

На правах рукописи



НОВИКОВ ВИКТОР АЛЕКСАНДРОВИЧ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ
КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

2.4.7. «Турбомашины и поршневые двигатели»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

МОСКВА - 2023

Работа выполнена на кафедре «Энергетическое машиностроение» инженерной академии в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования "Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы" (РУДН)

Научный руководитель: **Ощепков Петр Платонович**,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Энергетическое машиностроение»
инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский
университет дружбы народов имени Патриса
Лумумбы»

Официальные оппоненты: **Гребенников Александр Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор, 410008, г.
Саратов, ул. Миротворцева, 4/8, кв. 41;

Григорьев Михаил Владимирович,
кандидат технических наук, доцент, доцент
кафедры «Эксплуатация автомобильного
транспорта и автосервис» Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования «Московский
автомобильно-дорожный государственный
технический университет» (МАДИ)

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет» (ВолгГТУ)

Защита состоится «__» декабря 2023 года в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ПДС 2022.013 при ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН) по адресу: 115093, г. Москва, Подольское шоссе д.8, корп.5, аудитория 431.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Электронная версия автореферата и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте РУДН <https://www.rudn.ru/science/dissovet> и на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>).

Автореферат разослан «__» ноября 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 2022.013



Агасиева С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Своевременное диагностирование и прогнозирование неисправностей является одним из самых важных аспектов безотказной эксплуатации автотранспортных средств, так как отказы приводят к простоям техники, что влечет большие финансовые расходы у автовладельцев. 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 предпринимаемого исследования.

Степень разработанности темы. Транспортные средства, оснащенные электронным блоком управления, при определении неисправностей, сообщают водителю только информацию о наличии отклонений в работе ДВС. 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 потребует 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. Целью исследований является разработка алгоритма определения технического состояния двигателя при установленном режиме работы по неравномерности вращения коленчатого вала.

Для достижения указанной цели требуется решение следующих задач:

- определить косвенные показатели и режимы для проведения диагностики ДВС косвенным методом.

- провести теоретическое и расчетное обоснование значимости выбранных конструктивных и режимных параметров для оценки технического состояния двигателя по косвенным показателям.

- расчетным экспериментом определить взаимосвязь между неравномерностью частоты вращения коленчатого вала с техническим состоянием ДВС и разработать алгоритм поиска неисправного цилиндра.

- создать экспериментальную установку для проведения экспериментальных исследований по проверке предложенного метода оценки технического состояния двигателя.

- 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 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 влияние отклонения конструктивных и режимных параметров на изменение протекания крутящего момента и частоты вращения.

2. Разработан алгоритм поиска цилиндра с неисправностью 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, отклонение 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, 203811.

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 исследований 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.

Результаты работы доложены на научно-технических конференциях инженерного факультета РУДН в 2012, 2013 гг.; на Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2013», посвященной 100-летию юбилею первого ректора РУДН профессора С.В. Румянцева, Москва, (2013 г.); на Всероссийском семинаре в МГТУ им. Н.Э. Баумана (2014 г.); на Международной научно-практической конференции ФГБОУ ВПО «ВГЛТА». – Воронеж, (2014 г.); на VIII^й Международной научно-практической конференции «Инженерные системы – 2015», (РУДН, 2015 г.); Международной научной конференции «International congress of scientists, Moscow, Russia» (2017 г.); Международной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава, посвященной 125-летию со дня рождения В.С. Немчинова (2019 г.); на заседаниях кафедры теплотехники и тепловых двигателей РУДН, Москва, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016 гг.; на заседаниях департамента машиностроения и приборостроения Инженерной академии РУДН, Москва, 2017, 2018, 2019, 2020 гг.

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 - патенты РФ.

Реализация результатов работы. Материалы исследования и её результаты используются в учебном процессе департамента МиП Инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов» и при подготовке выпускных квалификационных работ бакалавров и магистров. Также полученные результаты учитываются при проектировании ДВС на предприятии ООО «МОТОР КОМ».

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

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование, алгоритм и процесс диагностики технического состояния ДВС по косвенным показателям;
- неравномерность вращения коленчатого вала и её использование для определения технического состояния двигателей внутреннего сгорания.
- результаты стендовых испытаний дизельного двигателя с отключенной подачей топлива в один из цилиндров.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы выполненной диссертационной работы, приведены ее характеристика, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость проведенных исследований.

В первой главе проведен анализ известных методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания, а также приведены преимущества и недостатки рассмотренных методов, рассмотрены современные тенденции по диагностированию с помощью штатных систем управления двигателем.

Исследование проблем по определению технического состояния транспортных средств, а также их узлов и агрегатов исследуются различными организациями, среди которых можно отметить следующие: ФГУП НАМИ, НИИАТ, МГТУ им. Баумана, МАДГТУ (МАДИ), РУДН, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЯГТУ, ТулГУ 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, GeneralMotors, 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: С.В. Гусаков, Н.Н. Патрахальцев, С.Н. Девянин, В.Н. Луканин, Н.А. Иващенко, Л.В. Грехов, В.А. Лашко, А.И. Яманин, А.Н. Гоц, Е.А. Григорьев, С.Н. Ольшевский, А.С. Гребенников и другие.

Анализ выполненных ранее работ позволил сформулировать задачи данного исследования.

Во второй главе проведено теоретическое обоснование влияния конструктивных и режимных параметров, характеризующих неисправности двигателя внутреннего сгорания, на крутящий момент двигателя, проведен анализ влияния этих параметров на тангенциальную силу, а также влияние отклонения тангенциальной силы на неравномерность вращения коленчатого вала двигателя, разработан алгоритм проведения расчетных исследований влияния конструктивных и режимных параметров на колебания тангенциальной силы и неравномерность вращения коленчатого вала.

В ходе анализа установлено, что в качестве косвенных показателей технического состояния двигателей могут быть использованы изменение крутящего момента, связанного с тангенциальной силой, на стационарном режиме работы двигателя, а также мгновенная частота вращения и ее изменение.

Также выбраны режимы для проведения расчетных исследований возможности диагностирования двигателей, а именно режим холостого хода при частоте вращения коленчатого вала 500 мин^{-1} и номинальный режим при частоте вращения 3000 мин^{-1} .

Показана взаимосвязь тангенциальной силы с конструктивными и расчетными параметрами, определяемая формулой 1:

$$T(\varphi) = \frac{((p_r - p_0)\pi D_{\text{ц}}^2/4 + (-m_{\text{пр}}R\omega^2(\cos\varphi + \frac{R}{L}\cos(2\varphi))))}{\cos\beta} \cdot \sin(\varphi + \beta), \quad (1)$$

где T – тангенциальная сила [Н], p_r – давление газов в цилиндре, действующее на поршень [МПа]; p_0 – давление, действующее на поршень со стороны картера [МПа]; $D_{\text{ц}}$ – диаметр цилиндра [м]; $m_{\text{пр}}$ – приведенная масса деталей к поршню [кг]; R – радиуса кривошипа [м]; L – длина шатуна [м]; φ – угол поворота кривошипа [рад];

ω – угловая скорость коленчатого вала [рад/с]; β – угол отклонения шатуна относительно оси цилиндра [рад].

Таким образом, исходя из зависимости (1), выделены наиболее значимые конструктивные и режимные параметры, влияющие на тангенциальную силу:

- снижение давления в цилиндре (доля снижения давления K_{pr});
- неравномерность массы поршневой группы (доля снижения массы K_{mn});
- отклонение длины шатуна от нормы (через $\lambda_k=R/L$);
- отклонение угла между осями кривошипов от номинального ($\Delta\varphi$).

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

Алгоритм расчета влияния отклонений параметров на тангенциальную силу, отнесенную к площади поршня, предполагается следующим.

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

$$P_{\text{откл}} = P_r * (1 - K_{pr}) \quad (2)$$

где $P_{\text{откл}}$ – давление газов в цилиндре, действующее на поршень, при наличии снижения давления в цилиндре [МПа]; K_{pr} – доля снижения давления в цилиндре.

$$P_{\Sigma} = P_{\text{откл}} + P_j \quad (3)$$

$$P_{\text{ш}} = P_{\Sigma} / \cos(\beta) \quad (4)$$

$$T_{\text{откл}} = P_{\text{ш}} * \sin(\varphi + \beta) / F_n \quad (5)$$

где $T_{\text{откл}}$ - удельная тангенциальная сила, с отклонением от нормы [МПа]; P_{Σ} - суммарная сила, действующая на поршень [Н]; P_j – сила инерции деталей, движущихся возвратно-поступательно [Н]; $P_{\text{ш}}$ – сила, действующая вдоль оси шатуна [Н]; F_n - площадь поршня [м²].

При исследовании влияния снижения массы поршневой группы K_{mn} силы инерции с отклонением массы поршня от нормы $P_{j\text{откл}}$ для уравнения (3) определяются по следующей зависимости:

$$P_{j\text{откл}} = P_j * (1 - K_{мп}) \quad (6)$$

где $K_{мп}$ – доля снижения массы поршневой группы.

Таким образом, дальнейший расчет влияния снижения массы поршневой группы K_{pr} на тангенциальную силу определяется по уравнению (7) и далее по уравнениям (4) и (5)

$$P_{\Sigma} = P_{\text{откл}} + P_j * (1 - K_{мп}) \quad (7)$$

Для исследования влияния отклонения длины шатуна L от нормы зададимся следующей зависимостью отклонения угла β шатуна от нормы:

$$\beta_{\text{откл}} = \arcsin\left(\frac{R}{L} * (1 - K_{\text{ш}}) * \sin\varphi\right) \quad (8)$$

где $R/L=\lambda_k$ – отношение радиуса кривошипа к длине шатуна; $K_{\text{ш}}$ – доля отклонения длины шатуна от нормы.

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

$$P_{ш} = P_{\Sigma} / \cos(\beta_{откл}) \quad (9)$$

и

$$T_{откл} = P_{ш} * \sin(\varphi + \beta_{откл}) / F_n \quad (10)$$

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

$$T_{откл} = P_{ш} * \sin(\varphi + \Delta\varphi + \beta) / F_n \quad (11)$$

Приведена возможность оценки влияния каждого параметра по среднеквадратическому отклонению, представляющему собой сумму квадратов разностей суммарной тангенциальной силы при наличии неисправности и суммарной тангенциальной силы исправного двигателя

$$\sigma_{\Sigma\Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (T_{откл}(\varphi) - T_{без\ откл}(\varphi))^2}{k}} \quad (12)$$

где k - число признаков (число единиц совокупности); $T_{без\ откл}$ - удельная тангенциальная сила без отклонений.

Кроме того, в связи с тем, что значения суммарной 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 (12) примет вид:

$$\sigma_{\Sigma\Delta T} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (T_{откл}(\varphi) - T_{cp}(\varphi))^2}{k}} \quad (13)$$

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

$$T_{cp}(\varphi) = \sum_{x=1}^i \frac{T_{откл}(\varphi + \frac{720}{i} \cdot (x-1))}{i} \quad (14)$$

где x - индекс суммирования, i - количество цилиндров.

Также приведена методика расчета влияния отклонений суммарной тангенциальной силы на неравномерность вращения коленчатого вала двигателя, основанная на анализе основного уравнения динамики двигателя:

$$J_{пр} \frac{d\omega}{dt} = T_{\Sigma} \cdot R - M_c \quad (15)$$

где $J_{пр}$ - приведенный момент сил инерции движущихся масс двигателя [кг·м²], T_{Σ} - суммарная удельная тангенциальная сила [МПа], M_c - момент сопротивления [Н·м].

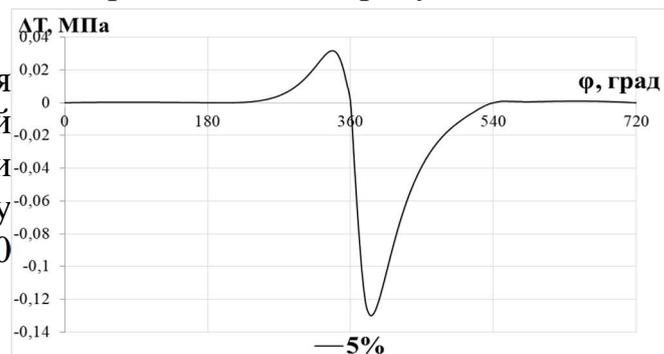
В третьей главе проведен расчетный анализ выявления неисправностей по неравномерности вращения коленчатого вала ДВС, включающий разработку

программы проведения расчетных исследований влияния выбранных конструктивных и режимных параметров на колебания крутящего момента (тангенциальной силы) и мгновенной частоты вращения коленчатого вала для многоцилиндровых ДВС с равномерным чередованием вспышек в разработанной программе (MS Excel).

Исследованы параметры, изменяющиеся в процессе эксплуатации (давление в цилиндре двигателя), и неизменяющиеся (масса поршневой группы, длина шатуна, угол между осями кривошипов). При этом, для неизменяющихся параметров исследовано их влияние на неравномерность тангенциальной силы и частоты вращения в том числе и в пределах допусков на производство (неравномерность массы поршневой группы - 1%, отклонение длины шатуна - 1% и отклонение угла между осями кривошипов - 1°). Это позволило учесть влияние отклонений изготовления на неравномерность T и n , когда двигатель считается исправным.

Исследование влияния изменяющихся параметров для 4-х цилиндрового двигателя при снижении давления в 1-м цилиндре на отклонение суммарной удельной тангенциальной силы от нормы ΔT представлено на рисунке 1.

Рисунок 1. Характер отклонения суммарной удельной тангенциальной силы от нормы с учетом влияния доли снижения давления, составляющей 5% у 4-х цилиндрового двигателя при 500 мин⁻¹.



Результаты расчетных исследований влияния параметров на отклонения удельной тангенциальной силы от нормального значения показали:

- изменение давления в первом цилиндре двигателя от 5% до 40% приводит к увеличению $\sigma_{\Sigma \Delta T}$ от 0,16 до 10,13 МПа для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС на всех исследованных частотах вращения (рисунок 2);

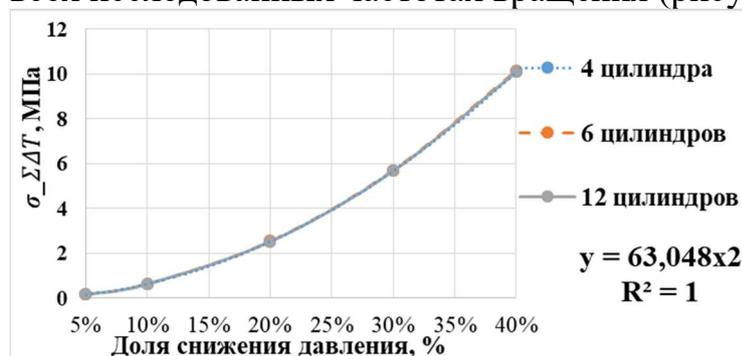


Рисунок 2. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил от доли снижения давления в 1-м цилиндре 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндрового двигателей при 500 мин⁻¹.

- отклонение длины шатуна от нормы для 1-го цилиндра двигателя от 1% до 5% приводит к увеличению $\sigma_{\Sigma \Delta T}$ от 0,0004 до 0,0116 МПа при 500 мин⁻¹ холостого хода и к увеличению $\sigma_{\Sigma \Delta T}$ от 0,0004 до 0,011 МПа 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 первого цилиндра, приводит к росту $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ 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} $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ растет в пределах от 0,0018 до 0,18 МПа;

- отклонение угла между осями кривошипов от номинального для 1-го цилиндра приводит к увеличению $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ 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.

Были получены значения суммарных среднеквадратических отклонений по участкам, соответствующим рабочим ходам цилиндров двигателей. Для 4-х цилиндрового двигателя: 1 уч-к ($0 - 180^{\circ}$ ПКВ)- рабочий ход в 4 цилиндре, 2 уч. ($180-360^{\circ}$ ПКВ) – во 2 цилиндре, 3 уч. ($360-540^{\circ}$ ПКВ) – в 1 цилиндре, 4 уч. ($540-720^{\circ}$ ПКВ)- в 3 цилиндре. Аналогичным образом для 6-ти (порядок работы 1-5-3-6-2-4) и для 12-ти (1-7-5-11-3-9-6-12-2-8-4-10).

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 цилиндровых ДВС показало, что наибольшее значение $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ относится к участкам 3, 4 и 7 соответственно на всех исследованных частотах вращения, что соответствует такту рабочего хода в первом цилиндре этих ДВС (рисунок 3);

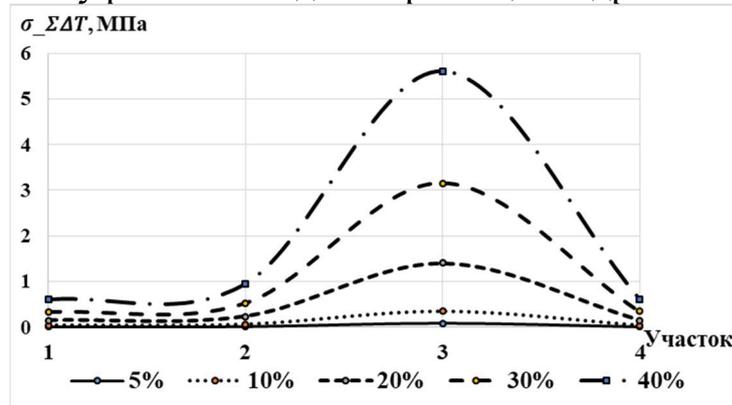


Рисунок 3. Изменение среднеквадратического отклонения суммарных удельных тангенциальных сил по участкам, соответствующим рабочему ходу поршней 4-х цилиндрового двигателя, при доле снижения давления в 1-м цилиндре на 5%, 10%, 20%, 30% и 40% и частоте вращения 500 мин^{-1} .

- 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 колебаниям $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ у 4-х цилиндрового ДВС по участкам, что не позволяет локализовать неисправный цилиндр, у 6-ти цилиндрового ДВС наибольшее значение $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ относится участку 4, соответствующему рабочему ходу в 1-м цилиндре, у 12-ти цилиндрового ДВС- на 8 участок, то есть на следующий по порядку работы после 1-го цилиндра, а именно на участок рабочего хода в 7-м цилиндре;

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

- отклонение угла между осями кривошипов от номинального 1-го для 4-х, 6-ти и 12-ти цилиндровых ДВС показало, что наибольшее значение $\sigma_{\Sigma \Delta t}$ относится к

участкам 3, 4 и 7 соответственно на всех исследованных частотах вращения, что соответствует такту рабочего хода в первом цилиндре этих ДВС.

В ходе проведения расчетных исследований определена зависимость отклонений исследуемых параметров от изменения частоты вращения коленчатого вала, числа цилиндров в двигателе и нагрузки. Наличие или отсутствие влияния приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Влияние исследуемых параметров от различных условий на тангенциальную силу

Исследуемый параметр	Частота вращения	Число цилиндров	Нагрузка
Снижение давления в цилиндре	-	-	-
Неравномерность массы поршневой группы	+	-	-
Отклонение длины шатуна	+	+	+
Отклонения угла между осями кривошипов	+	-	+

где знак «+» влияет, «-» не влияет.

Исходя из того, что отклонения тангенциальной силы приводят к неравномерности частоты вращения коленчатого вала, были получены значения неравномерности мгновенной частоты вращения коленчатого вала за 2 цикла при изменении давления в 1-м цилиндре (рисунок 4 - на 5% снижение давления), изменении длины шатуна и отклонении угла между осями кривошипов от номинального.

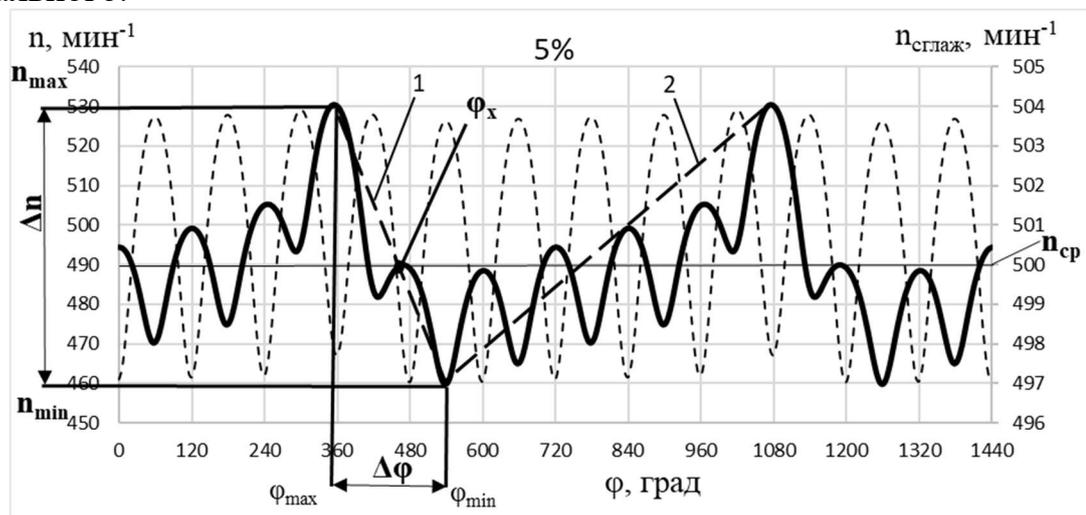


Рисунок 4. Неравномерность частоты вращения коленчатого вала за два цикла работы при изменении давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрического ДВС на 5%, где ---- n мгновенная частота вращения, — $n_{сглаж}$ сглаженная частота, 1 и 2 прямые, проходящая через точки максимального и минимального значения $n_{сглаж}$

Результаты расчетных исследований локализации цилиндра с неисправностью для режима холостого хода при 500 мин⁻¹ показали:

- 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 $\Delta\varphi$ (формула 15);

$$tg = \Delta n / \Delta\varphi \quad (15)$$

- 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.

В ходе расчетных исследований получены зависимости, связывающие отклонения конструктивных и режимных параметров на изменение частоты вращения коленчатого вала. Так влияние изменяющихся параметров для 6-ти цилиндрового ДВС, заключающихся в снижении давления в 1-м цилиндре до 40%, представлено на рисунке 5.

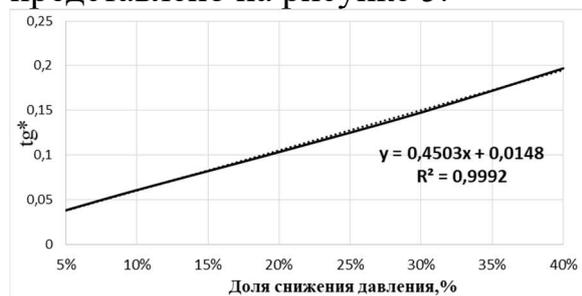


Рисунок 5. Изменение значений показателя наличия неисправности tg^* в зависимости от доли снижения давления в 1-м цилиндре 6-ти цилиндрового ДВС.

В соответствии с полученными данными определено пороговое значение показателя наличия неисправности $tg_{порог} = 0,056$, при превышении которого двигатель необходимо считать неисправным, и составлен алгоритм поиска неисправности, включающий следующие этапы:

1. Сбор информации с установленных на двигателе датчиков для последующего анализа.

2. Расчет мгновенной частоты вращения и предварительная обработка данных.

3. Определение по обработанным данным минимального и максимального значения частоты вращения и углов ПКВ, соответствующих этим частотам.

4. Расчет показателей tg за два цикла.

5. Выборка наибольшего значения показателя tg и сравнение с $tg_{порог}$.

6. Если $tg < tg_{порог}$ двигатель считается исправным, процесс контроля прекращается.

7. При $tg > tg_{порог}$ двигатель считается неисправным.

8. Определяется угол локализации φ_x , соответствующему значению tg .

9. По полученному углу локализации ϕ_x определяется цилиндр с неисправностью.

В четвертой главе приведены экспериментальные исследования разработанной методики, описана экспериментальная установка, разработаны методика и программа экспериментальных исследований, приведены результаты экспериментов по проверке разработанного алгоритма диагностирования с исследованием исправного двигателя и с отключенной подачей топлива, проведено сопоставление расчетных и экспериментальных исследований, а также определены перспективы развития метода оценки протекания рабочих процессов в двигателе по неравномерности частоты вращения коленчатого вала.

На экспериментальной установке, состоящей из двигателя IVECO F4HE9687P*J101, аккумулятора, МОТОР-ТЕСТЕР MTPro; персонального компьютера, штатного датчика положения коленчатого вала; мультимарочного сканера Delphi DS150E, а также блока внесения неисправности, позволяющего отключать форсунку цилиндра, проводились исследования по влиянию технического состояния двигателя на неравномерность вращения коленчатого вала.

По разработанной программе и методике проведены экспериментальные исследования на частоте вращения 800 мин^{-1} и температуре охлаждающей жидкости $85 \text{ }^\circ\text{C}$ исправного и двигателя с неисправностью, у которого не работал один цилиндр. Значение мгновенной частоты вращения определялось штатным датчиком с частотой опроса 6° ПКВ . Алгоритм может быть реализован без установки дополнительных датчиков и без вывода машины из эксплуатации.

По разработанному алгоритму были обработаны экспериментальные данные, которые показали следующее.

Графическое сопоставление результатов, полученных в ходе расчетного эксперимента, со значениями, полученными в ходе реального эксперимента, представлены на рисунке 6, а также результаты сведены в таблицу 2.

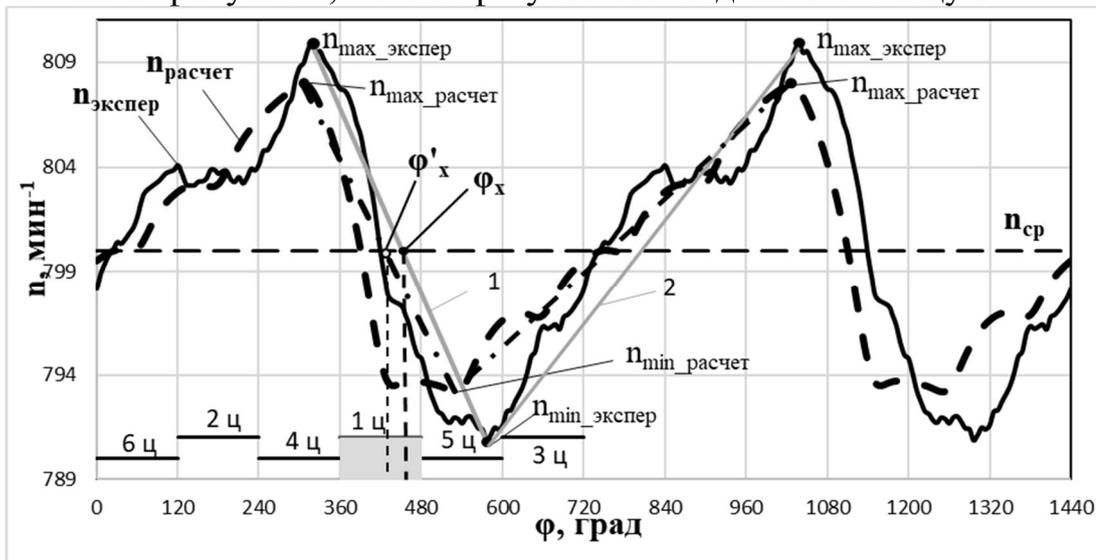


Рисунок 6. — сглаженная частота вращения (эксперимент), --- сглаженная частота вращения (расчет), 1 и 2 прямые, проходящая через точки максимального и минимального значения $n_{\text{сглаж}}$

Таблица 2.

Результаты расчета и 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}	Δtg	tg'_{max}	tg'_{min}	φ'_x , [град]	$tg'_{max}/$ tg'_{min}	$\Delta tg'$	
0,074	0,041	449,6	1,8	0,33	0,065	0,029	415,65	2,24	0,036	1 ц/1 ц

Сопоставив минимальное и максимальное значения tg для эксперимента $\Delta tg = 0,033$, а также полученные расчетным моделированием $\Delta tg' = 0,036$ близки по своей величине, а также отношение tg_{max} к tg_{min} для эксперимента равно 1,8, что позволяет использовать наибольшее значение показателя tg в качестве критерия наличия неисправности. Кроме того, так как 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.

Таким образом, полученные углы φ_x и φ'_x для эксперимента и расчета относятся к участку $360-480^\circ$ 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.

В ходе анализа перспектив развития метода оценки протекания рабочих процессов в двигателе 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; методика позволяет на наиболее информационном 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; 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. Для этого требуется повышение быстродействия систем управления, что в дальнейшем при развитии этих систем может быть реализовано. При этом разработанная методика определения технического состояния ДВС по неравномерности вращения коленчатого вала позволяет использовать сигналы со штатных датчиков положения

коленчатого вала, алгоритм обработки которых задается блокам управления, без вывода техники из эксплуатации.

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; неравномерность массы поршневой группы; отклонение длины шатуна от нормы в интервале; отклонение угла между осями кривошипов от нормы.

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 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.

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 $\Delta\phi$;

- 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 (угол локализации ϕ_x);

- для 6-ти цилиндрического 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%) $tg'_{max} = 0,016$;

- отклонение 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. 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 $\varphi_x = 449,6^\circ$ ПКВ (находится в интервале для первого цилиндра 360-480° 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.

Основные положения диссертации опубликованы в работах: В МБЦ

1. **Новиков В.А.** Некоторые аспекты защиты результатов интеллектуальной деятельности на примере исследования влияния отклонения конструктивных параметров двигателя внутреннего сгорания на неравномерность частоты вращения / В.А. Новиков, И.В. Седов, Ю.В. Богачев // Автомобильная промышленность. -2022. - №1. -С. 27-31.

В изданиях, рекомендованных ВАК:

2. **Новиков, В.А.** Оценка динамической составляющей работы ДВС / С.В. Гусаков, В.А. Новиков, П.П. Ощепков, И.В. Епифанов // Вестник РУДН: Серия «Инженерные исследования». -2013. -№3. -С.26 – 31.

3. **Новиков, В.А.** Математическая модель для исследования возможностей диагностики двигателя внутреннего сгорания по неравномерности вращения коленчатого вала / С.В. Гусаков, В.А. Новиков // Журнал «Приборы и системы. управление, контроль, диагностика». -2014. -№ 4. -С. 8-19.

4. **Новиков, В.А.** О возможностях восстановления давления в цилиндре во время рабочего хода по неравномерности вращения коленчатого вала двигателя / С.В. Гусаков, В.А. Новиков // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». -2014. -№5. -С. 130-130.

5. **Новиков, В.А.** Расчетная оценка возможностей повышения КПД действительного цикла дизеля за счет организации процесса сгорания при постоянном объеме / С.В. Гусаков, В.А. Новиков // Автомобильная промышленность. -2016. -№5. -С. 11-13.

Патенты РФ

6. Устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС: Пат. 137387 Рос. Федерация: МПК: G01P3/00 / С.В. Гусаков, **В.А. Новиков**, А.В. Новиков, Р.О. Камышников // опубл. 10.02.2014; Бюл. № 4.

7. Устройство определения угловой скорости вращения коленчатого вала ДВС: Пат. 156397 Рос. Федерация: МПК: F02B77/00, G01P3/00 / С.В. Гусаков, **В.А. Новиков**, А.В. Новиков, Р.О. Камышников // опубл. 10.11.2015 Бюл. № 31.

8. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 156883 Рос. Федерация: МПК: F02M7/127, F02D41/04 / С.В. Гусаков, **В.А. Новиков**, М.В. Азанов, А.А. Савастенко // опубл. 20.11.2015 Бюл. № 32.

9. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 182134 Рос. Федерация: МПК: F02M7/127, F02D3/04 / П.П. Ощепков, **В.А. Новиков**, Р.О. Камышников, О.В. Камышников, В.Н. Коноплев, В.И. Миролюбов // опубл. 03.08.2018 Бюл. № 22.

10. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 189396 Рос. Федерация: МПК: F02M7/127, F02D41/24 / П.П. Ощепков, **В.А. Новиков**, Р.О. Камышников, О.В. Камышников, В.Н. Коноплев, В.И. Миролюбов, З.Г. Мельников // опубл. 21.05.2019 Бюл. № 15.

11. Устройство для регулирования состава горючей смеси, подаваемой карбюратором: Пат. 203811 Рос. Федерация: МПК: F02M7/127, F02D41/24 / П.П. Ощепков, **В.А. Новиков**, И.Д.А. Моххаммед // опубл. 21.04.2021 Бюл. № 12.

12. Энергетическая установка: Пат. 2803548 Рос. Федерация: МПК: H01M8/14, F02B43/10, F02M21/02, C01B3/04 / **В.А. Новиков**, П.П. Ощепков // опубл. 15.09.2023 Бюл. № 26

Публикации в Web of Science

13. **Novikov, V** Analysis of ways to optimize the operating conditions of an internal combustion engine to reduce its fuel consumption / Gusakov, S.V., Novikov, V., Abu-Nidzhim, R., Kamyshnikov, O.V., Kamyshnikov, R.O., // 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>].

Публикации в сборниках научных трудов и материалах конференций

14. **Новиков, В.А.** Оценка различных методик безразборного диагностирования и определения технической возможности исследования метода диагностирования по неравномерности вращения коленчатого вала двигателя / С.В. Гусаков, В.А. Новиков // 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. -С. 206-209.

15. **Новиков, В.А.** Преимущества и недостатки различных методов диагностирования двигателей внутреннего сгорания / С.В. Гусаков, В.А. Новиков // 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.

16. **Новиков, В.А.** Параметрический анализ математической модели диагностики ДВС по неравномерности вращения коленчатого вала / С.В. Гусаков, В.А. Новиков // 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.

17. **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.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ ПО НЕРАВНОМЕРНОСТИ ВРАЩЕНИЯ КОЛЕНЧАТОГО ВАЛА

Новиков Виктор Александрович (РОССИЯ)

Диссертационное исследование посвящено проблеме диагностирования и прогнозирования возникновения неисправностей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) по косвенным показателям. Научно обоснована возможность использования в качестве косвенных показателей изменение крутящего момента на стационарном режиме работы двигателя и изменение мгновенной частоты вращения. В ходе анализа определен показатель наличия неисправности, определяемый отношением изменения частоты вращения коленчатого вала к продолжительности участка по углу поворота коленчатого вала для прямых, соединяющих точки значений наибольшей и наименьшей частот вращения, полученных обработкой значений мгновенных частот вращения сглаживанием по среднему арифметическому по 25 точкам. Разработан алгоритм поиска цилиндра с неисправностью по косвенным показателям. Для 6-цилиндрового двигателя типа IVECO F4NE9687P

экспериментально подтверждена правомерность разработанного алгоритма локализации неисправности.

DETERMINATION OF TECHNICAL CONDITION OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES BY CRANKSHAFT ROTATION IRREGULARITY

Novikov Viktor A. (RUSSIA)

The research was focused on the problem of diagnosing and predicting the occurrence of malfunctions of internal combustion engines (ICE) by indirect parameters. The variations of torque at steady-state operation of the engine and the irregularity of rotation speed was considered as indirect parameters. Indicators of the presence of a defect in a cylinder were discovered. Such indicator, a fault presence index, can be determined by the ratio of the variation in crankshaft rotation speed to the duration of the section on the angle of rotation of the crankshaft for straight lines connecting the points of the values of the highest and lowest rotation speeds obtained by processing the values of instantaneous speeds averaging by arithmetic mean of 25 points. An algorithm of detection of a cylinder with defect has been developed. For the 6-cylinder engine type IVECO F4HE9687P it is shown that experimentally confirms the validity of the developed algorithm of defect detection and localization.