

Научная статья
УДК 621.43:534.6

Определение момента сил сопротивления ДВС

Антон Вячеславович Александров¹, Тимофей Викторович Морозкин²

Иван Алексеевич Долгов³, Сергей Евгеньевич Николаев⁴,

Дмитрий Сергеевич Конюшков⁵

^{1,2,3,4,5}Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹madilab@mail.ru

²tima.skazi@gmail.com

³bmwmadi@mail.ru

^{4,5}dvs@madi.ru

Аннотация. Предлагается экспериментальная методика определения момента сил сопротивления ДВС. Эмпирическая методика определения момента сил сопротивления основана на том, что при работе двигателя без внешней нагрузки (режимы холостого хода) работа газовых сил направлена на преодоление сил сопротивления и изменение кинетической энергии подвижных деталей двигателя. Если известен момент инерции вращающихся деталей, связанных с коленчатым валом, а также массы и кинематика деталей, совершающих возвратно-поступательное и плоскопараллельное движение, то зная мгновенную угловую скорость коленчатого вала рассчитать кинетическую энергию подвижных деталей ДВС в любой момент времени. Работа сил сопротивления на некотором угле промежутке определяется, как разность между работой газовых сил и изменением кинетической энергии подвижных деталей двигателя на этом угле промежутке. Угловая скорость и положение коленчатого вала определяются на основании обработки сигнала штатного ДПКВ. Рассчитав изменение кинетической энергии подвижных деталей ДВС, можно найти значение действующих на них внешних крутящих моментов, одним из которых является крутящий момент от газовых сил, определение которого на основании обработки сигнала штатного ДПКВ является конечной целью работы.

На примере рядного четырехцилиндрового двигателя, описан алгоритм определения момента сил сопротивления ДВС, производится аппроксимация данных, полученных в результате двухфакторных экспериментов, полиномом третьей степени, выясняется влияние крутящего момента от газовых сил на получаемое по предложенной методике значение момента сил сопротивления ДВС.

Ключевые слова: индицирование ДВС, ускорение коленчатого вала, кинетическая энергия деталей ДВС, работа газовых сил, момент инерции вращающихся деталей ДВС, момент сил сопротивления ДВС.

Для цитирования: Александров А.В., Морозкин Т.В., Долгов И.А., Николаев С.Е., Конюшков Д.С. Определение момента сил сопротивления ДВС // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. 2023. №2 (36).

Original article

Determination of the moment of resistance forces of the internal combustion engine

Anton V. Alexandrov¹, Timofey V. Morozkin², Ivan A. Dolgov³,
Sergey E. Nikolaev⁴, Dmitry S. Konyushkov⁵

^{1,2,3,4,5}Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI),
Moscow, Russia

¹madilab@mail.ru

²tima.skazi@gmail.com

³bmwmadi@mail.ru

^{4,5}dvs@madi.ru

Abstract. The article discusses an experimental method for determining the moment of resistance forces of an internal combustion engine. The empirical method for determining the moment of resistance forces is based on the premise that when the engine is running without an external load (different idling modes), the work of gas forces is aimed at overcoming resistance forces and changing the kinetic energy of moving parts of the engine. If the moment of inertia of the rotating parts associated with the crankshaft is known, as well as the masses and kinematics of the parts performing reciprocating and plane-parallel motion, then knowing the instantaneous angular velocity of the crankshaft, it is possible to calculate the kinetic energy of the moving parts of the internal combustion engine at any time. The work of resistance forces at a certain angular interval is defined as the difference between the work of gas forces and the change in the kinetic energy of the moving parts of the engine at this angular interval. The angular velocity and position of the crankshaft are determined based on the signal processing of the standard crankshaft position sensor. By calculating the change in the kinetic energy of the moving parts of the internal combustion engine, it is possible to find the value of the external torques acting on them, one of which is the torque from gas forces, the determination of which, based on the signal processing of the standard crankshaft position sensor, is the ultimate goal of the work.

In the article, using the example of an in-line four-cylinder engine, an algorithm for determining the moment of ICE resistance forces is considered, the data obtained as a result of

two-factor experiments are approximated by a polynomial of the third degree, and the effect of torque from gas forces on the value of the ICE resistance moment obtained by the proposed method is determined.

Keywords: ICE indication, crankshaft acceleration, kinetic energy of internal combustion engine parts, work of gas forces, moment of inertia of rotating internal combustion engine parts..

For citation: Alexandrov A.V., Morozkin T.V., Dolgov I.A., Nikolaev S.E., Konyushkov D.S. Determination of the moment of resistance forces of the internal combustion engine. *Avtomobil'. Doroga. Infrastruktura*. 2023. №2 (36).

Введение

Получить достоверную информацию о характере протекания рабочего процесса в цилиндрах двигателя можно при индицировании ДВС. Но процесс индицирования очень дорогостоящий и трудоемкий. Далекое не всегда в условиях эксплуатации целесообразно выполнение прямого индицирования ДВС [6, 12].

Прямое индицирование можно заменить косвенным, базирующемся на анализе изменения мгновенной угловой скорости коленчатого вала. Коленчатый вал является интегрирующим звеном, воспринимающим действия всех крутящих моментов, в том числе и от газовых сил. Сочетая информацию, полученную от контроллера ЭСУД, и результат обработки сигнала ДПКВ можно получить взаимодополняющую информацию, достаточную в большинстве случаев для анализа работы ДВС в составе транспортного средства. При реализации этой идеи в рамках контрольно-диагностического прибора можно получить универсальное оборудование, позволяющее решать широкий спектр задач для большинства марок автомобилей [1-4].

Для обеспечения приемлемой точности разрабатываемой методики косвенного индицирования ее следует вести на основании данных прямого индицирования. То есть ускорение коленчатого вала, рассчитанное на основании сигнала ДПКВ, должно сопоставляться с крутящим моментом от газовых сил, полученных на основании индикаторных диаграмм [5].

Помимо крутящего момента от газовых и инерционных сил на коленчатый вал и подвижные детали действуют силы сопротивления. Так как эти силы сложно рассчитать аналитически, их следует определять эмпирически.

Эмпирическая методика определения момента сил сопротивления основана на том, что при работе двигателя без внешней нагрузки работа газовых сил направлена на преодоление сил сопротивления и изменение кинетической энергии подвижных деталей двигателя. Если известен момент инерции вращающихся деталей, связанных с коленчатым валом, а также массы и кинематика деталей, совершающих возвратно-поступательное и плоскопараллельное движение, то зная мгновенную угловую скорость коленчатого вала можно рассчитать кинетическую энергию подвижных деталей ДВС в любой момент времени. Работа сил сопротивления на некотором угловом промежутке определяется как разность между работой газовых сил и изменением кинетической энергии подвижных деталей двигателя на этом угловом промежутке.

Для дальнейшего продвижения в разработке методики косвенного индицирования – определения крутящего момента от газовых сил на основании результата обработки сигнала ДПКВ – требуется проведение моторных испытаний с индицированием ДВС при движении автомобиля. Их задачей является нахождение зависимости изменения кинетической энергии подвижных деталей ДВС на некотором угловом промежутке (предположительно $30...40^\circ$ ПКВ), соответствующем максимальной работе газовых сил, от работы газовых сил на этом промежутке, рассчитанной на основании индикаторных диаграмм. То есть требуется идентифицировать работу, совершаемую газовыми силами, на основании результата обработки ДПКВ.

Постановка задачи для определения момента (работы) сил сопротивления

Рисунок 1 иллюстрирует зависимость значения момента (работы) сил сопротивления в ДВС от частоты вращения и генерируемого крутящего

момента. Чтобы отделить крутящий момент, затрачиваемый на преодоление сил сопротивления от момента, затрачиваемого на движение автомобиля, последний решили временно исключить – рассматривать работу двигателя на режиме свободного разгона – выбега. При этом график работы сил сопротивления рассчитывается как разность работы газовых сил и кинетической энергии деталей ДВС. Различная крутизна фронта этого графика иллюстрирует зависимость значения момента сил сопротивления от частоты вращения и нагрузки на двигатель.

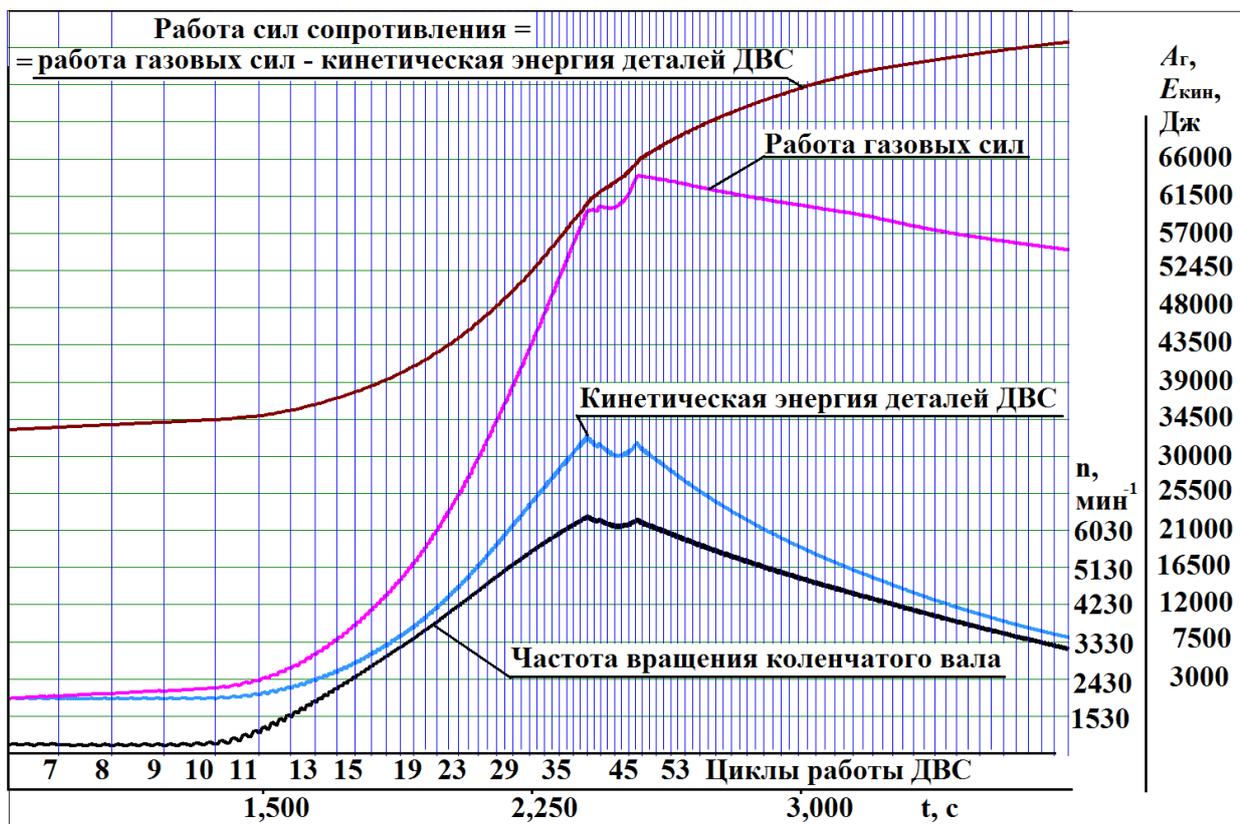


Рис. 1. «Разгон – выбег ДВС», подтверждающий зависимость момента сил трения от частоты вращения и нагрузки

Традиционно, когда указывается индикаторный или эффективный крутящий момент двигателя, подразумевается его среднее действующее значение на некотором угловом или временном промежутке. Точно также – на некотором угловом промежутке – рассматривается и значение среднего крутящего момента от сил сопротивления. В таком случае работа –

индикаторная, эффективная – произведение соответствующего момента на угол поворота.

Когда рассматривается индикаторная диаграмма и на ее основании рассчитывается мгновенный крутящий момент от газовой силы, то на угловом промежутке $720/i$ он не будет постоянным. Также, переменным, будет и мгновенный момент сил сопротивления. Фактически, он зависит от трех факторов: частоты вращения, нагрузки и углового положения вала. Но переход от мгновенных значений крутящих моментов к их действующим значениям позволяет исключить из расчетов угловое положение вала. Как уже отмечалось, для облегчения задачи – уменьшения факторов влияния – на начальном этапе исследования будет рассматриваться интегральная форма связи параметров ДВС. К таким параметрам относятся работа крутящих моментов от газовых сил и сил сопротивления и изменение кинетической энергии деталей ДВС.

Первичная обработка экспериментальных данных

Для получения экспериментальных данных на двигателе BMW N46B20 с установленными датчиками давления были выполнены несколько десятков тестовых циклов «разгон – выбег» с различной интенсивностью. На первом этапе исследования получена аналитическая зависимость работы сил сопротивления на участке 180° ПКВ ($720/i$) от работы газовых сил и средней частоты вращения коленчатого вала. Аналитическую зависимость предполагается получить на основании экспериментальных (статистических) данных.

На рисунке 2 представлен алгоритм формирования данных в программной среде МДК -- Visual, предназначенных к загрузке в программный модуль DataConvert для поиска аналитической зависимости момента сил сопротивления от частоты вращения и нагрузки. Чтобы избежать влияния различий в характеристиках датчиков давления и особенностей инкрементного колеса на соответствующем угловом

промежутке, статистические данные будут обрабатываться для каждого цилиндра отдельно. Каждый угловой промежуток 180° ПКВ формирует набор данных (точку) – средняя частота вращения (ось X), работа газовых сил (ось Y), работа сил сопротивления (ось Z). Каждый «разгон – выбег» состоит примерно из 150 циклов, то есть 600 участков по 180° градусов (600 точек). Всего, при выполнении серии тестовых циклов «разгон – выбег», было получено более 40 000 точек.

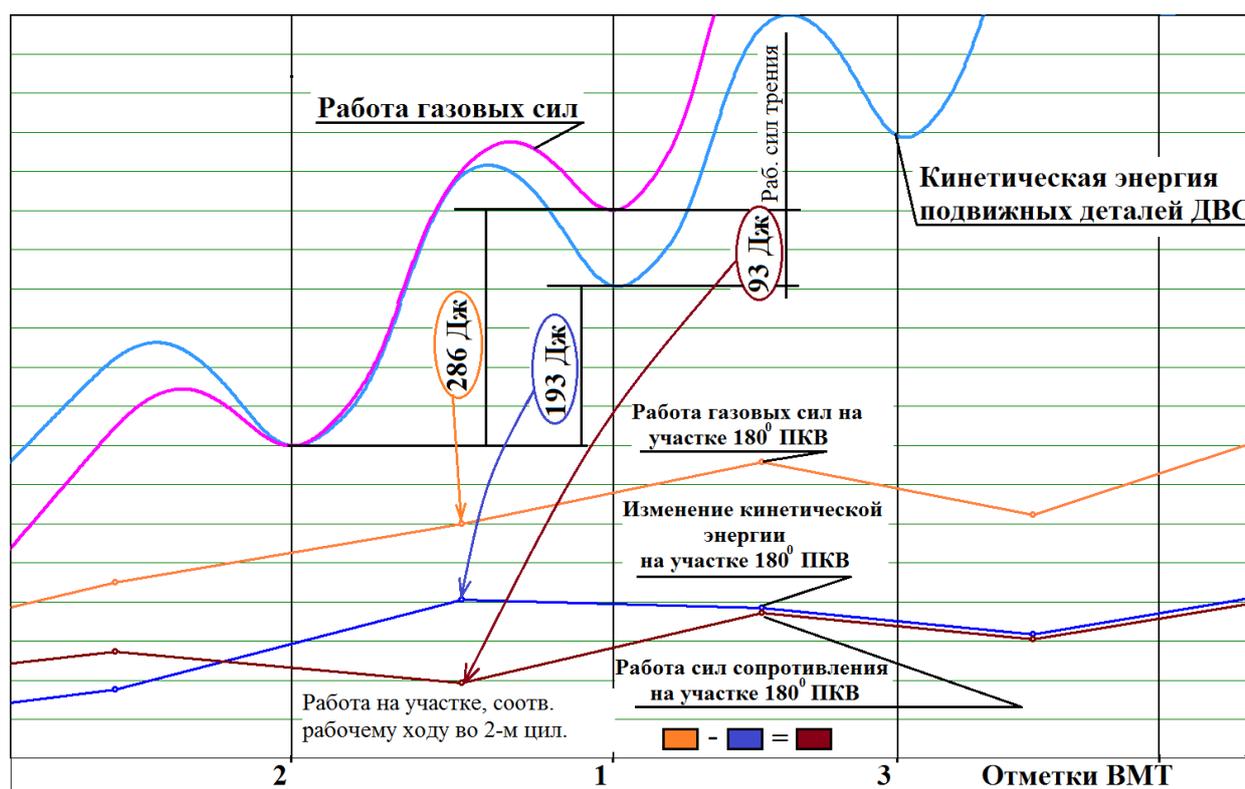


Рис. 2. Формирование данных, используемых для получения аналитической зависимости момента сил сопротивления от частоты вращения и нагрузки (работы газовых сил)

Загрузка данных эксперимента в программный модуль DataConvert

Между программными модулями Visual и DataConvert существует интерфейс, позволяющий обмениваться данными большого объема. На рисунке 3 представлена копия изображения с экрана программного модуля DataConvert с загруженными в нее данными нескольких циклов «разгон – выбег».

Таблицы Testo. v 1.35 Block0_x3

Файл: Block0_x3.csv
Количество строк: 1948

Интерполяция: Да, cFuchsia
Шрифт: cBlack, 8
Жирный: Курсив:
После запятой: 2 знака

Общие параметры отображения
Ось распределения и графиков: Z1: РабТрения
Ширина ячейки: 40
Высота ячейки: 20
Распределение: Только распр.
Цвет и размер: cRed, 3
Ручн. фильтр: cYellow
 Ось Z по модулю

Фильтры: осталось 1948 строк

- Исключить значения
Цилиндр
С 1 По 1
- Исключить значения
Цилиндр
С 2 По 2
- Исключить значения
Цилиндр
С 3 По 3
- Исключить значения
Цилиндр
С 4 По 4
- Исключить значения

Объединенные расчетные значения

№ строки	time	Phi	Oborot	Cylinder	РабТрения	РаботаНаПром	СкорНаПром
	Время	Угол	Оборот	Цилиндр	РабТрения	РаботаНаПром	СкорНаПром
1	1728,00	270,00	11,00	3,00	75,56	93,77	775,58
2	1767,00	450,00	11,00	4,00	49,20	37,64	777,84
3	1805,00	630,00	11,00	2,00	75,85	83,36	779,86
4	1844,00	90,00	12,00	1,00	54,48	-21,68	735,66
5	1886,00	270,00	12,00	3,00	57,87	26,01	728,29
6	1926,00	450,00	12,00	4,00	152,66	307,82	814,15
7	1960,00	630,00	12,00	2,00	82,85	301,85	955,58
8	1990,00	90,00	13,00	1,00	157,87	320,98	1060,52
9	2017,00	270,00	13,00	3,00	153,86	287,19	1148,44
10	2042,00	450,00	13,00	4,00	179,34	380,36	1239,41
11	2066,00	630,00	13,00	2,00	78,89	208,16	1309,08
12	2088,00	90,00	14,00	1,00	181,80	309,59	1365,96
13	2110,00	270,00	14,00	3,00	184,57	403,74	1467,63
14	2129,00	450,00	14,00	4,00	171,40	408,54	1554,84
15	2148,00	630,00	14,00	2,00	129,42	320,52	1636,55
16	2166,00	90,00	15,00	1,00	182,30	429,47	1727,84
17	2183,00	270,00	15,00	3,00	170,39	391,72	1806,19
18	2199,00	450,00	15,00	4,00	229,51	501,88	1896,73
19	2215,00	630,00	15,00	2,00	135,54	407,60	1986,49
20	2229,00	90,00	16,00	1,00	175,23	398,60	2050,39
21	2244,00	270,00	16,00	3,00	244,64	505,62	2138,28
22	2258,00	450,00	16,00	4,00	246,58	553,96	2220,41
23	2271,00	630,00	16,00	2,00	161,23	450,67	2303,88
24	2284,00	90,00	17,00	1,00	200,31	481,35	2374,66
25	2296,00	270,00	17,00	3,00	184,14	446,49	2443,17
26	2308,00	450,00	17,00	4,00	252,68	447,37	2494,41
27	2320,00	630,00	17,00	2,00	141,59	427,50	2567,44
28	2332,00	90,00	18,00	1,00	193,58	397,44	2611,65
29	2343,00	270,00	18,00	3,00	223,94	536,59	2687,02
30	2354,00	450,00	18,00	4,00	247,79	562,17	2759,16
31	2365,00	630,00	18,00	2,00	187,03	475,09	2824,25
32	2375,00	90,00	19,00	1,00	159,87	494,71	2894,76
33	2386,00	270,00	19,00	3,00	259,46	567,84	2964,60
34	2396,00	450,00	19,00	4,00	231,58	543,11	3027,15
35	2405,00	630,00	19,00	2,00	206,08	497,34	3091,30
36	2415,00	90,00	20,00	1,00	181,21	494,80	3149,68
37	2424,00	270,00	20,00	3,00	242,83	550,46	3213,31

Рис. 3. Загрузка данных в программный модуль DataConvert

Если в программный модуль загружены только циклы «разгон – выбег» с максимальной интенсивностью разгона, центральная часть поля режимов – рисунок 4 - остается незаполненной.

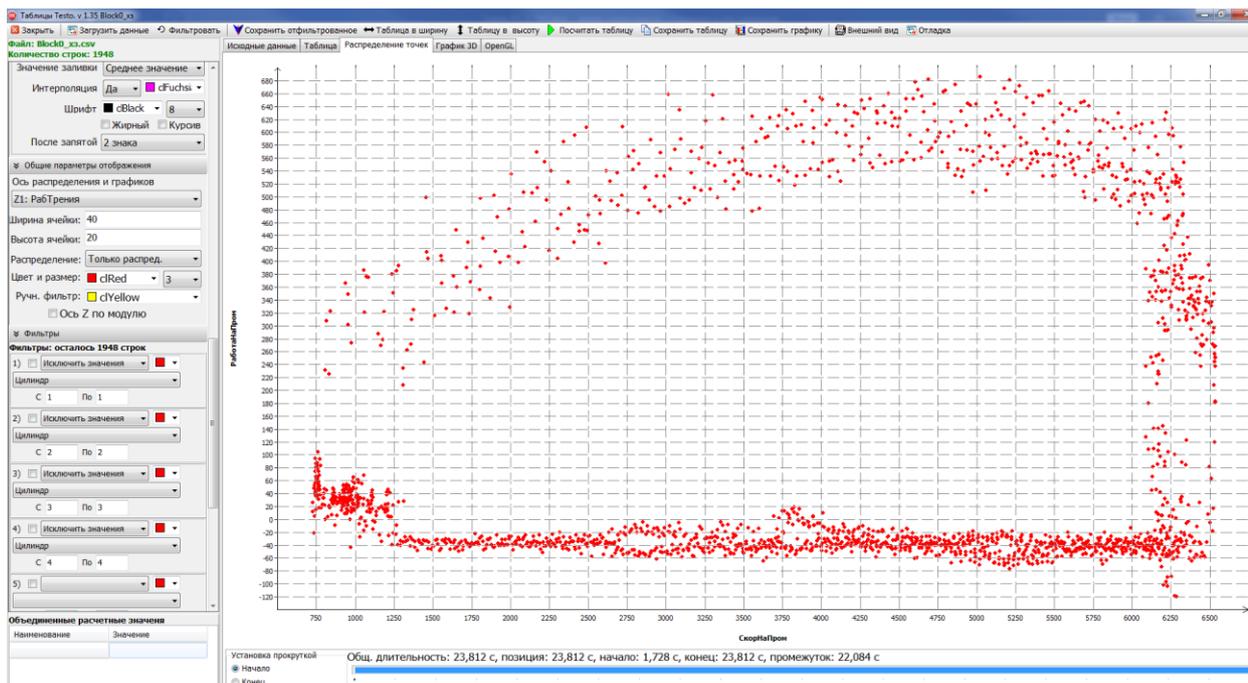


Рис. 4. Распределение точек в поле/область координатах «частота вращения – нагрузка» на режиме интенсивный «разгон – выбег»

Если в программный модуль DataConvert загрузить данные всех полученных при испытаниях циклов «разгон – выбег», то точек будет больше, а незаполненная область по центру поля – меньше

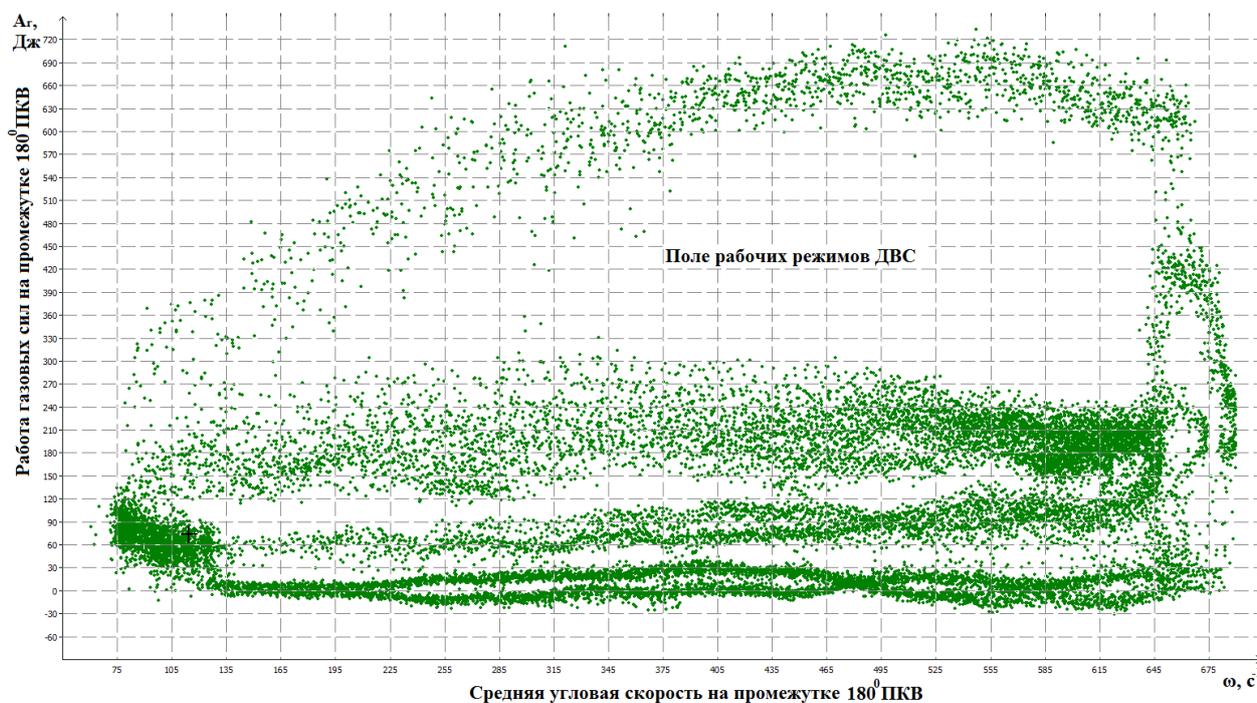


Рис. 5. Распределение данных эксперимента в поле «угловая скорость – нагрузка» с учетом всех данных серии

Турбомашины и поршневые двигатели

На рисунке 6 представлена таблица со значениями работ сил сопротивления на участке 180° ПКВ в поле режимов работы ДВС. Градиентная заливка отражает общую тенденцию – с увеличением частоты вращения и нагрузки возрастает момент сил сопротивления.

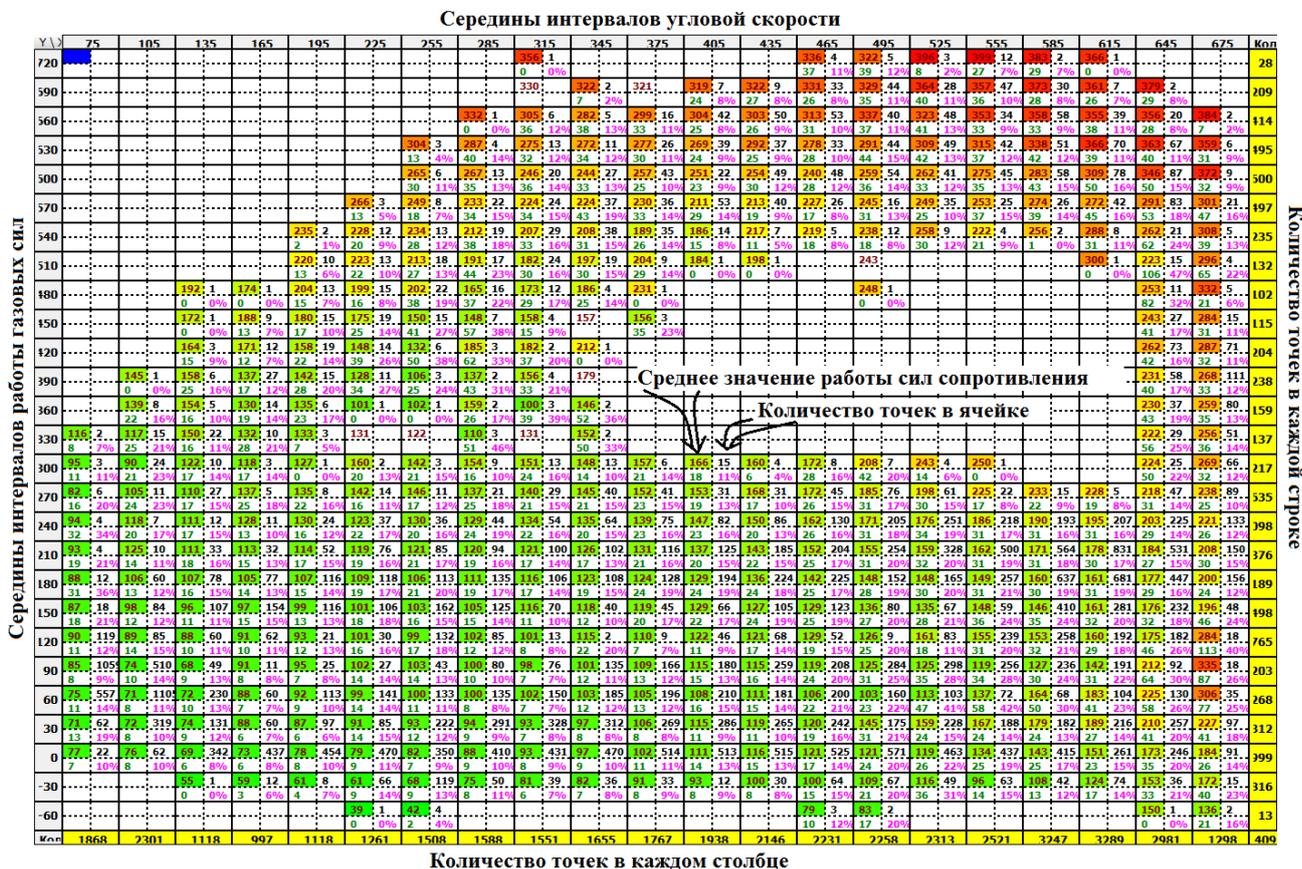


Рис. 6. Значения работы сил сопротивления в поле частота вращения – нагрузка

На рисунке 7 представлена 3-D поверхность, отображающая данные таблицы, представленной на рис 6.

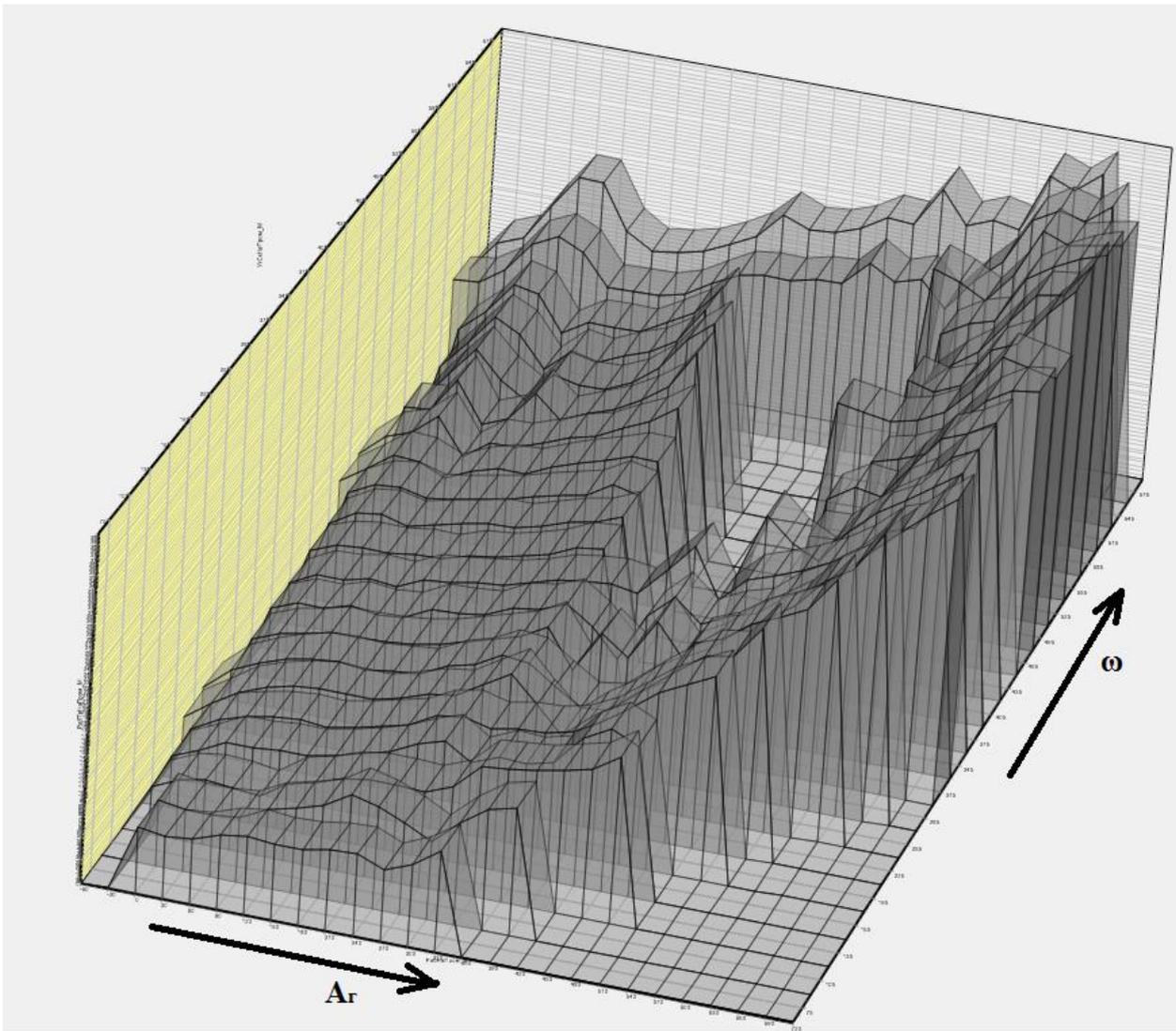


Рис. 7. 3D поверхность, отображающая зависимость работы сил сопротивления от частоты вращения и нагрузки

Аппроксимация экспериментальных данных

После того, как на основании данных моторных испытаний для каждой ячейки поля режимов рассчитывается среднее значение работы сил сопротивления, производится расчет коэффициентов аппроксимационного полинома по формуле

$$A_d = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2 + b_6x^2y + b_7xy^2 + b_8x^3 + b_9y^3$$

На рисунке 8 представлена экранная копия окна программного модуля DataConvert отражающая расчет коэффициентов полинома. Далее они будут

использованы в программном модуле Visual для расчета графической зависимости работы сил сопротивления.

Шаг 23: Коэффициенты вычислены

Количество переменных: X,Y - две | Переменная: A - Ось Y | Степень полинома: 3 - третья | Использовать значения: Всей таблицы

Полином: $b_0 + b_1 \cdot A + b_2 \cdot \omega + b_3 \cdot A \cdot \omega + b_4 \cdot A^2 + b_5 \cdot \omega^2 + b_6 \cdot A^2 \cdot \omega + b_7 \cdot A \cdot \omega^2 + b_8 \cdot A^3 + b_9 \cdot \omega^3$

Исходные данные: Расчетные из таблицы

Делитель Омга: 100 | Делитель A: 100 | Делитель Z: 1 | Расчетный Z

	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9	Z
(0)	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	35,606
(1)	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	27,327
(2)	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	33,111
(3)	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-2,117
(4)	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-4,964
(5)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	-8,410
(6)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	-0,553
(7)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,524
(8)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	1,167
(9)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,996

Полином с рассчитанными коэффициентами

Параметры	b0	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
Значения	13	1	1	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1

Переменная ω в расчете: Speed | Переменная A в расчете: A | После запятой: 2 знака

Формула для расчета: $f(x;у) = 35.61 + 27.33 \cdot A + 33.11 \cdot \omega - 2.12 \cdot A \cdot \omega - 4.96 \cdot A^2 - 8.41 \cdot \omega^2 - 0.55 \cdot A^2 \cdot \omega + 0.52 \cdot A \cdot \omega^2 + 1.17 \cdot A^3 + 1.00 \cdot \omega^3$

Протокол работы: Устанавливаю максимальное количество данных MaxInDataCount=567
Всего точек:422
FWD ColID=0
NOT Zero ColID=0 LineID=0
Строка=1 k=-2,90189573459715
Строка=2 k=-3,889336492891

Формулы в расчет:
A = (A/100)
A² = A*A
A³ = A*A*A
ω = (Speed/100)
ω² = ω*ω
ω³ = ω*ω*ω

Рис. 8. Экранная копия окна программного модуля DataConvert, отражающего расчет коэффициентов полинома

Результат его вычисления – работа сил сопротивления в функции средней угловой скорости и работы газовых сил на участке 180° ПКВ.

На рисунке 9 представлены экспериментальные данные и результат расчета по полиному работы сил сопротивления в зависимости от угловой скорости коленчатого вала при различных значения работы газовых сил на участке 180° ПКВ – 0 Дж, 150 Дж, 630 Дж и 660 Дж. По сути, это сечения поверхности, представленной на рисунке 7. Значения полинома рассчитываются при значениях работы газовых сил, соответствующих

середине интервала, а данные эксперимента, отражаемые на графиках, соответствуют \pm половине шага интервала, в данном случае ± 15 Дж.

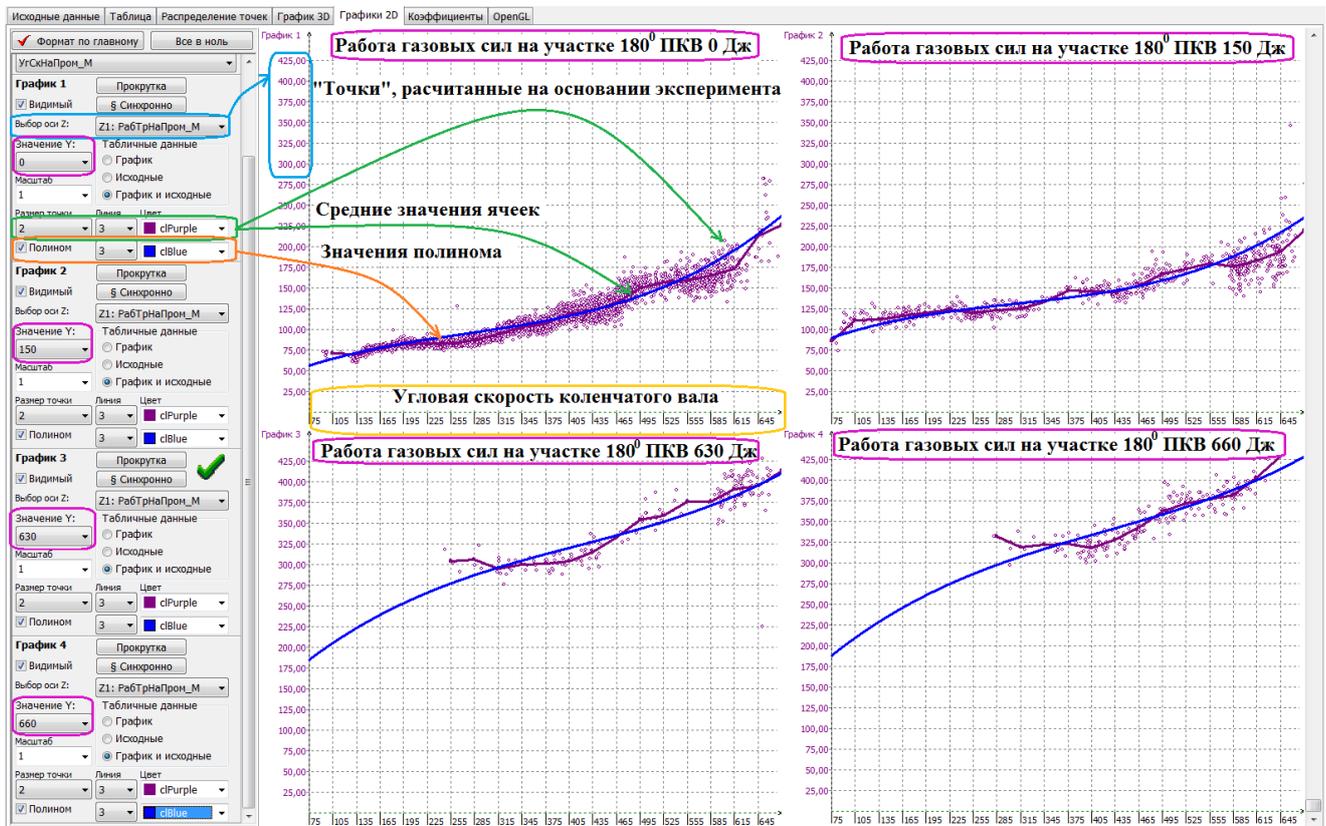


Рис. 9. Графики зависимости работы сил сопротивления от угловой скорости коленчатого вала при различных значениях работы газовых сил

Использование результатов аппроксимации

После расчета коэффициентов полинома аппроксимации, они используются в программном модуле Visual для расчета графической зависимости работы сил сопротивления на каждом шаге расчета. При обработке данных серии экспериментов использовалось два варианта выделения угловых интервалов 180° ПКВ – $0 \dots 180^\circ$, что соответствует рабочему ходу в каждом цилиндре и $-50 \dots 130^\circ$, что соответствует преимущественному действию на коленчатый вал крутящего момента от газовой силы в одном цилиндре. В первом варианте работа газовых сил рассчитывалась с учетом всех тактов работы ДВС, во втором – только на тактах «сжатие – расширение». Во втором варианте расчета разброс

экспериментальных данных оказался меньше, поэтому на данном этапе такое формирование угловых промежутков крутящего момента от газовых сил следует считать предпочтительным. На рисунке 10 представлена копия изображения с экрана вкладки «Расчет» с формулами, используемыми для расчета параметров, относящихся к первому цилиндру ДВС.

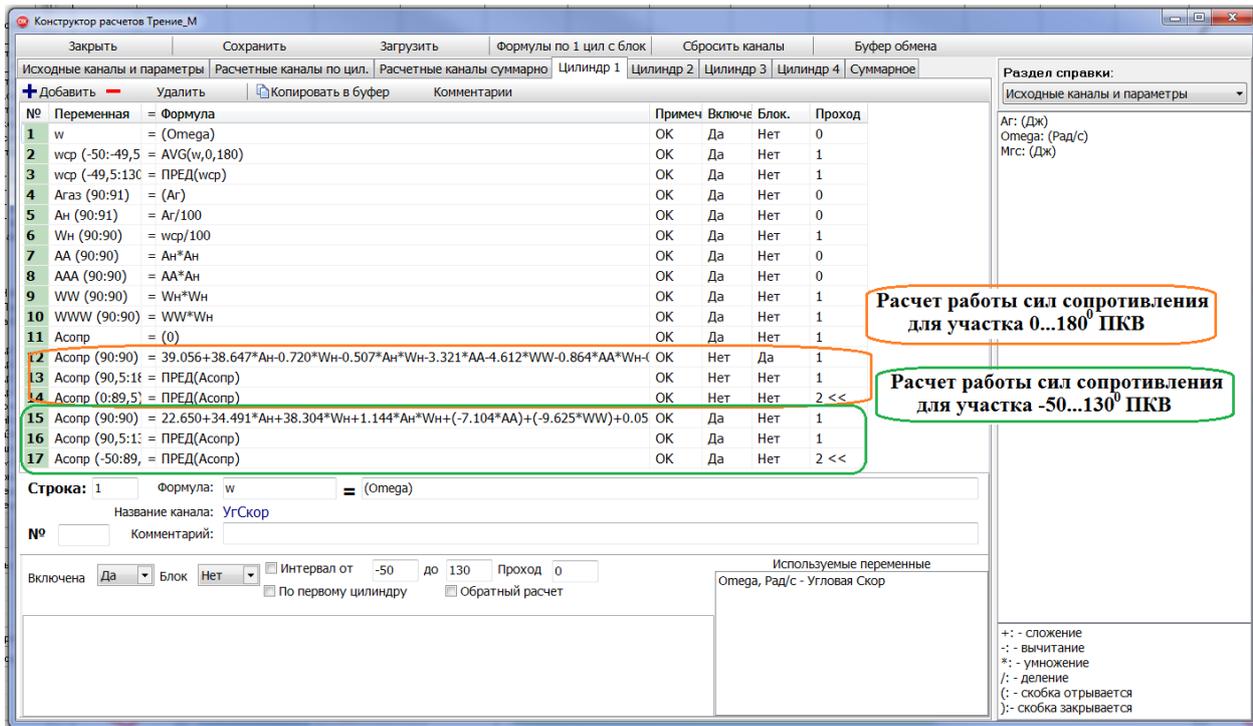


Рис. 10. Копия вкладки «Расчет» с редактором формул

Для получения плавных графиков кинетической энергии подвижных деталей ДВС и интегральной работы в программном модуле Visual расчет всех параметров происходит с шагом $0,5^\circ$ ПКВ. Соответственно, на основании рассчитанной работы сил сопротивления для участка 180° ПКВ, рассчитывается среднее значение крутящего момента от сил сопротивления, которое вычитается из крутящего момента от газовых сил на каждом шаге расчета. В результате интегрирования этой разности - суммирования каждого последующего шага расчета – получается график интегральной работы. На рисунке 11 представлен результат совмещения графиков интегральной и кинетической энергии подвижных деталей ДВС, а также схемы расчета этих

параметров. Следует отметить хорошее совмещение этих графиков в пределах участка, представленного на экране.

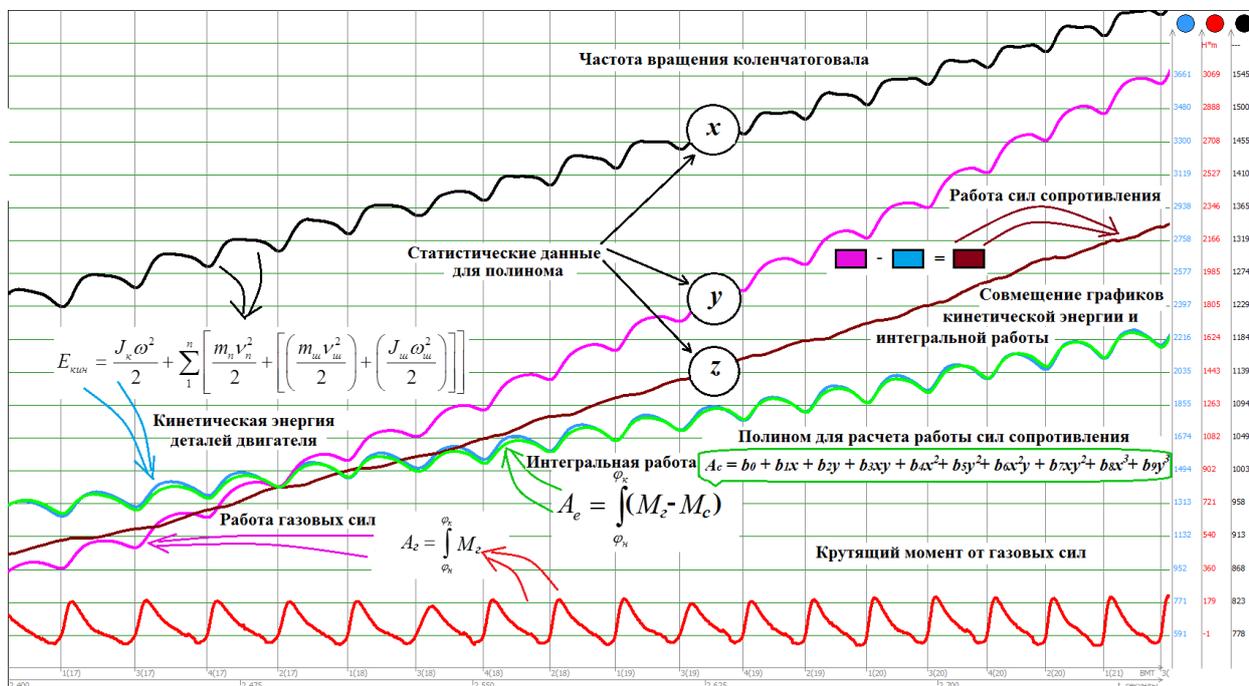


Рис. 11. Совмещение графиков интегральной работы и кинетической энергии подвижных деталей ДВС на некотором угловом промежутке

На рисунке 12 представлен цикл «разгон – выбег» аналогичный представленному на рисунке 1. Как уже отмечалось, что работа газовых сил рассчитывалась без учета тактов газообмена. То, что на участке выбега работа газовых сил несколько возрастает, может свидетельствовать о недостаточном качестве индикаторных диаграмм или неправильном их позиционировании относительно шкалы угловых отметок. Интегральная работа – интеграл разности крутящих моментов от газовых сил и сил сопротивления – достаточно хорошо согласуется с изменением кинетической энергии деталей ДВС. Работа от крутящего момента сил сопротивления рассчитывалась с помощью полинома, аппроксимирующего экспериментальные данные (рис. 2).

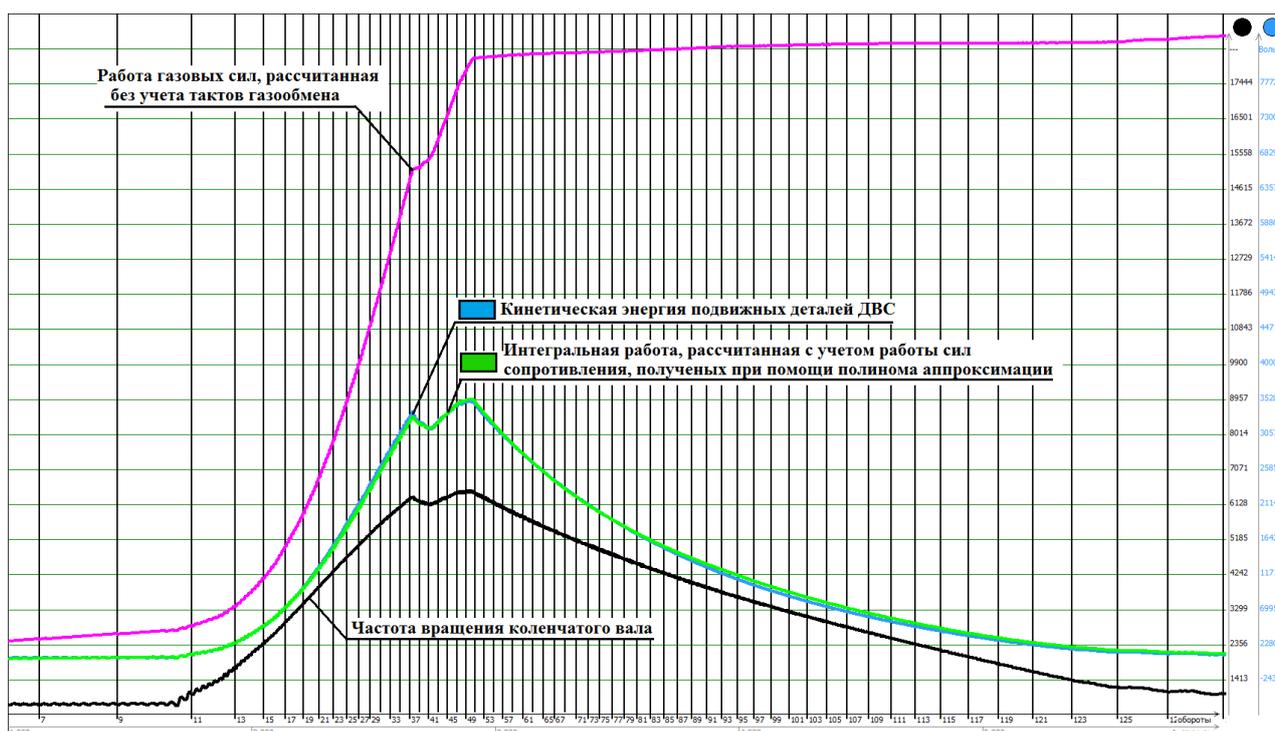


Рис. 12. Совмещение графиков кинетической энергии подвижных деталей ДВС и интегральной работы

Выводы

1. Предложена методика для определения момента сил сопротивления с целью ее дальнейшей реализации при косвенном индицировании ДВС.
2. Разработан программный модуль для систематизации экспериментальных данных и оценки показателей двигателя в поле режимов частота вращения-нагрузка.
3. Выполнен анализ полученных результатов возможности получения момента сил сопротивления в поле режимов холостого хода применительно к 4-цилиндровому бензиновому двигателю BMW N46B20.
4. В дальнейшей работе будет продолжено изучения влияния на момент сил сопротивления, не учтенных факторов в данном расчете.

Список источников

1. Александров, А.В. Повышение достоверности данных, полученных при индицировании ДВС. Часть 1 / А.В. Александров, И.А. Долгов // Журнал автомобильных инженеров. – 2018. – № 3(110) – С. 30-35
2. Александров, А.В. Повышение достоверности данных, полученных при индицировании ДВС. Часть 2 / А.В. Александров, И.А. Долгов // Журнал автомобильных инженеров. – 2018. – №. 5(112) – С. 40-42.
3. Долгов, И.А. Мобильный комплекс для регистрации и обработки параметров работы автомобильного двигателя / И.А. Долгов, А.В. Александров // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 2(103). – С. 11-17.
4. Морозкин, Т.В. Исследование корреляции крутящего момента от газовых сил и динамики вращения коленчатого вала на различных режимах работы ДВС: специальность: 13.04.03: дис. ... магистра / Морозкин Т.В.; МАДИ. – Москва, 2020. – 81 с.
5. Александров, А.В. Индицирование двигателя на переходных режимах / А.В. Александров, Т.В. Морозкин // 8-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса: Сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 31 января 2019 года. – Москва: МАДИ, 2019. – С. 270-282.
6. An alternative approach to the assessment of internal combustion engine filling and its technical and economic parameters / M.G. Shatrov, L.M. Matyukhin, V.V. Sinyavski, A.Y. Dunin // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – P. 2805-2811. – DOI 10.30534/ijeter/2020/94862020.
7. Research of the influence of alternative fuels on diesel engine noise level / A.L. Iakovenko, A.Y. Dunin, P.V. Dushkin [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 2019 International Conference on Digital Solutions for Automotive Industry, Roadway Maintenance and Traffic Control, DS ART 2019, Cholpon-Ata, 01 ноября 2019 года. Vol. 832. – BRISTOL: Institute of Physics Publishing, 2020. – P. 012004. – DOI 10.1088/1757-899X/832/1/012004.
8. The influence of mass composition of water-fuel emulsion on ecological characteristics of a diesel engine / A. Iakovenko, A. Dunin, P. Dushkin [et al.] // Energies. – 2019. – Vol. 12, No. 14. – P. 2689. – DOI 10.3390/en12142689.
9. Results of Simulation and Experimental Research of Automobile Gas Diesel Engine / V.V. Sinyavski, M G. Shatrov, A.Y. Dunin [et al.] // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, Moscow, 20–21 марта 2019 года. – Moscow, 2019. – P. 8706756. – DOI 10.1109/SOSG.2019.8706756.
10. Simulation of fuel injection through a nozzle having different position of the spray holes / M.G. Shatrov, V.I. Malchuk, S.D. Skorodelov [et al.] // Periodicals of Engineering and Natural Sciences. – 2019. – Vol. 7, No. 1. – P. 458-464. – DOI 10.21533/pen.v7i1.403.

11. Analysis of the nozzle hole diameter effect to common rail diesel engine characteristics using a calculated model of an internal combustion engine / A.Y. Dunin, M.G. Shatrov, N.T. Quynh, L.N. Golubkov // International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – Vol. 8, No. 6. – P. 2301-2308. – DOI 10.30534/ijeter/2020/17862020.

12. Shatrov, M.G. A laboratory investigation into the fuel atomization process in a diesel engine for different configurations of the injector nozzles and flow conditions / M.G. Shatrov, A.Y. Dunin, V.I. Malchuk // Fluid Dynamics and Materials Processing. – 2020. – Vol. 16, No. 4. – P. 747-760. – DOI 10.32604/FDMP.2020.08991.

References

1. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2018, no. 3 (110), pp. 30-35.

2. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2018, no. 5 (112), pp. 40-42.

3. Alexandrov A.V., Dolgov I.A. *Zhurnal avtomobil'nyh inzhenerov*, 2017, no. 2 (103), pp. 22-28.

4. Morozkin T.V. *Issledovanie korrelyacii krutjashhego momenta ot gazovyh sil i dinamiki vrashhenija kolenchatogo vala na razlichnyh rezhimah raboty DVS* (Investigation of the correlation of torque from gas forces and the dynamics of rotation of the crankshaft in various operating modes of the internal combustion engine), Master's thesis, Moscow, MADI, 2020, 120 p.

5. Alexandrov A.V., Morozkin T.V. 8-e Lukaninskie chtenija. Problemy i perspektivy razvitija avtotransportnogo kompleksa. Sbornik trudov Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii. Moscow, 2019, pp. 270-282.

6. Shatrov M. G., Matyukhin L. M., Sinyavski V. V. and Dunin A. Y. An alternative approach to the assessment of internal combustion engine filling and its technical and economic parameters. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research, 2020, no. 8(6), pp. 2805–2811.

7. Iakovenko A. L., Dunin A. Y., Dushkin P. V., Savastenko E. A. and Shatrov M. G. Research of the influence of alternative fuels on diesel engine noise level. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 832 012004, 2020 DOI:10.1088/1757-899X/832/1/012004

8. Iakovenko A, Dunin A, Dushkin P, Savastenko E and Shatrov M . The influence of mass composition of water-fuel emulsion on ecological characteristics of a diesel engine. *Energies*, 2020, no. 12(14), pp. 2689 DOI:10.3390/EN12142689

9. Sinyayski V. V., Shatrov M. G., Dunin A. Y., Shishlov I. G. and Vakulenko A. V. 2019 Results of simulation and experimental research of automobile gas diesel engine 2019 systems of signals generating and processing in the field of on board communications. Proceedings Paper. 8706756 DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706756

10. Shatrov M. G., Malchuk V. I., Skorodelov S. D., Dunin A. Y., Sinyavski V. V. and Yakovenko A. L. *Vestnik tehnikeskikh i estestvennykh nauk*. 2019, no. 7(1), pp. 458–464.
11. Dunin A.Y., Quynh N. T., Shatrov M. G. and Golubkov L. N. Analysis of the nozzle hole diameter effect to common rail diesel engine characteristics using a calculated model of an internal combustion engine *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020, no. 8(6), pp. 2301–2308.
12. Shatrov M. G., Malchuk V. I. and Dunin A. Y. A laboratory investigation into the fuel atomization process in a diesel engine for different configurations of the injector nozzles and flow conditions. *Fluid Dynamics & Materials Processing*. 2020, no. 16(4), pp. 747–760; DOI:10.32604/fdmp.2020.08991.

Рецензент: А.Л. Яковенко, канд. техн. наук, доц., МАДИ

Информация об авторах

Александров Антон Вячеславович, канд. техн. наук, доц., МАДИ.

Морозкин Тимофей Викторович, аспирант, МАДИ.

Долгов Иван Алексеевич, канд. техн. наук, МАДИ.

Николаев Сергей Евгеньевич, инженер, МАДИ.

Конюшков Дмитрий Сергеевич, зав. лабораторией, МАДИ.

Information about the authors

Alexandrov Anton V., Ph.D., associate professor, MADI.

Morozkin Timofey V., postgraduate, MADI.

Dolgov Ivan A., Ph.D., MADI.

Nikolaev Sergey E., engineer, MADI.

Konyushkov Dmitry S., head of the laboratory, MADI.

Статья опубликована по итогам международной научно-технической конференции «10-е Луканинские чтения. Проблемы и перспективы развития автотранспортного комплекса».

Статья поступила в редакцию 18.04.2023; одобрена после рецензирования 11.05.2023; принята к публикации 06.06.2023.

The article was submitted 18.04.2023; approved after reviewing 11.05.2023; accepted for publication 06.06.2023.