0,940	0,940	-0,583	-0,583
335	1,180358	-0,03	-0,03	1,15	1,15	-0,122	1,161	1,161	-0,615	-0,615
340	1,438853	-0,03	-0,03	1,41	1,41	-0,098	1,416	1,416	-0,613	-0,613
345	1,714774	-0,03	-0,03	1,68	1,68	-0,074	1,688	1,688	-0,558	-0,558
350	1,972534	-0,03	-0,03	1,94	1,94	-0,050	1,943	1,943	-0,433	-0,433
355	2,160907	-0,03	-0,03	2,13	2,13	-0,025	2,129	2,129	-0,240	-0,240
360	3,315703	-0,03	-0,03	3,28	3,28	0,000	3,283	3,283	-0,002	-0,002
365	6,8987	-0,03	-0,03	6,87	6,87	0,025	6,868	6,868	0,765	0,765
370	6,814174	-0,03	-0,03	6,78	6,78	0,050	6,790	6,790	1,507	1,507
375	6,419924	-0,03	-0,03	6,39	6,39	0,074	6,406	6,406	2,110	2,110
380	5,730371	-0,03	-0,03	5,70	5,70	0,098	5,728	5,728	2,475	2,475
385	4,864664	-0,03	-0,03	4,84	4,84	0,122	4,873	4,873	2,577	2,577
390	4,088718	-0,03	-0,03	4,06	4,06	0,144	4,105	4,105	2,540	2,540
395	3,427078	-0,02	-0,02	3,40	3,40	0,165	3,451	3,451	2,416	2,416
400	2,879027	-0,02	-0,02	2,86	2,86	0,185	2,908	2,908	2,247	2,247
405	2,431932	-0,02	-0,02	2,41	2,41	0,204	2,465	2,465	2,060	2,060
410	2,069509	-0,02	-0,02	2,05	2,05	0,222	2,106	2,106	1,871	1,871

415	1,775953	-0,01	-0,01	1,76	1,76	0,237	1,815	1,815	1,689	1,689
420	1,537553	-0,01	-0,01	1,53	1,53	0,251	1,578	1,578	1,520	1,520
425	1,343058	-0,01	-0,01	1,34	1,34	0,263	1,385	1,385	1,364	1,364
430	1,183491	0,00	0,00	1,18	1,18	0,273	1,226	1,226	1,222	1,222
435	1,051789	0,00	0,00	1,05	1,05	0,281	1,095	1,095	1,094	1,094
440	0,942426	0,00	0,00	0,94	0,94	0,287	0,985	0,985	0,979	0,979
445	0,851084	0,01	0,01	0,86	0,86	0,290	0,893	0,893	0,875	0,875
450	0,77438	0,01	0,01	0,78	0,78	0,291	0,816	0,816	0,782	0,782
455	0,70965	0,01	0,01	0,72	0,72	0,290	0,751	0,751	0,698	0,698
460	0,654792	0,01	0,01	0,67	0,67	0,287	0,695	0,695	0,622	0,622
465	0,60813	0,01	0,01	0,62	0,62	0,281	0,647	0,647	0,554	0,554
470	0,568327	0,01	0,01	0,58	0,58	0,273	0,605	0,605	0,492	0,492
475	0,534306	0,02	0,02	0,55	0,55	0,263	0,569	0,569	0,436	0,436
480	0,505194	0,02	0,02	0,52	0,52	0,251	0,539	0,539	0,385	0,385
485	0,480285	0,02	0,02	0,50	0,50	0,238	0,512	0,512	0,339	0,339
490	0,459	0,02	0,02	0,48	0,48	0,222	0,489	0,489	0,296	0,296
495	0,440865	0,02	0,02	0,46	0,46	0,205	0,469	0,469	0,257	0,257
500	0,425493	0,02	0,02	0,44	0,44	0,186	0,452	0,452	0,222	0,222
505	0,40754	0,02	0,02	0,43	0,43	0,166	0,432	0,432	0,186	0,186
510	0,389867	0,02	0,02	0,41	0,41	0,144	0,413	0,413	0,153	0,153
515	0,377108	0,02	0,02	0,40	0,40	0,122	0,398	0,398	0,124	0,124
520	0,346082	0,02	0,02	0,36	0,36	0,099	0,366	0,366	0,091	0,091
525	0,318211	0,02	0,02	0,34	0,34	0,075	0,337	0,337	0,063	0,063
530	0,275424	0,02	0,02	0,29	0,29	0,050	0,294	0,294	0,037	0,037
535	0,223018	0,02	0,02	0,24	0,24	0,025	0,241	0,241	0,015	0,015
540	0,197478	0,02	0,02	0,22	0,22	0,000	0,216	0,216	0,000	0,000
545	0,152279	0,02	0,02	0,17	0,17	-0,025	0,170	0,170	-0,011	-0,011
550	0,137437	0,02	0,02	0,16	0,16	-0,050	0,156	0,156	-0,019	-0,019
555	0,097669	0,02	0,02	0,12	0,12	-0,074	0,116	0,116	-0,022	-0,022
560	0,063075	0,02	0,02	0,08	0,08	-0,098	0,082	0,082	-0,020	-0,020
565	0,048283	0,02	0,02	0,07	0,07	-0,121	0,067	0,067	-0,021	-0,021

570	0,038422	0,02	0,02	0,06	0,06	-0,144	0,057	0,057	-0,021	-0,021
575	0,0329	0,02	0,02	0,05	0,05	-0,165	0,052	0,052	-0,022	-0,022
580	0,0187	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,185	0,038	0,038	-0,018	-0,018
585	0,0187	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,204	0,038	0,038	-0,021	-0,021
590	0,0187	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,222	0,037	0,037	-0,023	-0,023
595	0,0187	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,237	0,037	0,037	-0,024	-0,024
600	0,0187	0,02	0,02	0,04	0,04	-0,251	0,036	0,036	-0,026	-0,026
605	0,0187	0,02	0,02	0,03	0,03	-0,263	0,035	0,035	-0,027	-0,027
610	0,0187	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,273	0,034	0,034	-0,028	-0,028
615	0,0187	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,281	0,033	0,033	-0,028	-0,028
620	0,0187	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,287	0,031	0,031	-0,028	-0,028
625	0,0187	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,290	0,029	0,029	-0,027	-0,027
630	0,0187	0,01	0,01	0,03	0,03	-0,291	0,027	0,027	-0,026	-0,026
635	0,0187	0,01	0,01	0,02	0,02	-0,290	0,025	0,025	-0,024	-0,024
640	0,0187	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,287	0,022	0,022	-0,022	-0,022
645	0,0187	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,281	0,019	0,019	-0,019	-0,019
650	0,0187	0,00	0,00	0,02	0,02	-0,273	0,016	0,016	-0,016	-0,016
655	0,0187	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,263	0,013	0,013	-0,013	-0,013
660	0,0187	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,251	0,010	0,010	-0,010	-0,010
665	0,0187	-0,01	-0,01	0,01	0,01	-0,238	0,007	0,007	-0,006	-0,006
670	0,0187	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,222	0,004	0,004	-0,003	-0,003
675	0,0187	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,205	0,001	0,001	-0,001	-0,001
680	0,0187	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,186	-0,002	-0,002	0,002	0,002
685	0,0187	-0,02	-0,02	0,00	0,00	-0,166	-0,005	-0,005	0,003	0,003
690	0,0187	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,144	-0,007	-0,007	0,004	0,004
695	0,0187	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,122	-0,009	-0,009	0,005	0,005
700	0,0187	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,099	-0,011	-0,011	0,005	0,005
705	0,0187	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,075	-0,012	-0,012	0,004	0,004
710	0,0187	-0,03	-0,03	-0,01	-0,01	-0,050	-0,013	-0,013	0,003	0,003
715	0,0137	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	-0,025	-0,019	-0,019	0,002	0,002
720	0,0087	-0,03	-0,03	-0,02	-0,02	0,000	-0,024	-0,024	0,000	0,000

Результаты расчета суммарной тангенциальной силы с отклонением для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрических двигателей, заключающимся в изменении доли отклонения длины шатуна для 1-го и 2-го цилиндров на 1%

ПКВ φ , град	4 цилиндра		6 цилиндров		12 цилиндров	
	$T_{\Sigma 4}$	$T_{\Sigma 4}$	$T_{\Sigma 6}$	$T_{\Sigma 6}$	$T_{\Sigma 12}$	$T_{\Sigma 12}$
	Без отклонений	С отклонением	Без отклонений	С отклонением	Без отклонений	С отклонением
	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа
0	0,000106049	0,000106483	3,37E-01	0,33656517	1,572344602	1,572357909
5	0,756291354	0,756257323	1,05E+00	1,049729086	2,078407606	2,078425952
10	1,485100981	1,485042936	1,74E+00	1,73670118	2,568552517	2,568577127
15	2,081631439	2,081574234	2,29E+00	2,287439396	2,937141951	2,937170268
20	2,444207288	2,444164463	2,60E+00	2,602530145	3,082503706	3,082534489
25	2,541390517	2,541353742	2,65E+00	2,653256115	2,972837098	2,972869197
30	2,498946709	2,49891475	2,56E+00	2,565004221	2,740905059	2,740937446
35	2,37007237	2,37004183	2,39E+00	2,392787165	2,450994088	2,451025877
40	2,201188384	2,201173615	2,17E+00	2,170315504	2,157429041	2,157459501
45	2,008217744	2,008198585	1,93E+00	1,931589767	1,901134076	1,901162643
50	1,813720837	1,813697778	1,69E+00	1,689569671	1,715876166	1,71590245
55	1,626745865	1,626719895	1,46E+00	1,455769354	1,613329317	1,613351829
60	1,451699219	1,451671778	1,24E+00	1,235783218	1,57234792	1,572369185
65	1,290203892	1,290176756	1,03E+00	1,028686277	2,078410527	2,07843435
70	1,142286362	1,142261475	8,32E-01	0,831865965	2,568554444	2,568583361
75	1,007099771	1,007079048	6,50E-01	0,649723166	2,93714234	2,937175002
80	0,883349286	0,883334399	4,80E-01	0,480000389	3,082502108	3,082538271
85	0,769533677	0,769525868	3,20E-01	0,319613989	2,972833187	2,972872416
90	0,664076503	0,664076432	1,76E-01	0,17593961	2,740898662	2,740940308
95	0,56539296	0,565400632	5,83E-02	0,058250637	2,450985197	2,451028404

100	0,471921476	0,471936235	-1,28E-02	-0,012839017	2,157417819	2,157461565
105	0,382139274	0,382159884	-3,04E-02	-0,030406017	1,901120847	1,901164017
110	0,294576132	0,294600924	2,63E-02	0,026356745	1,715861398	1,715902883
115	0,207839283	0,207866346	1,58E-01	0,157607893	1,613307704	1,613346508
120	0,120664529	0,120691918	3,37E-01	0,336611473	1,572348936	1,572384284
125	0,032014892	0,032040831	1,05E+00	1,049772505	2,078411419	2,078442836
130	-0,058740351	-0,058717302	1,74E+00	1,736739927	2,568555134	2,568582491
135	-0,15151588	-0,151496715	2,29E+00	2,287472042	2,937142892	2,937166401
140	-0,244998573	-0,244983785	2,60E+00	2,602555755	3,082502558	3,082522727
145	-0,338042157	-0,338031746	2,65E+00	2,653274329	2,972833588	2,972851129
150	-0,422080257	-0,422073798	2,56E+00	2,565015264	2,740899072	2,74091479
155	-0,484438234	-0,484434983	2,39E+00	2,392791784	2,45098568	2,45100035
160	-0,515657284	-0,515656312	2,17E+00	2,170314844	2,157418436	2,157432694
165	-0,489201265	-0,489201606	1,93E+00	1,931585202	1,901121649	1,901135911
170	-0,392400778	-0,392401565	1,69E+00	1,689562623	1,715862425	1,715876838
175	-0,221237192	-0,221239048	1,46E+00	1,455761105	1,613308977	1,613323414
180	1,73195E-06	1,7399E-06	1,24E+00	1,235774761	1,572350461	1,572364551
185	0,756208573	0,756214134	1,03E+00	1,028678203	2,078413208	2,078426363
190	1,485024903	1,485037794	8,32E-01	0,831858256	2,568557218	2,568568548
195	2,081574907	2,081592437	6,50E-01	0,649715168	2,937145291	2,93715367
200	2,444168147	2,444188316	4,80E-01	0,479990913	3,082505294	3,082509469
205	2,541358967	2,541379361	3,20E-01	0,319601468	2,972836682	2,972835388
210	2,498920461	2,498938459	1,76E-01	0,175922307	2,740902555	2,740894625
215	2,370049401	2,370062404	5,83E-02	0,058226871	2,450989591	2,450974057
220	2,201173531	2,201179209	-1,28E-02	-0,012870634	2,157422823	2,157399014
225	2,008203764	2,008200299	-3,04E-02	-0,030446358	1,90112657	1,901094197
230	1,813708004	1,81369432	2,63E-02	0,026307524	1,71586794	1,715827184
235	1,626734477	1,626710439	1,58E-01	0,157545894	1,613315141	1,613266735
240	1,451689584	1,451656155	3,37E-01	0,336564645	1,572357311	1,572302625
245	1,2901963	1,290155648	1,05E+00	1,049716464	2,078420751	2,078361837
250	1,142281054	1,142236611	1,74E+00	1,736675445	2,568565406	2,568504937

255	1,00709689	1,007053366	2,29E+00	2,287405113	2,937153997	2,937095342
260	0,883348821	0,883312183	2,60E+00	2,602492385	3,082514275	3,082461642
265	0,769535391	0,769512829	2,65E+00	2,653221788	2,972845532	2,972804135
270	0,664079843	0,664079737	2,56E+00	2,564982007	2,74091064	2,740886886
275	0,565396957	0,565428853	2,39E+00	2,392787333	2,450995967	2,45099766
280	0,471924612	0,471999232	2,17E+00	2,170349631	2,157426119	2,157462671
285	0,382139322	0,382268591	1,93E+00	1,931670368	1,901124835	1,901207468
290	0,294569958	0,294767036	1,69E+00	1,689709737	1,715858435	1,716000344
295	0,207822586	0,208101865	1,46E+00	1,455981778	1,613294066	1,613510503
300	0,120631499	0,121008494	1,24E+00	1,23608006	1,572319438	1,572627656
305	0,031957764	0,032448775	1,03E+00	1,029077748	2,078358913	2,078777855
310	-0,05883187	-0,058210527	8,32E-01	0,832358798	2,568469876	2,569019421
315	-0,151655332	-0,15088883	6,50E-01	0,65031832	2,937011756	2,937711225
320	-0,245203547	-0,244281304	4,80E-01	0,480689611	3,082308164	3,083173599
325	-0,338334993	-0,337255346	3,20E-01	0,320374648	2,972553512	2,973593056
330	-0,422488183	-0,421265756	1,76E-01	0,176727488	2,740505629	2,741712232
335	-0,48499196	-0,483668035	5,83E-02	0,058991291	2,450447222	2,451788373
340	-0,516386488	-0,515040839	-1,28E-02	-0,012257225	2,15670375	2,158109761
345	-0,490125272	-0,488883646	-3,04E-02	-0,030129771	1,900209136	1,901565769
350	-0,393514647	-0,39254037	2,63E-02	0,026168285	1,714753818	1,71591076
355	-0,222504621	-0,221962488	1,58E-01	0,156827775	1,612042087	1,612849063
360	-0,001957848	-0,001953434	3,37E-01	0,334594372	1,570351993	1,57071931
365	0,752078268	0,750354058	1,05E+00	1,043847903	2,074220175	2,07297382
370	1,480965093	1,477591629	1,74E+00	1,729230151	2,564401189	2,561637738
375	2,077818672	2,073145884	2,29E+00	2,278967161	2,933246264	2,9293316
380	2,440921263	2,435522032	2,60E+00	2,593841644	3,079051849	3,074570685
385	2,538729598	2,533221358	2,65E+00	2,645085072	2,969914892	2,965487593
390	2,496846736	2,491560974	2,56E+00	2,55763004	2,738423409	2,734368003
395	2,368448556	2,363586465	2,39E+00	2,386339447	2,448839517	2,445316884
400	2,199961699	2,195626141	2,17E+00	2,164825433	2,155488005	2,152521906
405	2,007305599	2,003534104	1,93E+00	1,927032278	1,899311904	1,896814408

410	1,813059875	1,809850309	1,69E+00	1,685891771	1,714114168	1,711919634
415	1,626284379	1,623612368	1,46E+00	1,452906801	1,611611789	1,609530318
420	1,451395715	1,449225545	1,24E+00	1,233669183	1,570094472	1,567983402
425	1,290025306	1,288316373	1,03E+00	1,027254945	2,074109229	2,070735
430	1,142206364	1,140916831	8,32E-01	0,83105296	2,564419945	2,559817416
435	1,007097314	1,006186107	6,50E-01	0,649463793	2,933386529	2,92786119
440	0,883407414	0,882835296	4,80E-01	0,480225983	3,079313817	3,0733951
445	0,769638569	0,769368724	3,20E-01	0,320246283	2,970306997	2,964570308
450	0,664216703	0,664215102	1,76E-01	0,176883018	2,738961796	2,733698188
455	0,565558742	0,565794439	5,83E-02	0,059383171	2,449546136	2,444918051
460	0,472104314	0,472549718	-1,28E-02	-0,011673058	2,156385688	2,152458983
465	0,382331365	0,382962515	-3,04E-02	-0,029394133	1,900414725	1,897191746
470	0,294769948	0,295566761	2,63E-02	0,027017665	1,71541326	1,712858597
475	0,208027115	0,208973551	1,58E-01	0,15775614	1,613062134	1,611120123
480	0,120837981	0,121922045	3,37E-01	0,335569851	1,572261549	1,570867226
485	0,0321643	0,033377744	1,05E+00	1,044841399	2,07844696	2,07753253
490	-0,058626608	-0,057289083	1,74E+00	1,730215206	2,568685707	2,568184155
495	-0,151452193	-0,14999454	2,29E+00	2,279919778	2,937346454	2,937193432
500	-0,245002991	-0,243430713	2,60E+00	2,594740062	3,082761707	3,082896432
505	-0,338139483	-0,336471639	2,65E+00	2,645900033	2,973132276	2,973490731
510	-0,422298546	-0,420562256	2,56E+00	2,558341278	2,741225568	2,741753654
515	-0,484806531	-0,483046528	2,39E+00	2,386937352	2,451332894	2,451987444
520	-0,516214368	-0,514534864	2,17E+00	2,16526775	2,157770258	2,158489156
525	-0,489965289	-0,48848583	1,93E+00	1,927316822	1,901473675	1,90222765
530	-0,393374225	-0,39225916	1,69E+00	1,685999822	1,716202838	1,716957773
535	-0,222388706	-0,22178831	1,46E+00	1,452837211	1,613629422	1,614369278
540	-0,001853531	-0,001848691	1,24E+00	1,233448895	1,572661259	1,573382846
545	0,752161049	0,750397247	1,03E+00	1,026882117	2,078702525	2,079398522
550	1,481041171	1,477596771	8,32E-01	0,830543618	2,568838559	2,569495134
555	2,077875204	2,07312768	6,50E-01	0,648829706	2,937404962	2,938029756
560	2,440960404	2,435498178	4,80E-01	0,479490173	3,082744991	3,083336207

565	2,538761148	2,533195739	3,20E-01	0,319431743	2,973063742	2,973593476
570	2,496872985	2,491537265	1,76E-01	0,176033963	2,74111844	2,741574415
575	2,368471525	2,36356589	5,83E-02	0,058571883	2,451197989	2,45157499
580	2,199976551	2,195620547	-1,28E-02	-0,012325742	2,157609796	2,157899394
585	2,007319579	2,00353239	-3,04E-02	-0,029754148	1,901300534	1,901490298
590	1,813072708	1,809853766	2,63E-02	0,027110706	1,716021196	1,716111852
595	1,626295767	1,623621824	1,58E-01	0,158427036	1,613442444	1,613450368
600	1,451405351	1,449241169	3,37E-01	0,337493821	1,572471263	1,572422991
605	1,290032898	1,28833748	1,05E+00	1,050666541	2,078511124	2,078426134
610	1,142211673	1,140941695	1,74E+00	1,737621753	2,568646792	2,568534943
615	1,007100195	1,00621179	2,29E+00	2,288325085	2,937213411	2,937102821
620	0,883407879	0,882857513	2,60E+00	2,603365193	3,082553881	3,082460006
625	0,769636856	0,769381763	2,65E+00	2,654018534	2,972875368	2,972791555
630	0,664213362	0,664211798	2,56E+00	2,565682202	2,740933548	2,740859873
635	0,565554744	0,565766218	2,39E+00	2,393380619	2,451014939	2,450948864
640	0,472101178	0,472486721	2,17E+00	2,170792609	2,157437836	2,15739408
645	0,382331316	0,382853808	1,93E+00	1,931959476	1,901138767	1,901097047
650	0,294776122	0,295400649	1,69E+00	1,689824836	1,715877442	1,71583769
655	0,208043812	0,208738033	1,46E+00	1,455920437	1,613322151	1,61328444
660	0,120871011	0,12160547	1,24E+00	1,235868228	1,572362104	1,572326705
665	0,032221427	0,032969801	1,03E+00	1,028712994	2,078423633	2,078391019
670	-0,058535089	-0,057795858	8,32E-01	0,831857164	2,568566704	2,56853751
675	-0,151312741	-0,150602425	6,50E-01	0,649692231	2,93715409	2,937129022
680	-0,244798017	-0,244133194	4,80E-01	0,479963277	3,082513603	3,082493336
685	-0,337846647	-0,337248039	3,20E-01	0,319572629	2,972844635	2,972829695
690	-0,421890621	-0,421370299	1,76E-01	0,175895736	2,740910214	2,740900885
695	-0,484252805	-0,483813475	5,83E-02	0,058203769	2,45099695	2,450993204
700	-0,515485164	-0,515150337	-1,28E-02	-0,012878292	2,157429819	2,157431291
705	-0,489041281	-0,488803791	-3,04E-02	-0,030449446	1,901133095	1,901139102
710	-0,392260355	-0,392120355	2,63E-02	0,026310548	1,715873861	1,715883453
715	-0,221121276	-0,22106487	1,58E-01	0,15756067	1,613326213	1,613336983

давление K_{pr}			180) [МПа]	240) [МПа]	300) [МПа]	360) [МПа]	420) [МПа]	480) [МПа]	540) [МПа]	600) [МПа]	660) [МПа]	720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5%	0,001312 918	0,001347 407	0,001304 293	0,001290 347	0,002712 24	0,013552 021	0,104944 172	0,019696 535	0,000408 892	0,001494 262	0,001507 303	0,001427 374
10%	0,005045 567	0,005182 81	0,005013 161	0,004957 648	0,010573 454	0,054311 592	0,410440 566	0,074919 739	0,001576 859	0,005641 561	0,005784 255	0,005489 345
20%	0,019776 864	0,020324 303	0,019651 345	0,019429 919	0,041749 767	0,217464 578	1,623302 258	0,292111 677	0,006205 535	0,021910 917	0,022655 71	0,021524 147
30%	0,044196 161	0,045426 715	0,043916 792	0,043419 083	0,093531 258	0,489462 687	3,638655 822	0,651630 987	0,013891 199	0,048813 284	0,050617 233	0,048106 763
40%	0,078303 457	0,080490 044	0,077809 504	0,076925 14	0,165917 928	0,870305 92	6,456501 26	1,153477 671	0,024633 851	0,086348 66	0,089668 824	0,085237 191
	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.

Таблица 7

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при снижении давления K_{pr} в 1-м цилиндре 4-х цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля изменения давления K_{pr}	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
0%	0	0	0	0
5%	0,009870781	0,014893757	0,088979108	0,009236593
10%	0,038367589	0,059324845	0,352395939	0,037851959

20%	0,1512942	0,236848482	1,402597682	0,153268481
30%	0,338798135	0,5325874	3,150623532	0,346266055
40%	0,600879396	0,946541599	5,59647349	0,616844682
	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 8

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при снижении давления K_{pr} в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля изменения давления K_{pr}	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0
5%	0,004047417	0,00397111	0,014321347	0,109773039	0,001989955	0,004615772
10%	0,015781098	0,015529005	0,057330775	0,433311358	0,00807981	0,017564518
20%	0,062328961	0,061419533	0,22943666	1,721778285	0,032613173	0,068518073
30%	0,139650828	0,137676378	0,516325253	3,865432262	0,073618072	0,152879709
40%	0,2477467	0,244299539	0,917996552	6,864273289	0,131094508	0,270649427
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 9

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при снижении давления K_{pr} в 1-м цилиндре 12-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля изменения давления K_{pr}	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0,001388 228	0,001251 132	0,001223 543	0,001234 634	0,002610 458	0,013523 921	0,104177 69	0,019529 415	0,000405 169	0,001542 377	0,001510 118	0,001526 851
10	0,005191 361	0,004991 97	0,004853 376	0,004847 645	0,010371 199	0,054256 528	0,408927 458	0,074594 301	0,001570 612	0,005734 542	0,005788 907	0,005682 238
20	0,020063 627	0,019944 334	0,019333 491	0,019211 337	0,041346 564	0,217355 586	1,620295 899	0,291469 602	0,006194 239	0,022093 629	0,022664 035	0,021903 873
30	0,044623 893	0,044857 616	0,043440 87	0,043091 922	0,092927 108	0,489299 768	3,634156 213	0,650672 276	0,013874 853	0,049085 726	0,050629 231	0,048673 322
40	0,078872 157	0,079731 817	0,077175 513	0,076489 399	0,165112 831	0,870089 074	6,450508 4	1,152202 323	0,024612 455	0,086710 833	0,089684 495	0,085990 583
	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.

Таблица 10

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении доли отклонения длины шатуна ($K_{ш}$) 4-х цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Доля отклонения шатуна $K_{ш}$	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
--------------------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

0%	0	0	0	0
1%	0,000128411	0,000123983	0,000128411	0,000123983
2%	0,000350822	0,000335814	0,000350822	0,000335814
3%	0,000688303	0,000656098	0,000688303	0,000656098
4%	0,001140598	0,001084605	0,001140598	0,001084605
5%	0,001707455	0,001621109	0,001707455	0,001621109
	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 11

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении доли отклонения длины шатуна ($K_{ш}$) 6-ти цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Доля отклонения шатуна $K_{ш}$	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0
1%	4,36358E-05	4,448E-05	4,73831E-05	0,00024126	0,00017784	7,89299E-05
2%	0,000117969	0,000121001	0,000133756	0,000655067	0,000478953	0,000214801
3%	0,000230958	0,000237339	0,000269283	0,001279815	0,000934808	0,000419259
4%	0,000382523	0,000393414	0,000453846	0,002115076	0,001545048	0,00069216
5%	0,000572587	0,000589145	0,000687331	0,00316043	0,002309321	0,001033363
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 12

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении доли отклонения длины шатуна ($K_{ш}$) 12-ти цилиндрического двигателя при 500 мин⁻¹

Доля отклонения шатуна $K_{ш}$	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1%	1,05303E-05	1,0615E-05	1,03276E-05	9,88178E-06	9,83676E-06	2,46787E-05	0,000290014	0,000398968	2,58542E-05	3,11595E-05	9,43127E-06	9,81056E-06
2%	2,5173E-05	2,55686E-05	2,46174E-05	2,31623E-05	2,29775E-05	9,53471E-05	0,000678203	0,001089083	6,75486E-05	7,92248E-05	2,01811E-05	2,27189E-05
3%	4,61856E-05	4,70824E-05	4,50982E-05	4,21015E-05	4,17299E-05	0,000215631	0,001234989	0,002124754	0,00013018	0,000149349	3,51094E-05	4,10714E-05
4%	7,35564E-05	7,51442E-05	7,17585E-05	6,66894E-05	6,60819E-05	0,000385427	0,001960056	0,003505226	0,000213674	0,000241469	5,4209E-05	6,48588E-05
5%	0,000107274	0,000109742	0,000104587	9,69164E-05	9,60216E-05	0,000604635	0,002853091	0,005229759	0,000317961	0,000355527	7,74731E-05	9,40719E-05
	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.

Таблица 13

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении доли отклонения длины шатуна ($K_{ш}$) 4-х цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля отклонения шатуна $K_{ш}$	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
0%	0	0	0	0
1%	0,000119933	0,000102956	0,000119933	0,000102956
2%	0,000336953	0,000298135	0,000336953	0,000298135
3%	0,000669104	0,000601791	0,000669104	0,000601791
4%	0,001116127	0,001013695	0,001116127	0,001013695
5%	0,001677772	0,001533621	0,001677772	0,001533621
	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 14

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении доли отклонения длины шатуна ($K_{ш}$) 6-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля отклонения шатуна $K_{ш}$	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0
1%	2,84395E-05	6,91346E-05	2,76252E-05	0,000258526	9,2613E-05	6,16198E-05
2%	7,94745E-05	0,000221287	6,69583E-05	0,000747174	0,000257146	0,000166776
3%	0,00016026	0,000461026	0,000125541	0,001496809	0,00051137	0,000334369

4%	0,000270714	0,000788129	0,000203322	0,002506828	0,000855075	0,000564254
5%	0,000410756	0,001202379	0,000300247	0,003776634	0,001288056	0,000856292
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 15

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении доли отклонения длины шатуна ($K_{ш}$) 12-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля отклонения шатуна $K_{ш}$	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1%	1,89869E-05	2,82959E-05	2,79535E-05	1,4278E-05	3,24332E-06	2,18872E-06	0,00025298	0,000271094	5,74471E-05	5,18109E-05	3,5532E-06	1,80381E-06
2%	3,70607E-05	0,000113049	0,000104	4,4391E-05	1,12289E-05	1,0104E-05	0,000624527	0,000693075	0,000174986	0,000135079	1,14077E-05	6,21876E-06
3%	6,13008E-05	0,000254617	0,0002285	9,11091E-05	2,49403E-05	2,63151E-05	0,001165222	0,001311917	0,000356412	0,000258096	2,7368E-05	2,16087E-05
4%	9,16921E-05	0,000452837	0,000401291	0,000154357	4,43497E-05	5,07979E-05	0,001874757	0,002127231	0,000601551	0,000420692	5,13941E-05	4,79217E-05
5%	0,00012822	0,000707548	0,000622212	0,000234062	6,94299E-05	8,35286E-05	0,002752833	0,003138632	0,000910232	0,000622698	8,34464E-05	8,5107E-05
	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.

Таблица 16

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении массы поршня (K_{mn}) 1-го цилиндра у 4-х цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Доля отклонения массы поршня (K_{mn})	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
0%	0	0	0	0
1%	2,23681E-05	2,03019E-05	2,04248E-05	2,14996E-05
2%	2,35279E-05	1,98891E-05	1,96411E-05	2,22846E-05
3%	2,48117E-05	1,96E-05	1,89812E-05	2,31936E-05
4%	2,62194E-05	1,94347E-05	1,8445E-05	2,42266E-05
5%	2,77512E-05	1,93933E-05	1,80327E-05	2,53836E-05
	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 17

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении массы поршня (K_{mn}) 1-го цилиндра у 6-ти цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Доля отклонения массы поршня (K_{mn})	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0

1%	9,09168E-06	6,46884E-06	1,19916E-05	3,67923E-05	3,6984E-05	1,27889E-05
2%	1,04388E-05	5,66217E-06	1,40215E-05	3,50502E-05	4,2716E-05	1,41097E-05
3%	1,20798E-05	5,4388E-06	1,63747E-05	3,36016E-05	4,90313E-05	1,57541E-05
4%	1,40145E-05	5,79872E-06	1,90512E-05	3,24464E-05	5,59299E-05	1,77221E-05
5%	1,6243E-05	6,74193E-06	2,20511E-05	3,15847E-05	6,34118E-05	2,00139E-05
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 18

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении массы поршня (K_{mn}) 1-го цилиндра у 12-ти цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Доля отклонения массы поршня (K_{mn})	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1%	3,49998E-06	2,10792E-06	1,5165E-06	2,81414E-06	3,2177E-06	3,8248E-06	6,48962E-05	5,53635E-05	4,13103E-06	6,03878E-06	3,86303E-06	1,26039E-06
2%	5,11855E-06	2,15191E-06	9,46487E-07	3,4832E-06	4,29882E-06	4,32248E-06	5,94331E-05	5,57231E-05	3,24557E-06	6,98711E-06	5,04246E-06	5,69704E-07
3%	7,12503E-06	2,36602E-06	5,30593E-07	4,27715E-06	5,56343E-06	5,22424E-06	5,43573E-05	5,62529E-05	2,51443E-06	8,06015E-06	6,40528E-06	2,83702E-07
4%	9,51942E-06	2,75026E-06	2,68813E-07	5,19597E-06	7,01154E-06	6,53009E-06	4,96688E-05	5,69529E-05	1,9376E-06	9,25789E-06	7,95151E-06	4,02384E-07
5%	1,23017E-05	3,30463E-06	1,61148E-07	6,23968E-06	8,64315E-06	8,24003E-06	4,53676E-05	5,78231E-05	1,51508E-06	1,05803E-05	9,68113E-06	9,25752E-07

	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.
--	----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------

Таблица 19

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении массы поршня (K_{mn}) 1-го цилиндра у 4-х цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля отклонения массы поршня (K_{mn})	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
0%	0	0	0	0
1%	0,000133711	8,80219E-05	6,36142E-05	0,000105494
2%	0,000409822	0,000319994	0,000269363	0,000355203
3%	0,000846638	0,000712404	0,000635552	0,000765616
4%	0,001444157	0,001265254	0,00116218	0,001336734
5%	0,002202382	0,001978544	0,001849247	0,002068556
	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 20

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении массы поршня (K_{mn}) 1-го цилиндра у 6-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля отклонения массы поршня (K_{mn})	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0
1%	0,000203241	0,000304347	0,000268534	0,000150025	0,000511438	0,000222329
2%	0,000779974	0,001359847	0,00094853	0,000648847	0,001760872	0,00084509
3%	0,001737437	0,003171296	0,002047584	0,001527948	0,003766284	0,00188733
4%	0,003075629	0,005738692	0,003565697	0,002787327	0,006527676	0,003349049
5%	0,004794551	0,009062037	0,005502868	0,004426985	0,010045046	0,005230247
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 21

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении массы поршня (K_{mn}) 1-го цилиндра у 12-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Доля отклонения массы поршня (K_{mn})	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0%	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1%	0,000340423	0,000121472	9,12111E-05	8,49E-05	0,000139501	0,000266337	0,000120738	0,000170026	6,89242E-05	0,000124497	0,000163304	0,000184571

2%	0,001176 471	0,000462 904	0,000381 629	0,000330 797	0,000515 802	0,001053 776	0,000692 538	0,000514 253	0,000333 862	0,000402 149	0,000560 448	0,000885 197
3%	0,002515 239	0,001024 82	0,000871 78	0,000738 538	0,001129 915	0,002364 91	0,001766 288	0,001079 051	0,000798 787	0,000841 42	0,001195 277	0,002110 294
4%	0,004356 727	0,001807 221	0,001561 663	0,001308 122	0,001981 839	0,004199 739	0,003341 99	0,001864 422	0,001463 698	0,001442 312	0,002067 791	0,003859 862
5%	0,006700 934	0,002810 105	0,002451 278	0,002039 55	0,003071 575	0,006558 262	0,005419 643	0,002870 365	0,002328 596	0,002204 823	0,003177 991	0,006133 901
	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.

Таблица 22

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении угла ($\Delta\varphi$) кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 4-х цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Угол отклонения кривошипа 1-го цилиндра ($\Delta\varphi$) [град]	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
0	0	0	0	0
0,5	0,000733681	0,001343218	0,008372919	0,001434115
1	0,00344476	0,005984616	0,034987029	0,005115301
2	0,014787249	0,025198262	0,142306737	0,019199918
3	0,033892421	0,057601338	0,320545976	0,042106301
4	0,06059661	0,103120638	0,568204075	0,07365756

	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.
--	----------------	----------------	----------------	----------------

Таблица 23

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении угла ($\Delta\varphi$) кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 6-ти цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Угол отклонения кривошипа 1-го цилиндра ($\Delta\varphi$) [град]	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,00029433	0,000281826	0,001028478	0,010105978	0,001211442	0,000264403
1	0,001374316	0,001317959	0,004491108	0,042709295	0,00413216	0,001284602
2	0,005879198	0,005642731	0,018776366	0,174661815	0,015173751	0,0055912
3	0,013448542	0,012912433	0,042913889	0,39411874	0,033105262	0,012856757
4	0,024005416	0,02305458	0,076942608	0,699220424	0,057867421	0,023003814
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 24

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах при изменении угла ($\Delta\varphi$) кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 12-ти цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹

Угол отклонения кривошипа 1-го цилиндра ($\Delta\varphi$) [град]	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	9,01088E-05	7,69832E-05	8,12644E-05	8,3973E-05	8,73214E-05	0,000750028	0,011313981	0,000410374	0,000349031	0,00011827	7,93015E-05	7,70927E-05
1	0,000417678	0,000360673	0,000379365	0,000391323	0,000405716	0,003200912	0,048621522	0,001189182	0,001566322	0,000574017	0,000378157	0,000362706
2	0,001777763	0,001542163	0,001620303	0,001669522	0,001724714	0,013280246	0,200416352	0,004066089	0,006619894	0,002496505	0,00162876	0,00155396
3	0,004053517	0,003520834	0,003699579	0,003809496	0,003923059	0,030365865	0,453364994	0,00878394	0,015160683	0,005737698	0,003725489	0,00355046
4	0,007215136	0,006270128	0,006590961	0,006783123	0,006964044	0,054576197	0,805277204	0,015442458	0,02717932	0,010261341	0,006638473	0,00632584
	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.

Таблица 25

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении угла ($\Delta\varphi$) кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 4-х цилиндрического двигателя при 3000 мин⁻¹

Угол отклонения кривошипа 1-го	1 участок (0-180) [МПа]	2 участок (180-360) [МПа]	3 участок (360-540) [МПа]	4 участок (540-720) [МПа]
--------------------------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

цилиндра ($\Delta\varphi$) [град]				
0	0	0	0	0
0,5	0,000970252	0,001046706	0,007785714	0,00117623
1	0,00437833	0,004712048	0,032417389	0,004348088
2	0,018461791	0,01992634	0,131632812	0,016672598
3	0,042060881	0,045609814	0,29634474	0,036874411
4	0,074958983	0,081703333	0,525173304	0,064830854
	4 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 26

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах, при изменении угла ($\Delta\varphi$) кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 6-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Угол отклонения кривошипа 1-го цилиндра ($\Delta\varphi$) [град]	1 участок (0-120) [МПа]	2 участок (120-240) [МПа]	3 участок (240-360) [МПа]	4 участок (360-480) [МПа]	5 участок (480-600) [МПа]	6 участок (600-720) [МПа]
0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,000783485	0,000402239	0,000461329	0,008412033	0,001264345	0,000200441
1	0,003325688	0,001708908	0,002064292	0,035530411	0,004563732	0,00099838
2	0,013627883	0,007038589	0,008713303	0,145272359	0,017343092	0,004427647

3	0,030750622	0,015969296	0,019943322	0,327795703	0,038394125	0,010273789
4	0,054525985	0,028473509	0,035739716	0,581568284	0,067746902	0,018502869
	6 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.

Таблица 27

Расчетные значения суммарного среднеквадратического отклонения по участкам, соответствующим рабочему ходу в цилиндрах при изменении угла ($\Delta\varphi$) кривошипа 1-го цилиндра от нормы у 12-ти цилиндрового двигателя при 3000 мин⁻¹

Угол отклонения кривошипа 1-го цилиндра ($\Delta\varphi$) [град]	1 участок (0-60) [МПа]	2 участок (60-120) [МПа]	3 участок (120-180) [МПа]	4 участок (180-240) [МПа]	5 участок (240-300) [МПа]	6 участок (300-360) [МПа]	7 участок (360-420) [МПа]	8 участок (420-480) [МПа]	9 участок (480-540) [МПа]	10 участок (540-600) [МПа]	11 участок (600-660) [МПа]	12 участок (660-720) [МПа]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	0,00046149	6,0547E-06	0,000166934	0,000188688	5,3865E-05	0,000268255	0,009225901	0,000113147	0,000474398	0,000199511	4,90191E-05	0,000201896
1	0,001954863	2,49837E-05	0,000684487	0,00079305	0,000240744	0,001172217	0,039530155	0,000312294	0,002079374	0,000963557	0,00022228	0,000971237
2	0,007996291	0,000103041	0,002777874	0,003218242	0,001007706	0,00491529	0,162786352	0,001120191	0,008728773	0,004172385	0,000942423	0,004257433
3	0,018005561	0,000234973	0,00628939	0,007209815	0,002284976	0,011270562	0,368284223	0,00249764	0,020020701	0,009557575	0,002143655	0,009905365
4	0,031854902	0,000421485	0,011226122	0,012700566	0,004056987	0,020273936	0,654401848	0,004476363	0,036018717	0,01704048	0,003806449	0,017950944

	6 цилиндр р.х.	12 цилиндр р.х.	2 цилиндр р.х.	8 цилиндр р.х.	4 цилиндр р.х.	10 цилиндр р.х.	1 цилиндр р.х.	7 цилиндр р.х.	5 цилиндр р.х.	11 цилиндр р.х.	3 цилиндр р.х.	9 цилиндр р.х.
--	----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------	----------------------	-----------------------	----------------------	----------------------

Таблица 28

Результаты расчета колебаний частоты вращения коленчатого вала с отклонением, заключающимся в снижении давления в 1-м цилиндре на 5%

ПКВ, град	ТΣ, МПа 5%	Ср. знач. ТΣ 5%, Мпа	Мкр, Нм	Мср, Нм	dM/df	ΔM, Н.м	ΔM/Мср	dw/dt	dn/df	Δn+n', мин-1	n, мин ⁻¹
0	0,048959 614	0,1396679 03	43,552732 19	124,24360 26	60,870405 46	- 80,690870 38	- 0,6494569 44	- 66,584 99521	-0,211946801	- 1,0597340 07	461,09483 33
5	0,393079 783	0,1396679 03	349,66980 46	124,24360 26	61,223414 49	225,42620 2	1,8143888 09	186,01 8598	0,592116088	1,9008464 32	464,05541 37
10	0,694507 603		617,80928 13		53,627895 34	493,56567 88	3,9725641 28	407,28 36022	1,296425066	8,3829717 6	470,53753 91
15	0,895465 107		796,57393 49		35,752930 72	672,33033 24	5,4113879 38	554,79 77329	1,765977524	17,212859 38	479,36742 67
20	0,949500 433		844,64184 02		9,6135810 45	720,39823 76	5,7982722 87	594,46 27065	1,892235163	26,674035 19	488,82860 25
25	0,916834 205		815,58312 5		- 5,8117430 3	691,33952 24	5,5643872 85	570,48 38549	1,815908043	35,753575 41	497,90814 27
30	0,833394 118		741,35778 93		- 14,845067 14	617,11418 67	4,9669695 17	509,23 41298	1,620943948	43,858295 15	506,01286 25
35	0,726283 539		646,07602 43		- 19,056353	521,83242 17	4,2000747 8	430,60 89293	1,370671951	50,711654 9	512,86622 22

40	0,611544 04		544,00784 42		- 20,413636 02	419,76424 16	3,3785581 95	346,38 36725	1,102574405	56,224526 93	518,37909 42
45	0,496313 366		441,50273 19		- 20,501022 47	317,25912 93	2,5535248 71	261,79 78651	0,83332919	60,391172 88	522,54574 02
50	0,384857 956		342,35596		- 19,829354 37	218,11235 74	1,7555218 37	179,98 33142	0,572905166	63,255698 71	525,41026 6
55	0,277548 489		246,89727 19		- 19,091737 63	122,65366 93	0,9872030 97	101,21 21191	0,322168453	64,866540 98	527,02110 83
60	0,173364 376		154,21878 79		- 18,535696 79	29,975185 33	0,2412613 99	24,735 11021	0,078734368	65,260212 81	527,41478 01
65	0,069822 632		62,111731 78		- 18,421411 22	- 62,131870 79	- 0,5000810 46	- 51,270 36428	-0,163198776	64,444218 93	526,59878 62
70	- 0,035866 924		- 31,905941 26		- 18,803534 61	- 156,14954 38	- 1,2568014 82	- 128,85 24535	-0,410150445	62,393466 71	524,54803 4
75	- 0,145135 09		- 129,10701 78		- 19,440215 31	- 253,35062 04	- 2,0391441 9	- 209,06 14436	-0,665463805	59,066147 69	521,22071 5
80	- 0,259423 757		- 230,77415 43		- 20,333427 29	- 355,01775 69	- 2,8574328 94	- 292,95 57647	-0,932507949	54,403607 94	516,55817 53
85	- 0,378299 348		- 336,52165 52		- 21,149500 19	- 460,76525 78	- 3,7085632 44	- 380,21 71465	-1,210269788	48,352259	510,50682 63

90	- 0,496106 014		- 441,31827 84		- 20,959324 64	- 565,56188 1	- 4,5520402 6	- 466,69 3877	-1,485534003	40,924588 98	503,07915 63
95	- 0,600346 907		- 534,04727 23		- 18,545798 77	- 658,29087 49	- 5,2983884 98	- 543,21 25659	-1,729100761	32,279085 18	494,43365 25
100	- 0,666782 145		- 593,14569 87		- 11,819685 28	- 717,38930 13	- 5,7740542 48	- 591,97 97737	-1,884331735	22,857426 5	485,01199 38
105	- 0,661236 793		- 588,21275 07		0,9865895 92	- 712,45635 33	- 5,7343504 1	- 587,90 91729	-1,8713746	13,500553 5	475,65512 08
110	- 0,542895 884		- 482,94088 43		21,054373 28	- 607,18448 69	- 4,8870483 01	- 501,04 02783	-1,594862087	5,5262430 68	467,68081 04
115	- 0,293029 851		- 260,66894 09		44,454388 69	- 384,91254 34	- 3,0980471 87	- 317,62 4531	-1,011031137	0,4710873 82	462,62565 47
120	0,049168 533		43,738579 58		60,881504 09	- 80,505023	- 0,6479611 13	- 66,431 6365	-0,211458645	- 0,5862058 43	461,56836 15
125	0,393265 671		349,83516 41		61,219316 9	225,59156 15	1,8157197 38	186,15 50504	0,59255043	2,3765463 05	464,53111 36
130	0,694614 567		617,90443 26		53,613853 71	493,66083 01	3,9733299 73	407,36 21198	1,296674995	8,8599212 8	471,01448 86
135	0,895522 058		796,62459 62		35,744032 7	672,38099 36	5,4117956 95	554,83 95379	1,766110593	17,690474 25	479,84504 16
140	0,949508 665		844,64916 29		9,6049133 44	720,40556 03	5,7983312 25	594,46 87491	1,892254397	27,151746 23	489,30631 35

145	0,916795 386		815,54859 27		- 5,8201140 42	691,30499 01	5,5641093 45	570,45 53592	1,815817338	36,230832 92	498,38540 02
150	0,833310 191		741,28313 07		- 14,853092 39	617,03952 81	4,9663686 12	509,17 25226	1,620747846	44,334572 15	506,48913 95
155	0,726156 629		645,96313 02		- 19,064000 1	521,71952 76	4,1991661 28	430,51 57706	1,370375417	51,186449 24	513,34101 65
160	0,611376 372		543,85869 24		- 20,420887 55	419,61508 98	3,3773577 16	346,26 05945	1,102182635	56,697362 41	518,85192 97
165	0,496107 192		441,31932 62		- 20,507873 25	317,07572 36	2,5520486 93	261,64 65213	0,832847448	60,861599 65	523,01616 7
170	0,384615 507		342,14028 58		- 19,835808 08	217,89668 32	1,7537859 39	179,80 53428	0,572338665	63,723292 98	525,87786 03
175	0,277271 947		246,65127 03		- 19,097803 1	122,40766 77	0,9852231 03	101,00 9122	0,321522293	65,330904 44	527,48547 18
180	0,173055 867		153,94434 87		- 18,541384 31	29,700746 14	0,2390525 19	24,508 64676	0,078013512	65,720972	527,87553 93
185	0,069484 768		61,811179 76		- 18,426633 79	- 62,432422 82	- 0,5025001 01	- 51,518 37568	-0,163988221	64,901030 89	527,05559 82
190	- 0,036228 948		- 32,227984 79		- 18,807832 91	- 156,47158 74	- 1,2593935 15	- 129,11 81994	-0,410996341	62,846049 19	525,00061 65

195	- 0,145512 866		- 129,44307 39		- 19,443017 82	- 253,68667 65	- 2,0418490 06	- 209,33 87524	-0,666346507	59,514316 65	521,66888 4
200	- 0,259805 405		- 231,11365 49		- 20,334116 21	- 355,35725 75	- 2,8601654 34	- 293,23 5916	-0,933399699	54,847318 16	517,00188 55
205	- 0,378669 144		- 336,85061 29		- 21,147391 59	- 461,09421 55	- 3,7112109 27	- 380,48 85978	-1,211133846	48,791648 93	510,94621 62
210	- 0,496443 908		- 441,61885 76		- 20,953648 93	- 565,86246 01	- 4,5544595 33	- 466,94 19107	-1,48632352	41,360031 33	503,51459 86
215	- 0,600627 933		- 534,29726 35		- 18,535681 19	- 658,54086 61	- 5,3004006 04	- 543,41 88552	-1,729757401	32,711244 33	494,86581 16
220	- 0,666975 718		- 593,31789 51		- 11,804126 32	- 717,56149 77	- 5,7754402 06	- 592,12 18678	-1,884784035	23,287324 15	485,44189 15
225	- 0,661305 898		- 588,27422 41		1,0087341 99	- 712,51782 67	- 5,7348451 91	- 587,95 98999	-1,871536069	13,929643 8	476,08421 11
230	- 0,542796 144		- 482,85215 86		21,084413 1	- 607,09576 12	- 4,8863341 74	- 500,96 7063	-1,594629035	5,9564986 27	468,11106 59
235	- 0,292714 369		- 260,38829 98		44,492771 78	- 384,63190 23	- 3,0957883 9	- 317,39 29498	-1,010293991	0,9050286 74	463,05959 6
240	0,049830 303		44,327266 22		60,943113 19	- 79,916336 36	- 0,6432229 48	- 65,945 8604	-0,20991237	- 0,1445331 78	462,01003 41

245	0,394283 692		350,74075 95		61,282698 66	226,49715 69	1,8230086 08	186,90 23353	0,594929113	2,8301123 88	464,98467 97
250	0,696072 748		619,20157 85		53,692163 8	494,95797 59	3,9837703 16	408,43 25067	1,300082145	9,3305231 14	471,48509 04
255	0,897518 555		798,40060 93		35,839806 16	674,15700 67	5,4260903	556,30 50795	1,770775561	18,184400 92	480,33896 82
260	0,952157 637		847,00559 45		9,7209970 29	722,76199 19	5,8172974 46	596,41 3244	1,898443922	27,676620 53	489,83118 78
265	0,920229 162		818,60315 75		- 5,6804873 87	694,35955 5	5,5886946 33	572,97 59441	1,823840616	36,795823 61	498,95039 09
270	0,837681 659		745,17183 33		- 14,686264 84	620,92823 08	4,9976676 29	512,38 14265	1,630962113	44,950634 17	507,10520 15
275	0,731641 941		650,84266 84		- 18,865832 98	526,59906 59	4,2384400 88	434,54 22984	1,383192264	51,866595 49	514,02116 28
280	0,618177 997		549,90917 61		- 20,186698 46	425,66557 35	3,4260562 69	351,25 33703	1,118075148	57,456971 23	519,61153 85
285	0,504457 329		448,74731 15		- 20,232372 92	324,50370 9	2,6118343 5	267,77 59925	0,852358177	61,718762 12	523,87332 94
290	0,394779 743		351,18202 9		- 19,513056 5	226,93842 65	1,8265602 55	187,26 64648	0,596088174	64,699202 99	526,85377 03
295	0,289552 808		257,57588 73		- 18,721228 34	133,33228 47	1,0731521 14	110,02 39655	0,350217455	66,450290 26	528,60485 76

300	0,187795 406		167,05611 88		- 18,103953 71	42,812516 2	0,3445852 77	35,328 29888	0,112453563	67,012558 08	529,16712 54
305	0,087063 827		77,448886 36		- 17,921446 48	- 46,794716 21	- 0,3766368 27	- 38,614 3555	-0,122913415	66,397991	528,55255 83
310	- 0,015399 654		- 13,698984 75		- 18,229574 22	- 137,94258 73	- 1,1102590 75	- 113,82 83237	-0,362327114	64,586355 44	526,74092 27
315	- 0,121014 29		- 107,65001 18		- 18,790205 42	- 231,89361 44	- 1,8664430 97	- 191,35 54177	-0,609103727	61,540836 8	523,69540 41
320	- 0,231259 428		- 205,72016 86		- 19,614031 36	- 329,96377 12	- 2,6557807 75	- 272,28 15607	-0,866699858	57,207337 51	519,36190 48
325	- 0,345841 194		- 307,64803 51		- 20,385573 3	- 431,89163 77	- 3,4761680 18	- 356,39 10327	-1,134428849	51,535193 27	513,68976 06
330	- 0,459439 806		- 408,70132 3		- 20,210657 58	- 532,94492 56	- 4,2895160 36	- 439,77 88145	-1,399860626	44,535890 14	506,69045 74
335	- 0,560238 532		- 498,36828 75		- 17,933392 9	- 622,61189 01	- 5,0112189 05	- 513,77 0759	-1,635384499	36,358967 64	498,51353 49
340	- 0,625199 531		- 556,15528 33		- 11,557399 15	- 680,39888 59	- 5,4763293 38	- 561,45 57922	-1,787170803	27,423113 63	489,57768 09
345	- 0,621935 256		- 553,25150 04		0,5807565 81	- 677,49510 3	- 5,4529576 49	- 559,05 96305	-1,779543577	18,525395 74	480,67996 31

350	- 0,511583 666		- 455,08664 8		19,632970 47	- 579,33025 06	- 4,6628577 94	- 478,05 5346	-1,521698713	10,916902 18	473,07146 95
355	- 0,276234 068		- 245,72800 94		41,871727 73	- 369,97161 2	- 2,9777920 5	- 305,29 54801	-0,971786516	6,0579695 96	468,21253 69
360	0,047103 929		41,901981 21		57,525998 12	- 82,341621 36	- 0,6627433 5	- 67,947 17219	-0,216282749	4,9765558 51	467,13112 32
365	0,372076 997		330,98647 27		57,816898 29	206,74287 01	1,6640121 97	170,60 13697	0,543041485	7,6917632 73	469,84633 06
370	0,656610 981		584,09779 26		50,622263 98	459,85419	3,7012303 29	379,46 53458	1,207876731	13,731146 93	475,88571 42
375	0,845960 488		752,53638 46		33,687718 41	628,29278 2	5,0569427 24	518,45 85528	1,650306223	21,982678 04	484,13724 54
380	0,895938 922		796,99542 4		8,8918078 82	672,75182 14	5,4147803 79	555,14 55399	1,767084629	30,818101 19	492,97266 85
385	0,863608 103		768,23507 61		- 5,7520695 78	643,99147 36	5,1832968 48	531,41 28969	1,691541216	39,275807 27	501,43037 46
390	0,783112 253		696,62882 91		- 14,321249 4	572,38522 65	4,6069593 5	472,32 44078	1,503456555	46,793090 04	508,94765 74
395	0,680208 574		605,08937 27		- 18,307891 29	480,84577 01	3,8701853 47	396,78 73087	1,263014298	53,108161 53	515,26272 88
400	0,570095 797		507,13696		- 19,590482 54	382,89335 74	3,0817953 56	315,95 83265	1,005727439	58,136798 72	520,29136 6

405	0,459445 296		408,70620 67		- 19,686150 66	284,46260 41	2,2895553 43	234,73 46241	0,747184146	61,872719 45	524,02728 68
410	0,352292 538		313,38692 19		- 19,063856 95	189,14331 93	1,5223586 2	156,07 84628	0,496813597	64,356787 44	526,51135 47
415	0,248910 57		221,42199 66		- 18,392985 06	97,178394 02	0,7821601 43	80,190 27269	0,255253781	65,633056 34	527,78762 37
420	0,148251 596		131,87935 11		- 17,908529 1	7,6357485 31	0,0614578 81	6,3009 14551	0,020056451	65,733338 6	527,88790 59
425	0,047840 019		42,556780 79		- 17,864514 06	- 81,686821 79	- 0,6574730 62	- 67,406 84059	-0,214562819	64,660524 5	526,81509 18
430	- 0,055091 908		- 49,007803 41		- 18,312916 84	- 173,25140 6	- 1,3944493 11	- 142,96 46747	-0,455071078	62,385169 12	524,53973 64
435	- 0,161947 897		- 144,06309 37		- 19,011058 06	- 268,30669 63	- 2,1595212 2	- 221,40 29914	-0,704748205	58,861428 09	521,01599 54
440	- 0,274143 545		- 243,86835 46		- 19,961052 18	- 368,11195 71	- 2,9628242 38	- 303,76 09185	-0,966901851	54,026918 84	516,18148 61
445	- 0,391222 518		- 348,01764 79		- 20,829858 67	- 472,26125 05	- 3,8010910 88	- 389,70 34813	-1,240465756	47,824590 06	509,97915 74
450	- 0,507510 73		- 451,46350 87		- 20,689172 16	- 575,70711 13	- 4,6336962 17	- 475,06 55813	-1,512181988	40,263680 12	502,41824 74

455	- 0,610496 547		- 543,07603 1		- 18,322504 47	- 667,31963 36	- 5,3710583 06	- 550,66 29733	-1,752816164	31,499599 3	493,65416 66
460	- 0,675923 986		- 601,27795 6		- 11,640385	- 725,52155 86	- 5,8395083 82	- 598,69 04005	-1,905692342	21,971137 59	484,12570 49
465	- 0,669589 684		- 595,64318 56		1,1269540 88	- 719,88678 82	- 5,7941557 81	- 594,04 06655	-1,890891763	12,516678 77	474,67124 61
470	- 0,550620 937		- 489,81281 71		21,166073 69	- 614,05641 97	- 4,9423584 55	- 506,71 09026	-1,61291226	4,4521174 7	466,60668 48
475	- 0,300196 858		- 267,04445 57		44,553672 28	- 391,28805 83	- 3,1493618 2	- 322,88 55181	-1,027777393	- 0,6867694 96	461,46779 78
480	0,042800 626		38,073915 63		61,023674 27	- 86,169686 95	- 0,6935543 17	- 71,106 0392	-0,226337744	- 1,8184582 14	460,33610 91
485	0,387483 74		344,69176 42		61,323569 72	220,44816 16	1,7743220 34	181,91 07876	0,57904051	1,0767443 37	463,23131 16
490	0,689511 968		613,36534 19		53,734715 53	489,12173 93	3,9367961 74	403,61 65245	1,284752385	7,5005062 62	469,65507 36
495	0,891150 612		792,73591 3		35,874114 23	668,49231 04	5,3804968 35	551,63 06501	1,755896378	16,279988 15	478,43455 55
500	0,945905 168		841,44362 07		9,7415415 34	717,20001 81	5,7725307 64	591,82 35798	1,883834555	25,699160 92	487,85372 82
505	0,913919 073		812,98992 74		- 5,6907386 58	688,74632 48	5,5435154 05	568,34 39839	1,809096616	34,744644	496,89921 13

510	0,831071 353		739,29153 94		- 14,739677 61	615,04793 68	4,9503388 83	507,52 90888	1,61551663	42,822227 15	504,97679 45
515	0,724438 72		644,43493 91		- 18,971320 05	520,19133 65	4,1868661 7	429,25 47284	1,366361391	49,654034 11	511,80860 14
520	0,610082 517		542,70772 5		- 20,345442 83	418,46412 24	3,3680939 2	345,31 0832	1,099159445	55,149831 33	517,30439 86
525	0,495211 887		440,52289 5		- 20,436965 99	316,27929 24	2,5456384 54	260,98 93173	0,8307555	59,303608 84	521,45817 61
530	0,384057 314		341,64373 71		- 19,775831 58	217,40013 45	1,7497893 66	179,39 55976	0,571034405	62,158780 86	524,31334 82
535	0,276994 879		246,4048		- 19,047787 43	122,16119 74	0,9832393 37	100,80 57381	0,320874901	63,763155 37	525,91772 27
540	0,172997 113		153,89208 38		- 18,502543 23	29,648481 24	0,2386318 54	24,465 51849	0,07787623	64,152536 52	526,30710 38
545	0,069598 322		61,912194 07		- 18,395977 95	- 62,331408 51	- 0,5016870 67	- 51,435 02006	-0,163722892	63,333922 05	525,48848 94
550	- 0,035966 602		- 31,994611 29		- 18,781361 07	- 156,23821 39	- 1,2575151 61	- 128,92 56228	-0,41038335	61,282005 31	523,43657 26
555	- 0,145163 152		- 129,13198 08		- 19,427473 9	- 253,37558 34	- 2,0393451 1	- 209,08 20427	-0,665529374	57,954358 43	520,10892 57

560	- 0,259408 737		- 230,76079 3		- 20,325762 43	- 355,00439 55	- 2,8573253 53	- 292,94 47391	-0,932472853	53,291994 17	515,44656 15
565	- 0,378228 787		- 336,45888 68		- 21,139618 77	- 460,70248 94	- 3,7080580 39	- 380,16 53508	-1,210104918	47,241469 58	509,39603 69
570	- 0,495980 692		- 441,20679 69		- 20,949582 02	- 565,45039 95	- 4,5511429 79	- 466,60 1884	-1,48524118	39,815263 68	501,96983 1
575	- 0,600162 289		- 533,88304 26		- 18,535249 14	- 658,12664 52	- 5,2970666 62	- 543,07 70458	-1,728669387	31,171916 74	493,32648 41
580	- 0,666574 066		- 592,96059 89		- 11,815511 27	- 717,20420 15	- 5,7725644 35	- 591,82 70319	-1,883845543	21,752689 03	483,90725 63
585	- 0,660960 453		- 587,96692 9		0,9987339 97	- 712,21053 15	- 5,7323718 63	- 587,70 63242	-1,870728912	12,399044 47	474,55361 18
590	- 0,542551 025		- 482,63410 95		21,066563 89	- 606,87771 21	- 4,8845791 61	- 500,78 71319	-1,594056296	4,4287629 91	466,58333 03
595	- 0,292622 302		- 260,30640 02		44,465541 86	- 384,55000 27	- 3,0951292 04	- 317,32 53674	-1,010078869	- 0,6216313 54	461,53293 6
600	0,049706 616		44,217239 47		60,904727 93	- 80,026363 11	- 0,6441085 21	- 66,036 65295	-0,210201372	- 1,6726382 16	460,48192 91
605	0,393870 09		350,37283 42		61,231118 94	226,12923 16	1,8200472 85	186,59 87283	0,593962701	1,2971752 92	463,45174 26
610	0,695281 992		618,49815 02		53,625063 21	494,25454 76	3,9781086 3	407,85 20473	1,298234484	7,7883477 13	469,94291 5

615	0,896248 575		797,27088		35,754545 95	673,02727 74	5,4169974 42	555,37 28424	1,767808156	16,627388 49	478,78195 58
620	0,950289 612		845,34386 58		9,6145971 68	721,10026 32	5,8039226 83	595,04 20084	1,894079139	26,097784 19	488,25235 15
625	0,917624 583		816,28621 71		- 5,8115297 49	692,04261 45	5,5700462 65	571,06 40367	1,817754821	35,186558 29	497,34112 56
630	0,834181 291		742,05803 01		- 14,845637 39	617,81442 76	4,9726055 49	509,81 19589	1,622783237	43,300474 48	505,45504 18
635	0,727063 495		646,76984 53		- 19,057636 96	522,52624 27	4,2056591 4	431,18 14608	1,372494377	50,162946 36	512,31751 37
640	0,612312 484		544,69142 42		- 20,415684 22	420,44782 16	3,3840601 28	346,94 77533	1,104369931	55,684796 02	517,83936 33
645	0,497063 196		442,16975 34		- 20,504334 17	317,92615 08	2,5588935 3	262,34 82821	0,835081224	59,860202 13	522,01476 94
650	0,385582 947		343,00088 64		- 19,833773 39	218,75728 38	1,7607126 59	180,51 54985	0,574599163	62,733197 95	524,88776 53
655	0,278241 557		247,51380 07		- 19,097417 14	123,27019 82	0,9921653 56	101,72 08702	0,32378786	64,352137 25	526,50670 46
660	0,174021 008		154,80290 45		- 18,542179 25	30,559301 92	0,2459627 8	25,217 11518	0,080268638	64,753480 44	526,90804 78
665	0,070434 758		62,656257 14		- 18,429329 47	- 61,587345 44	- 0,4956983 23	- 50,821 02946	-0,161768498	63,944637 95	526,09920 53

670	- 0,035303 737		- 31,404949 78		- 18,812241 38	- 155,64855 24	- 1,2527691 5	- 128,43 90423	-0,408834515	61,900465 38	524,05503 27
675	- 0,144629 167		- 128,65696 66		- 19,450403 36	- 252,90056 92	- 2,0355218 61	- 208,69 00675	-0,664281677	58,579056 99	520,73362 43
680	- 0,258981 02		- 230,38031 09		- 20,344668 87	- 354,62391 35	- 2,8542629 65	- 292,63 07706	-0,93147346	53,921689 69	516,07625 7
685	- 0,377924 304		- 336,18802 94		- 21,161543 7	- 460,43163 2	- 3,7058779 89	- 379,94 18431	-1,20939347	47,874722 35	510,02928 97
690	- 0,495803 769		- 441,04941 21		- 20,972276 54	- 565,29301 47	- 4,5498762 35	- 466,47 20122	-1,484827785	40,450583 42	502,60515 07
695	- 0,600122 03		- 533,84722 99		- 18,559563 55	- 658,09083 25	- 5,2967784 16	- 543,04 74937	-1,728575319	31,807706 82	493,96227 41
700	- 0,666639 498		- 593,01880 56		- 11,834315 14	- 717,26240 82	- 5,7730329 23	- 591,87 50632	-1,883998431	22,387714 67	484,54228 2
705	- 0,661178 775		- 588,16113 98		0,9715331 51	- 712,40474 24	- 5,7339350 09	- 587,86 65843	-1,871239036	13,031519 48	475,18608 68
710	- 0,542925 106		- 482,96687 87		21,038852 22	- 607,21048 13	- 4,8872575 22	- 501,06 17285	-1,594930365	5,0568676 61	467,21143 5
715	- 0,293176 388		- 260,79929 51		44,433516 73	- 385,04289 77	- 3,0990963 69	- 317,73 20975	-1,011373532	1,33227E- 13	462,15456 73

720	0,048959 614		43,552732 19		60,870405 46	- 80,690870 38	- 0,6494569 44	- 66,584 99521	-0,211946801	- 1,0597340 07	461,09483 33
-----	-----------------	--	-----------------	--	-----------------	----------------------	----------------------	----------------------	--------------	----------------------	-----------------

Таблица 29

Результаты расчета суммарной тангенциальной силы и колебаний частоты вращения коленчатого вала для двигателя
IVECOF4HE9687P*J101

φ, град	T ₁ , МПа	T ₂ , МПа	T ₃ , МПа	T ₄ , МПа	T ₅ , МПа	T ₆ , МПа	ΣT, МПа	Мкр, Нм	dM/df	ΔM	dw/dt	Δω, рад/с	ω, рад/с	n, мин ⁻¹
0	0,000	-0,0685	0,1309	0,0000	-0,0822	0,0590	0,039	21,97	46,14	-55,6	-45,86	-0,0478	-0,0478	780,744
5	-0,019	-0,0699	0,1172	0,5557	-0,0903	0,0568	0,550	308,49	57,30	230,9	190,58	0,19852	0,15075	782,64
10	-0,038	-0,0695	0,1040	1,0183	-0,0984	0,0535	0,970	543,95	47,09	466,4	384,87	0,40091	0,55165	786,471
15	-0,054	-0,0672	0,0913	1,2871	-0,1066	0,0493	1,200	672,68	25,75	595,1	491,10	0,51156	1,06322	791,358
20	-0,068	-0,0626	0,0792	1,3251	-0,1151	0,0444	1,203	674,45	0,35	596,9	492,56	0,51308	1,5763	796,26
25	-0,079	-0,0557	0,0668	1,2468	-0,1242	0,0391	1,094	613,44	-12,20	535,9	442,21	0,46064	2,03693	800,661
30	-0,086	-0,0466	0,0551	1,1159	-0,1343	0,0336	0,938	525,85	-17,52	448,3	369,93	0,38535	2,42228	804,343
35	-0,089	-0,0354	0,0444	0,9720	-0,1463	0,0279	0,774	434,01	-18,37	356,5	294,15	0,30641	2,72869	807,27
40	-0,088	-0,0224	0,0351	0,8354	-0,1610	0,0222	0,622	348,62	-17,08	271,1	223,69	0,23301	2,9617	809,497
45	-0,083	-0,0080	0,0253	0,7144	-0,1795	0,0166	0,486	272,46	-15,23	194,9	160,84	0,16754	3,12925	811,097
50	-0,075	0,0072	0,0162	0,6111	-0,2034	0,0110	0,368	206,09	-13,27	128,5	106,07	0,11049	3,23974	812,153
55	-0,064	0,0227	0,0077	0,5250	-0,2342	0,0055	0,263	147,46	-11,73	69,9	57,70	0,0601	3,29984	812,727
60	-0,051	0,0376	0,0000	0,4541	-0,2738	0,0000	0,167	93,80	-10,73	16,3	13,42	0,01398	3,31381	812,861
65	-0,036	0,0512	-0,0072	0,3962	-0,3245	-0,0055	0,074	41,65	-10,43	-35,9	-29,62	-0,0309	3,28296	812,566
70	-0,021	0,0628	-0,0143	0,3491	-0,3882	-0,0111	-0,022	-12,55	-10,84	-90,1	-74,34	-0,0774	3,20552	811,826
75	-0,006	0,0717	-0,0206	0,3106	-0,4670	-0,0169	-0,128	-71,63	-11,82	-149,2	-123,10	-0,1282	3,0773	810,601
80	0,009	0,0773	-0,0267	0,2789	-0,5621	-0,0229	-0,247	-138,25	-13,32	-215,8	-178,07	-0,1855	2,89181	808,829
85	0,022	0,0793	-0,0330	0,2523	-0,6729	-0,0293	-0,381	-213,83	-15,12	-291,4	-240,43	-0,2505	2,64136	806,436
90	0,034	0,0775	-0,0393	0,2297	-0,7945	-0,0360	-0,529	-296,60	-16,55	-374,1	-308,74	-0,3216	2,31976	803,363

95	0,043	0,0718	-0,0455	0,2098	-0,9135	-0,0431	-0,677	-379,76	-16,63	-457,3	-377,36	-0,3931	1,92667	799,608
100	0,050	0,0624	-0,0509	0,1919	-1,0007	-0,0505	-0,797	-447,03	-13,45	-524,6	-432,87	-0,4509	1,47577	795,3
105	0,056	0,0499	-0,0566	0,1754	-1,0046	-0,0582	-0,838	-470,08	-4,61	-547,6	-451,89	-0,4707	1,00505	790,802
110	0,059	0,0348	-0,0616	0,1599	-0,8555	-0,0661	-0,730	-409,20	12,18	-486,7	-401,65	-0,4184	0,58666	786,805
115	0,060	0,0182	-0,0657	0,1451	-0,5055	-0,0741	-0,422	-236,76	34,49	-314,3	-259,35	-0,2702	0,3165	784,224
120	0,059	0,0000	-0,0685	0,1309	0,0000	-0,0822	0,039	21,97	51,75	-55,6	-45,86	-0,0478	0,26873	783,767
125	0,057	-0,0190	-0,0699	0,1172	0,5557	-0,0903	0,551	308,65	57,34	231,1	190,71	0,19866	0,46738	785,665
130	0,054	-0,0377	-0,0695	0,1040	1,0183	-0,0984	0,970	543,95	47,06	466,4	384,87	0,40091	0,86829	789,496
135	0,049	-0,0542	-0,0672	0,0913	1,2871	-0,1066	1,200	672,68	25,75	595,1	491,10	0,51156	1,37985	794,383
140	0,044	-0,0681	-0,0626	0,0792	1,3251	-0,1151	1,203	674,45	0,35	596,9	492,56	0,51308	1,89294	799,285
145	0,039	-0,0787	-0,0557	0,0668	1,2468	-0,1242	1,094	613,44	-12,20	535,9	442,21	0,46064	2,35357	803,686
150	0,034	-0,0856	-0,0466	0,0551	1,1159	-0,1343	0,938	525,85	-17,52	448,3	369,93	0,38535	2,73892	807,368
155	0,028	-0,0886	-0,0354	0,0444	0,9720	-0,1463	0,774	434,01	-18,37	356,5	294,15	0,30641	3,04533	810,295
160	0,022	-0,0876	-0,0224	0,0351	0,8354	-0,1610	0,622	348,62	-17,08	271,1	223,69	0,23301	3,27834	812,522
165	0,017	-0,0828	-0,0080	0,0253	0,7144	-0,1795	0,486	272,46	-15,23	194,9	160,84	0,16754	3,44588	814,122
170	0,011	-0,0747	0,0072	0,0162	0,6111	-0,2034	0,368	206,09	-13,27	128,5	106,07	0,11049	3,55638	815,178
175	0,005	-0,0637	0,0227	0,0077	0,5250	-0,2342	0,263	147,46	-11,73	69,9	57,70	0,0601	3,61648	815,752
180	0,000	-0,0505	0,0376	0,0000	0,4541	-0,2738	0,167	93,80	-10,73	16,3	13,42	0,01398	3,63045	815,886
185	0,000	-0,0360	0,0512	-0,0072	0,3962	-0,3245	0,080	44,74	-9,81	-32,8	-27,07	-0,0282	3,60225	815,616
190	-0,006	-0,0207	0,0628	-0,0143	0,3491	-0,3882	-0,017	-9,41	-10,83	-87,0	-71,75	-0,0747	3,52751	814,902
195	-0,011	-0,0055	0,0717	-0,0206	0,3106	-0,4670	-0,122	-68,39	-11,80	-145,9	-120,42	-0,1254	3,40208	813,704
200	-0,017	0,0090	0,0773	-0,0267	0,2789	-0,5621	-0,241	-134,86	-13,29	-212,4	-175,27	-0,1826	3,21951	811,96
205	-0,023	0,0222	0,0793	-0,0330	0,2523	-0,6729	-0,375	-210,26	-15,08	-287,8	-237,49	-0,2474	2,97212	809,596
210	-0,029	0,0336	0,0775	-0,0393	0,2297	-0,7945	-0,522	-292,83	-16,52	-370,4	-305,63	-0,3184	2,65376	806,554
215	-0,036	0,0431	0,0718	-0,0455	0,2098	-0,9135	-0,670	-375,80	-16,59	-453,3	-374,09	-0,3897	2,26408	802,831
220	-0,043	0,0505	0,0624	-0,0509	0,1919	-1,0007	-0,790	-442,88	-13,42	-520,4	-429,44	-0,4473	1,81674	798,557
225	-0,050	0,0556	0,0499	-0,0566	0,1754	-1,0046	-0,831	-465,78	-4,58	-543,3	-448,34	-0,467	1,34972	794,095














230	-0,058	0,0586	0,0348	-0,0616	0,1599	-0,8555	-0,722	-404,78	12,20	-482,3	-398,00	-0,4146	0,93513	790,134
235	-0,066	0,0596	0,0182	-0,0657	0,1451	-0,5055	-0,414	-232,26	34,50	-309,8	-255,64	-0,2663	0,66884	787,59
240	-0,074	0,0590	0,0000	-0,0685	0,1309	0,0000	0,047	26,50	51,75	-51,0	-42,12	-0,0439	0,62497	787,171
245	-0,082	0,0568	-0,0190	-0,0699	0,1172	0,5557	0,559	313,20	57,34	235,7	194,46	0,20256	0,82753	789,106
250	-0,090	0,0535	-0,0377	-0,0695	0,1040	1,0183	0,978	548,50	47,06	471,0	388,63	0,40482	1,23235	792,974
255	-0,098	0,0493	-0,0542	-0,0672	0,0913	1,2871	1,208	677,28	25,76	599,7	494,90	0,51552	1,74787	797,899
260	-0,107	0,0444	-0,0681	-0,0626	0,0792	1,3251	1,211	679,20	0,38	601,7	496,48	0,51717	2,26503	802,84
265	-0,115	0,0391	-0,0787	-0,0557	0,0668	1,2468	1,103	618,53	-12,14	541,0	446,41	0,46501	2,73005	807,283
270	-0,124	0,0336	-0,0856	-0,0466	0,0551	1,1159	0,948	531,55	-17,40	454,0	374,64	0,39025	3,1203	811,012
275	-0,134	0,0279	-0,0886	-0,0354	0,0444	0,9720	0,786	440,71	-18,17	363,2	299,68	0,31217	3,43247	813,994
280	-0,146	0,0222	-0,0876	-0,0224	0,0351	0,8354	0,636	356,85	-16,77	279,3	230,48	0,24009	3,67256	816,288
285	-0,161	0,0166	-0,0828	-0,0080	0,0253	0,7144	0,505	282,86	-14,80	205,3	169,43	0,17648	3,84904	817,974
290	-0,180	0,0110	-0,0747	0,0072	0,0162	0,6111	0,391	219,45	-12,68	141,9	117,10	0,12198	3,97103	819,14
295	-0,203	0,0055	-0,0637	0,0227	0,0077	0,5250	0,294	164,73	-10,94	87,2	71,95	0,07494	4,04597	819,856
300	-0,234	0,0000	-0,0505	0,0376	0,0000	0,4541	0,207	116,04	-9,74	38,5	31,77	0,03309	4,07906	820,172
305	-0,274	-0,0055	-0,0360	0,0512	-0,0072	0,3962	0,125	70,03	-9,20	-7,5	-6,20	-0,0065	4,0726	820,11
310	-0,324	-0,0111	-0,0207	0,0628	-0,0143	0,3491	0,041	23,18	-9,37	-54,4	-44,86	-0,0467	4,02587	819,664
315	-0,388	-0,0169	-0,0055	0,0717	-0,0206	0,3106	-0,049	-27,45	-10,13	-105,0	-86,64	-0,0902	3,93562	818,802
320	-0,467	-0,0229	0,0090	0,0773	-0,0267	0,2789	-0,151	-84,92	-11,49	-162,5	-134,06	-0,1396	3,79598	817,467
325	-0,562	-0,0293	0,0222	0,0793	-0,0330	0,2523	-0,271	-151,70	-13,36	-229,2	-189,17	-0,1971	3,59893	815,585
330	-0,673	-0,0360	0,0336	0,0775	-0,0393	0,2297	-0,407	-228,42	-15,34	-306,0	-252,47	-0,263	3,33594	813,072
335	-0,795	-0,0431	0,0431	0,0718	-0,0455	0,2098	-0,558	-313,07	-16,93	-390,6	-322,33	-0,3358	3,00017	809,864
340	-0,913	-0,0505	0,0505	0,0624	-0,0509	0,1919	-0,710	-398,10	-17,01	-475,6	-392,50	-0,4089	2,59132	805,958
345	-1,001	-0,0582	0,0556	0,0499	-0,0566	0,1754	-0,835	-467,90	-13,96	-545,4	-450,09	-0,4688	2,12247	801,478
350	-1,005	-0,0661	0,0586	0,0348	-0,0616	0,1599	-0,879	-492,79	-4,98	-570,3	-470,63	-0,4902	1,63223	796,795
355	-0,856	-0,0741	0,0596	0,0182	-0,0657	0,1451	-0,772	-433,01	11,96	-510,6	-421,30	-0,4389	1,19337	792,602
360	-0,505	-0,0822	0,0590	0,0000	-0,0685	0,1309	-0,466	-261,43	34,32	-339,0	-279,71	-0,2914	0,90201	789,818

365	0,000	-0,0903	0,0568	-0,0190	-0,0699	0,1172	-0,005	-2,90	51,71	-80,4	-66,38	-0,0691	0,83286	789,157
370	0,000	-0,0984	0,0535	-0,0377	-0,0695	0,1040	-0,048	-26,96	-4,81	-104,5	-86,24	-0,0898	0,74303	788,299
375	0,490	-0,1066	0,0493	-0,0542	-0,0672	0,0913	0,403	225,99	50,59	148,4	122,50	0,1276	0,87063	789,518
380	0,846	-0,1151	0,0444	-0,0681	-0,0626	0,0792	0,723	405,59	35,92	328,1	270,70	0,28198	1,15261	792,212
385	1,012	-0,1242	0,0391	-0,0787	-0,0557	0,0668	0,859	481,81	15,24	404,3	333,59	0,34749	1,50011	795,532
390	1,022	-0,1343	0,0336	-0,0856	-0,0466	0,0551	0,844	473,08	-1,75	395,5	326,39	0,33999	1,8401	798,781
395	0,939	-0,1463	0,0279	-0,0886	-0,0354	0,0444	0,741	415,72	-11,47	338,2	279,06	0,29068	2,13078	801,558
400	0,819	-0,1610	0,0222	-0,0876	-0,0224	0,0351	0,606	339,60	-15,22	262,1	216,25	0,22526	2,35604	803,71
405	0,694	-0,1795	0,0166	-0,0828	-0,0080	0,0253	0,466	261,04	-15,71	183,5	151,42	0,15773	2,51376	805,217
410	0,579	-0,2034	0,0110	-0,0747	0,0072	0,0162	0,335	188,09	-14,59	110,6	91,22	0,09503	2,60879	806,125
415	0,480	-0,2342	0,0055	-0,0637	0,0227	0,0077	0,218	122,32	-13,15	44,8	36,95	0,03849	2,64728	806,493
420	0,398	-0,2738	0,0000	-0,0505	0,0376	0,0000	0,111	62,50	-11,96	-15,0	-12,41	-0,0129	2,63435	806,369
425	0,332	-0,3245	-0,0055	-0,0360	0,0512	-0,0072	0,010	5,72	-11,36	-71,8	-59,27	-0,0617	2,57262	805,779
430	0,280	-0,3882	-0,0111	-0,0207	0,0628	-0,0143	-0,092	-51,46	-11,44	-129,0	-106,45	-0,1109	2,46173	804,72
435	0,239	-0,4670	-0,0169	-0,0055	0,0717	-0,0206	-0,200	-111,98	-12,10	-189,5	-156,39	-0,1629	2,29883	803,163
440	0,207	-0,5621	-0,0229	0,0090	0,0773	-0,0267	-0,319	-178,67	-13,34	-256,2	-211,42	-0,2202	2,07859	801,059
445	0,182	-0,6729	-0,0293	0,0222	0,0793	-0,0330	-0,452	-253,18	-14,90	-330,7	-272,91	-0,2843	1,79432	798,343
450	0,163	-0,7945	-0,0360	0,0336	0,0775	-0,0393	-0,596	-333,98	-16,16	-411,5	-339,58	-0,3537	1,44059	794,964
455	0,148	-0,9135	-0,0431	0,0431	0,0718	-0,0455	-0,739	-414,49	-16,10	-492,0	-406,02	-0,4229	1,01765	790,923
460	0,136	-1,0007	-0,0505	0,0505	0,0624	-0,0509	-0,854	-478,63	-12,83	-556,2	-458,95	-0,4781	0,53958	786,355
465	0,125	-1,0046	-0,0582	0,0556	0,0499	-0,0566	-0,889	-498,30	-3,93	-575,8	-475,18	-0,495	0,04461	781,626
470	0,116	-0,8555	-0,0661	0,0586	0,0348	-0,0616	-0,774	-433,94	12,87	-511,5	-422,06	-0,4397	-0,395	777,426
475	0,107	-0,5055	-0,0741	0,0596	0,0182	-0,0657	-0,460	-258,05	35,18	-335,6	-276,93	-0,2885	-0,6835	774,67
480	0,099	0,0000	-0,0822	0,0590	0,0000	-0,0685	0,007	3,97	52,40	-73,6	-60,71	-0,0632	-0,7467	774,065
485	0,091	0,5557	-0,0903	0,0568	-0,0190	-0,0699	0,524	293,74	57,95	216,2	178,40	0,18584	-0,5609	775,841
490	0,082	1,0183	-0,0984	0,0535	-0,0377	-0,0695	0,949	531,85	47,62	454,3	374,89	0,39051	-0,1704	779,572
495	0,074	1,2871	-0,1066	0,0493	-0,0542	-0,0672	1,183	663,14	26,26	585,6	483,22	0,50336	0,33296	784,381

500	0,066	1,3251	-0,1151	0,0444	-0,0681	-0,0626	1,190	667,19	0,81	589,6	486,57	0,50684	0,8398	789,224
505	0,058	1,2468	-0,1242	0,0391	-0,0787	-0,0557	1,086	608,65	-11,71	531,1	438,26	0,45652	1,29632	793,585
510	0,051	1,1159	-0,1343	0,0336	-0,0856	-0,0466	0,933	523,34	-17,06	445,8	367,87	0,3832	1,67952	797,246
515	0,043	0,9720	-0,1463	0,0279	-0,0886	-0,0354	0,772	433,00	-18,07	355,5	293,32	0,30554	1,98506	800,166
520	0,035	0,8354	-0,1610	0,0222	-0,0876	-0,0224	0,622	348,58	-16,88	271,0	223,66	0,23298	2,21803	802,391
525	0,028	0,7144	-0,1795	0,0166	-0,0828	-0,0080	0,489	274,07	-14,90	196,5	162,17	0,16893	2,38696	804,005
530	0,023	0,6111	-0,2034	0,0110	-0,0747	0,0072	0,374	209,86	-12,84	132,3	109,18	0,11373	2,5007	805,092
535	0,017	0,5250	-0,2342	0,0055	-0,0637	0,0227	0,272	152,54	-11,46	75,0	61,88	0,06446	2,56516	805,708
540	0,011	0,4541	-0,2738	0,0000	-0,0505	0,0376	0,178	100,03	-10,50	22,5	18,56	0,01933	2,58449	805,893
545	0,006	0,3962	-0,3245	-0,0055	-0,0360	0,0512	0,087	48,79	-10,25	-28,8	-23,73	-0,0247	2,55978	805,656
550	0,000	0,3491	-0,3882	-0,0111	-0,0207	0,0628	-0,008	-4,55	-10,67	-82,1	-67,74	-0,0706	2,48921	804,982
555	0,000	0,3106	-0,4670	-0,0169	-0,0055	0,0717	-0,107	-60,06	-11,10	-137,6	-113,55	-0,1183	2,37093	803,852
560	-0,006	0,2789	-0,5621	-0,0229	0,0090	0,0773	-0,225	-126,37	-13,26	-203,9	-168,27	-0,1753	2,19566	802,178
565	-0,011	0,2523	-0,6729	-0,0293	0,0222	0,0793	-0,359	-201,52	-15,03	-279,1	-230,28	-0,2399	1,95578	799,886
570	-0,017	0,2297	-0,7945	-0,0360	0,0336	0,0775	-0,506	-283,90	-16,48	-361,4	-298,26	-0,3107	1,64509	796,917
575	-0,022	0,2098	-0,9135	-0,0431	0,0431	0,0718	-0,654	-366,74	-16,57	-444,3	-366,61	-0,3819	1,2632	793,269
580	-0,028	0,1919	-1,0007	-0,0505	0,0505	0,0624	-0,774	-434,14	-13,48	-511,7	-422,24	-0,4398	0,82337	789,067
585	-0,034	0,1754	-1,0046	-0,0582	0,0556	0,0499	-0,815	-457,20	-4,61	-534,7	-441,26	-0,4596	0,36373	784,675
590	-0,039	0,1599	-0,8555	-0,0661	0,0586	0,0348	-0,707	-396,62	12,12	-474,2	-391,27	-0,4076	-0,0438	780,781
595	-0,044	0,1451	-0,5055	-0,0741	0,0596	0,0182	-0,401	-224,86	34,35	-302,4	-249,54	-0,2599	-0,3038	778,298
600	-0,049	0,1309	0,0000	-0,0822	0,0590	0,0000	0,058	32,75	51,52	-44,8	-36,96	-0,0385	-0,3423	777,93
605	-0,054	0,1172	0,5557	-0,0903	0,0568	-0,0190	0,567	317,85	57,02	240,3	198,30	0,20656	-0,1357	779,903
610	-0,057	0,1040	1,0183	-0,0984	0,0535	-0,0377	0,983	551,07	46,64	473,5	390,75	0,40703	0,27131	783,792
615	-0,059	0,0913	1,2871	-0,1066	0,0493	-0,0542	1,208	677,27	25,24	599,7	494,89	0,51551	0,78682	788,717
620	-0,060	0,0792	1,3251	-0,1151	0,0444	-0,0681	1,206	676,10	-0,23	598,6	493,92	0,5145	1,30132	793,633
625	-0,059	0,0668	1,2468	-0,1242	0,0391	-0,0787	1,091	611,84	-12,85	534,3	440,89	0,45926	1,76058	798,021
630	-0,056	0,0551	1,1159	-0,1343	0,0336	-0,0856	0,929	520,83	-18,20	443,3	365,80	0,38104	2,14162	801,661

635	-0,050	0,0444	0,9720	-0,1463	0,0279	-0,0886	0,759	425,59	-19,05	348,0	287,20	0,29917	2,44079	804,52
640	-0,043	0,0351	0,8354	-0,1610	0,0222	-0,0876	0,601	337,02	-17,71	259,5	214,11	0,22303	2,66383	806,651
645	-0,034	0,0253	0,7144	-0,1795	0,0166	-0,0828	0,460	258,09	-15,78	180,5	148,99	0,15519	2,81902	808,133
650	-0,022	0,0162	0,6111	-0,2034	0,0110	-0,0747	0,338	189,61	-13,70	112,1	92,48	0,09633	2,91535	809,054
655	-0,009	0,0077	0,5250	-0,2342	0,0055	-0,0637	0,231	129,73	-11,98	52,2	43,06	0,04486	2,96021	809,482
660	0,006	0,0000	0,4541	-0,2738	0,0000	-0,0505	0,135	75,83	-10,78	-1,7	-1,42	-0,0015	2,95873	809,468
665	0,021	-0,0072	0,3962	-0,3245	-0,0055	-0,0360	0,044	24,55	-10,25	-53,0	-43,72	-0,0455	2,91318	809,033
670	0,036	-0,0143	0,3491	-0,3882	-0,0111	-0,0207	-0,049	-27,59	-10,43	-105,1	-86,76	-0,0904	2,82281	808,17
675	0,051	-0,0206	0,3106	-0,4670	-0,0169	-0,0055	-0,149	-83,49	-11,18	-161,0	-132,88	-0,1384	2,6844	806,847
680	0,064	-0,0267	0,2789	-0,5621	-0,0229	0,0090	-0,260	-145,90	-12,48	-223,4	-184,38	-0,1921	2,49233	805,012
685	0,075	-0,0330	0,2523	-0,6729	-0,0293	0,0222	-0,386	-216,45	-14,11	-294,0	-242,59	-0,2527	2,23962	802,598
690	0,083	-0,0393	0,2297	-0,7945	-0,0360	0,0336	-0,524	-293,61	-15,43	-371,2	-306,27	-0,319	1,92059	799,55
695	0,088	-0,0455	0,2098	-0,9135	-0,0431	0,0431	-0,662	-370,90	-15,46	-448,4	-370,05	-0,3855	1,53512	795,867
700	0,089	-0,0509	0,1919	-1,0007	-0,0505	0,0505	-0,771	-432,37	-12,29	-509,9	-420,77	-0,4383	1,09682	791,679
705	0,086	-0,0566	0,1754	-1,0046	-0,0582	0,0556	-0,803	-450,06	-3,54	-527,6	-435,37	-0,4535	0,64331	787,346
710	0,079	-0,0616	0,1599	-0,8555	-0,0661	0,0586	-0,686	-384,57	13,10	-462,1	-381,33	-0,3972	0,24609	783,551
715	0,068	-0,0657	0,1451	-0,5055	-0,0741	0,0596	-0,372	-208,75	35,16	-286,3	-236,25	-0,2461	2,2E-16	781,2
720	0,054	-0,0685	0,1309	0,0000	-0,0822	0,0590	0,093	52,37	46,14	-25,2	-20,77	-0,0216	-0,0216	780,744

Основные технические характеристики двигателя IVECOF4HE9687P*J101

		F4HE9687					
		B*J101	E*J101	P*J101	A*J100		
		Type					
		Compression ratio					
		17.5 : 1					
		Max. output	kW (HP)	129 175	123 170	175 240	154 210
			rpm	2200	2200	2200	2200
		Max. torque	Nm (kgm)	753 75.3	747 74.7	1020 102	950 95
			rpm	1400	1400	1500	1400
		Loadless engine idling	rpm	-			
		Loadless engine peak rpm	rpm	-			
		Bore x stroke		104 x 132			
		Displacement		6728			
		TURBOCHARGING		with intercooler			
		Turbocharger type		HOLSET HX35			
		LUBRICATION		Forced by gear pump, relief valve single action oil filter			
		Oil pressure (warm engine)					
		- idling	bar				
		- peak rpm	bar	0.7 3.5			
		COOLING		By liquid Through belt			
		Water pump control					
		Thermostat		81 ± 2			
		- start of opening	°C				
		FILLING					
15W40 ACEA E3		engine sump	liters	15			
		engine sump + filter	liters	15 + 1			

Основные технические характеристики МОТОР-ТЕСТЕР МТ PRO

Количество аналоговых каналов: 4 + 4 + 1

- 4 общего назначения полоса 250 КГц

- 4 общего назначения полоса 1 МГц, соседние пары каналов могут работать в дифф. режиме (адаптер зажигания)

- 1 синхронизации со встроенным детектором импульсов

Количество одновременно включенных каналов: 1...9

Входное активное сопротивление канала: не менее 1 МОм

Количество поддиапазонов у каждого аналогового канала: 12 (+/-0.1 - +/-500 В)

Дополнительные усилители в каналах 6 и 8 (x1, x2, x5, x10) для усиления как разности так одного канала

Разрядность АЦП: 12 бит

Максимальная частота дискретизации в режиме осциллографа / самописца: 6 МГц

Интерфейс подключение к ПК: Ethernet 100М

Гальваническая развязка: да

Напряжение питания: 5-25 Вольт / 350 мА

Основные технические характеристики мультимарочного сканера Delphi DS150E

- Работа с легковыми и грузовыми автомобилями с бензиновыми и дизельными двигателями (в том числе с двигателем IVECOF4HE9687P*J101);
- Работа по протоколам OBD2/EOBD;
- Поддержка всех систем автомобиля - двигатель, коробка передач, панель приборов, иммобилайзер, тормозная система, SRS, климат контроль, кузовная электроника и пр.;
- Считывание идентификационных данных автомобиля;
- Автоматическая диагностика всех систем;
- Тестирование систем;
- Считывание, расшифровка и удаление кодов неисправностей;
- Просмотр параметров в режиме реального времени;
- Управление исполнительными механизмами;
- Кодирование и адаптация электронных блоков;

Коррекция и сброс межсервисных интервалов.