

УДК 621.43

doi: 10.53816/23061456_2025_3-4_149

**РЕЗУЛЬТАТЫ ФОРМАЛИЗОВАННОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ,
ПРОИСХОДЯЩИХ В ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ,
НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ**

**THE RESULTS OF A FORMALIZED DESCRIPTION OF THE PROCESSES
OCCURRING IN AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE, NECESSARY FOR
SOLVING DIAGNOSTIC PROBLEMS**

В.В. Нечаев

V.V. Nechaev

Военная академия материально-технического обеспечения им. А.В. Хрулева

Создание диагностических моделей позволяет формализовать происходящие процессы, прописать схемы анализа, составить удобные алгоритмы и автоматизировать ряд задач. Разработка диагностических моделей процессов, происходящих при функционировании двигателя важна для эффективного управления его техническим состоянием. В статье представлена диагностическая модель, описывающая процессы, происходящие в двигателе военной автомобильной техники при проворачивании коленчатого вала без инициализации рабочего процесса, позволяющая сделать вывод о том, что момент сопротивления вращению коленчатого вала и ток, потребляемый стартером, меняется синусоидально, причем максимумы тока соответствуют очередным приходам поршней в верхнюю мертвую точку. Зафиксировав максимумы синусоиды, формируемой в результате прокрутки стартером коленчатого вала и зная порядок работы цилиндров можно без труда сделать заключение о техническом состоянии деталей кривошипно-шатунного и газораспределительных механизмов двигателя.

Ключевые слова: теория механизмов и машин, диагностическая модель, максимумы тока, приход поршней двигателя в верхнюю мертвую точку, момент вращения стартера.

The creation of diagnostic models allows you to formalize ongoing processes, prescribe analysis schemes, create convenient algorithms and automate a number of tasks. The development of diagnostic models of processes occurring during engine operation is important for effective management of its technical condition. The article presents a diagnostic model describing the processes occurring in the engine of military vehicles when cranking the crankshaft without initializing the workflow, which allows us to conclude that the moment of resistance to rotation of the crankshaft and the current consumed by the starter varies sinusoidally, with current maxima corresponding to the next arrivals of pistons at the top dead center. Having fixed the maxima of the sinusoid formed as a result of scrolling the crankshaft by the starter and knowing the order of operation of the cylinders, it is possible to easily draw a conclusion about the technical condition of the parts of the crank and gas distribution mechanisms of the engine.

Keywords: theory of mechanisms and machines, diagnostic model, current maxima, arrival of engine pistons at the top dead center, starter rotation moment.

Разработка диагностической модели военной автомобильной техники в целом для решения задач технической диагностики затруднено ввиду её чрезвычайной сложности. Для практических целей необходимо строить формализованное описание, которое является исходным для определения и выполнения алгоритмов диагностирования отдельных агрегатов, систем или механизмов. На таких моделях могут быть решены задачи оценки их технического состояния и поиска неисправностей, а также прогнозирования изменения технического состояния. Для разработки диагностической модели военную автомобильную технику целесообразно представить в виде блочно-функциональной схемы.

Формализованное описание процессов, происходящих в двигателе, также как и в отдельно взятом экземпляре военной техники в целом, складывается из формализованного описания процессов, происходящих в его системах и механизмах.

Основу двигателя составляют кривошипно-шатунный и газораспределительные механизмы, детали которых совершают сложные, возвратно-поступательные и вращательные движения. Используя теорию машин и механизмов, а также физику упругих колебаний, проведем анализ явлений, происходящих в кинематических парах двигателя внутреннего сгорания военной автомобильной техники.

В работающем механизме различают три вида физических процессов:

- движение его деталей;
- взаимный обмен энергией с внешней средой;
- разрушение деталей.

Диагностика имеет дело со всеми этими процессами. Разрушение элементов механизма, в данном случае деталей, приводит к изменению состояния механизма в целом, определение технического состояния которого является одной из задач диагностики. Процессы взаимодействия механизма с внешней средой служат диагностическим сигналом. Благодаря движению элементов механизма устанавливается связь между состоянием его деталей и диагностическим сигналом [1].

Рассмотрим движение деталей, соединенных в кинематические пары. Анализ будет опираться на ряд абстракций и допущений, которые приводят к определенным погрешностям, однако

он позволит вскрыть принципиальную сущность этих явлений и облегчит понимание механизма возникновения упругих колебаний в системах и механизмах двигателя.

Любой физический объект при анализе можно идеализировать многими способами. Так, в теории механизмов и машин рассматриваются схемы технических устройств, у которых кинематические цепи замкнуты. Такая идеализация приводит к одномерной динамической задаче. Все движущиеся массы и действующие на них силы удается привести к одной точке выбранного звена приведения и вместо анализа сложной системы, которой, безусловно, является любой механизм, ограничиться рассмотрением движения материальной точки с одной степенью свободы. Такие идеализированные схемы механизмов служат для объяснения простейших свойств их движения и успешно используются при проектировании.

Реальный механизм всегда имеет внутренние степени свободы, связанные с наличием зазоров в кинематических парах и других дефектов. Для формализованного описания происходящих в них процессов это обстоятельство является существенным, так как механизм выступает в качестве системы со многими степенями свободы. Точная постановка задачи о движении реального механизма требует составления и решения многомерной системы дифференциальных уравнений, порядок которой равен удвоенному числу степеней свободы механизма. Такой подход к задаче о движении механизма неизбежно привел бы к невозможности её решения. Следовательно, первым шагом в упрощении задачи будет рассмотрение относительного движения элементов механизма, соединенных в кинематическую пару, изолированно от движения других деталей. Силы, действующие на детали рассматриваемой пары со стороны сопряженных с нею элементов, будем считать заданными и независимыми от состояния этих элементов. Такое упрощение, в известных пределах, допустимо, поскольку практически наблюдаемые изменения состояния деталей в результате износа или технологических нарушений невелики и их проявления во время работы механизма носят локальный характер [2].

Детали механизма во время работы совершают сложные движения, поэтому необходимо со-

средоточить внимание только на перемещении деталей относительно друг друга по паразитным степеням свободы. Это второй шаг в идеализации рассматриваемых явлений. И наконец, третьим шагом в этом направлении будет концентрация внимания только на одной стороне относительного движения деталей, соединенных в кинематическую пару, это процесс их соударения.

Важнейшей характеристикой кинематической пары, определяющей её ресурс и эффективность функционирования, является закон взаимодействия деталей. Силы, действующие между сопряженными деталями, можно разделить на квазистатические (постоянные или медленно меняющиеся), силы трения и импульсные. Они различаются между собой характером изменения во времени. Особенность квазистатических взаимодействий заключается в том, что они не возбуждают в механизме упругих колебаний. За редким исключением к ним можно отнести все нормальные силы, действующие на детали «идеального» механизма [3, 4].

Импульсные взаимодействия возникают при соударении деталей. Они отличаются значительной величиной и малой длительностью процесса. В первый момент столкновения деталей деформация и напряжения локализуются лишь в малом объеме материала, а большая часть механизма остается в невозмущенном состоянии. Лишь через некоторое время возмущение распространится по всему механизму и в нем начнется колебательный процесс [5].

Формализовано опишем, при помощи математического аппарата, происходящее в двигателе внутреннего сгорания при проворачивании коленчатого вала без инициализации рабочего процесса. При прокручивании коленчатого вала двигателя момент сопротивления вращению M_c можно представить как сумму момента, учитывающего механические затраты энергии на вращение кривошипно-шатунного механизма и привод вспомогательных механизмов $M_{мех}$, момента сопротивления трению $M_{тр}$ и момента сопротивления на сжатие рабочей смеси $M_{сж}$:

$$M_c = M_{сж} + M_{тр} + M_{мех}.$$

Для упрощения формализованного описания момента сопротивления вращению используем схему движения кривошипно-шатунного

механизма, изображенную на рис. 1. Для определения степени изменения момента сопротивления вращению от угла поворота коленчатого вала необходимо установить его максимальное и минимальное значения.

Сила, действующая на поршень, максимальна при $\varphi = 180^\circ$. Рассмотрим момент сопротивления коленчатого вала при прокрутке двигателя, который производит компенсацию этой силы. Очевидно, что в мертвых точках, когда сила, действующая на поршень, направлена вдоль

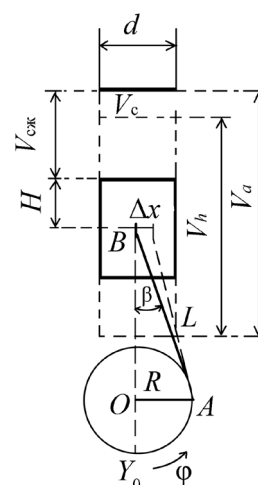


Рис. 1. Схема движения

кривошипно-шатунного механизма:

- $V_{сж}$ — объем надпоршневого пространства;
- d — диаметр поршня; V_c — объем камеры сгорания;
- V_a — полный объем цилиндра;
- V_h — рабочий объем цилиндра;
- R — длина кривошипа коленчатого вала;
- L — длина шатуна; φ — угол поворота;
- H — расстояние от центра поршневого пальца до дна цилиндра;
- β — угол между осью поршня и шатуном

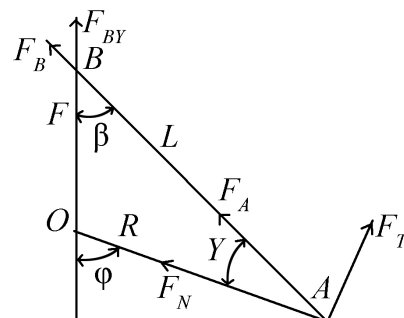


Рис. 2. Силы, действующие на кривошипно-шатунный механизм

кривошипа коленчатого вала, рассматривается отрезок OA , этот момент равен 0. Схематично силы, действующие на кривошипно-шатунный механизм, представлены на рис. 2.

Шатун в точке B действует на поршень с силой F_B , направленной вдоль отрезка AB , причем вертикально составляющая её F_{BY} по величине равна F .

$$F_B = \frac{F}{\cos \beta}.$$

Выразим угол β , который, в соответствии с рис. 1 и 2, будет определяться как:

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

$$F_A = F_B = \frac{F}{\cos \beta}.$$

Сила F_A имеет две составляющие:

F_N — направлена к центру вращения коленчатого вала и препятствует растягиванию отрезка OA ;

F_T — создается моментом сопротивления M_c .

$$M_c = F_T R. \quad (1)$$

Из рис. 2 следует что:

$$F_T = F_A \cos Y;$$

$$Y = 180^\circ - (180^\circ - \varphi) - \beta = \varphi - \beta.$$

Следовательно, F_T будет равно:

$$F_T = \frac{F}{\cos \beta} \sin(\varphi - \beta).$$

Подставляя полученные величины в выражение (1) определим искомый момент:

$$M_c = \frac{F R}{\cos \beta} \sin(\varphi - \beta).$$

Используя программу MathCad, промоделируем изменение этого момента от угла поворота коленчатого вала двигателя для ряда значений, используя для этого двигатель модели ТМЗ 8492.10–033. Кривые, получившиеся в результате моделирования, представленные на рис. 3, позволяют утверждать, что момент

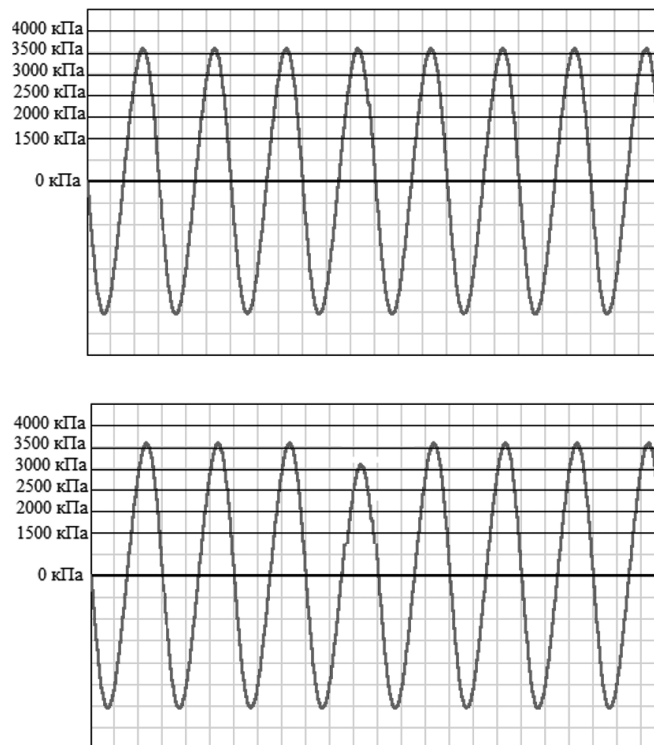


Рис. 3. Промоделированный при помощи программы MathCad момент сопротивления M_c

сопротивления изменяется по синусоиде от угла поворота коленчатого вала φ .

Как следует из расчетов, и наблюдается на полученных графиках, максимум момента смещен относительно прихода поршня в верхнюю мертвую точку на постоянный угол, и при прочих равных условиях зависит от длины кривошипа, длины шатуна, радиуса поршня и компрессии [6].

На верхней части рис. 3 представлена синусоида, указывающая на отсутствие неисправностей, в том числе и износа, деталей кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов двигателя.

Изменяя данные и вводя заведомо значения, которые не соответствуют работоспособному состоянию элементов кривошипно-шатунного и газораспределительного механизмов двигателя, получим синусоиду, отображенную на нижней части рис. 3.

Зная порядок работы цилиндров двигателя 1–5–4–2–6–3–7–8, можно сделать вывод о том, что во втором цилиндре давление в конце такта сжатия ниже, чем в остальных, на 5–6 кПа. Это указывает на наличие неисправности [7].

Определим, каким образом изменяется ток, потребляемый стартером при прокрутке двигателя. Для обеспечения вращения коленчатого вала двигателя необходимо, чтобы момент вращения стартера $M_{вр}$ был равен максимальному моменту сопротивления [8, 9].

Момент вращения стартера при прокрутке двигателя без его пуска определяется произведением тока якоря $I_я$ и магнитного потока Φ :

$$M_{вр} = C_m I_я \Phi, \quad (2)$$

где C_m — постоянная электродвигателя.

В свою очередь магнитный поток определяется отношением:

$$\Phi = \frac{F_n}{R_{мц}},$$

где F_n — намагничивающая сила;

$R_{мц}$ — сопротивление магнитной цепи.

Намагничивающая сила будет равна:

$$F = \varpi_{ов} I_я,$$

где $\varpi_{ов}$ — число витков обмотки возбуждения стартера.

Подставив полученные величины в выражение (2), получим:

$$M_{вр} = C_m I_я \frac{\varpi_{ов} I_я}{R_{мц}}. \quad (3)$$

Бесспорным выглядит утверждение о том, что при вращении коленчатого вала стартером момент сопротивления должен быть равным моменту вращения:

$$M_{вр} = M_c.$$

Из выражения (3) определим величину тока якоря стартера при прокрутке двигателя:

$$I_я = \sqrt{\frac{M_c}{C_m \varpi_{ов}}} R_{мц}. \quad (4)$$

Подставив величину момента сопротивления в выражение (4), установим зависимость изменения тока, потребляемого стартером при прокрутке двигателя:

$$I_я = \sqrt{\frac{FR \sin(\varphi - \beta) R_{мц}}{C_m \varpi_{ов} \cos \beta}}.$$

Таким образом, и момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала, и ток, потребляемый стартером при проворачивании двигателя, с незначительным допущением изменяются синусоидально от угла поворота коленчатого вала, причем максимумы тока соответствуют очередным приходам поршней двигателя в верхнюю мертвую точку. Силу, действующую на поршень, можно представить равной:

$$F = PS,$$

где P — давление в цилиндре двигателя;

S — площадь поршня.

Максимальная величина данной силы будет определяться зависимостью:

$$F_{max} = \frac{P_k \pi d^2}{4},$$

где P_k — давление в конце такта сжатия;
 d — диаметр поршня.

Вывод о том, что момент сопротивления прокручиванию коленчатого вала и ток, потребляемый стартером при проворачивании двигателя, изменяются синусоидально от угла поворота коленчатого вала, подтверждается и экспериментальным путем.

Сущность натурального эксперимента заключается в том, что отключают подачу топлива в цилиндры двигателя, тем самым обеспечивают невозможность пуска двигателя. Аккумуляторная батарея должна быть заряжена. В осциллографическом устройстве с функцией запоминания изображения, используемом для анализа синусоидального сигнала, на экран которого специально наносят шкалу соответствия между определяемым осциллографическим устройством изображением кривой и значением величины давления в цилиндрах двигателя, устанавливают необходимый режим и масштаб измерений. Подключают осциллограф к аккумуляторной батарее диагностируемого двигателя. Датчик стробоскопа соединяют со штуцером или топливопроводом топливного насоса высокого давления (ТНВД) первого цилиндра. Стартером прокручивают не более 10 с коленчатый вал диагностируемого двигателя без инициализации рабочего процесса. Одновременно с этим стробоскоп направляют на начало экрана осциллографического устройства с той стороны, откуда появляется при прокрутке коленчатого вала двигателя кривая в форме синусоиды на уровне её максимального значения. Стробоскоп осветит точку на синусоиде. Контролируют прохождение этой точки, которая будет находиться на одной из вершин синусоиды и соответствовать приходу поршня первого цилиндра в верхнюю мертвую точку на такте сжатия, по всему экрану осциллографического устройства и при перемещении точки в противоположную часть экрана фиксируют и запоминают положение синусоиды при помощи осциллографического устройства. Выводят запомненное положение синусоиды на экран. Зная максимум синусоиды, который соответствует моменту прихода поршня первого цилиндра в верхнюю мертвую точку на такте сжатия, порядок работы цилиндров двигателя, используя специальную шкалу экрана осциллографического устройства, делают заключение о техническом состоянии деталей кривошипно-

шатунного и газораспределительных механизмов отдельных цилиндров двигателя [10–12].

Таким образом, с помощью формализованного описания процессов, происходящих в механизмах двигателя, была разработана диагностическая модель двигателя внутреннего сгорания военной автомобильной техники, которая стала основой нового метода диагностирования. Результатом формализованного описания стал обоснованный вывод о том, что момент сопротивления вращению коленчатого вала и ток, потребляемый стартером в момент прокручивания маховика, а, следовательно, и коленчатого вала диагностируемого двигателя без его пуска, изменяется синусоидально, причем максимумы тока соответствуют очередным приходам поршней двигателя в верхнюю мертвую точку.

Список источников

1. Игнатьев С.В., Нечаев В.В. Оценка эффективности функционирования и направления совершенствования процессов поддержания и обеспечения работоспособного состояния военной автомобильной техники // Вопросы оборонной техники. Серия 16. Технические средства противодействия терроризму. 2020. № 1–2 (139–140). С. 36–42.
2. Нечаев В.В., Дубовский В.А. Формализованное описание процесса локализации отказа, возникающего при эксплуатации военной автомобильной техники // Вестник ВА МТО им. А.В. Хрулева. 2020. № 1 (21). С. 58–64.
3. Картуков А.Г., Нечаев В.В. Метод определения разброса компрессии в цилиндрах двигателя внутреннего сгорания при прокрутке коленчатого вала // Двигателестроение. 2017. № 1 (267). С. 31–33.
4. Нечаев В.В. Моделирование системы регламентированного технического обслуживания автомобильной техники // Строительные и дорожные машины. 2019. Вып. 12. М.: Инновационное машиностроение. С. 37–40.
5. Малкин В.С. Теоретические основы технической эксплуатации: конспект лекций для студентов вузов. Тольятти: ТГУ, 2004. 242 с.
6. Нечаев В.В., Головкин К.В. Метод определения технического состояния цилиндропоршневой группы двигателя по величине давле-

ния газов в картере // Двигателестроение. 2018. Вып. 4 (284). С. 31–34.

7. Патрин А.Н., Нечаев В.В., Меркушов Ю.Н. Функциональное диагностирование электромагнитных форсунок впрысковых ДВС с искровым зажиганием // Автомобильная промышленность. 2007. № 8. С. 29–31.

8. Нечаев В.В., Воробьев Е.В., Тарасенко А.А. Методики технического диагностирования цилиндропоршневой группы дизелей холодной пусковой прокруткой коленчатого вала // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3 (50). С. 23.

9. Аринин И.Н. Техническая эксплуатация автомобиля: учеб. пособие для вузов. Ростов: Феникс, 2015. 308 с.

10. Программа для расчета скорости движения двухзвенной гусеничной машины на плаву: свид. о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661584 Рос. Федерация. № 023660233; заявл. 11.05.2023; опубл. 01.06.2023, Бюл. № 6.

11. Способ эксплуатации автомобильной техники: пат. 2731740 Рос. Федерация. № 201914383; заявл. 23.12.2019; опубл. 08.09.2020, Бюл. № 25. 7 с.

12. Способ комплексного диагностирования двигателя и агрегатов трансмиссии автомобильной техники: пат. 2788020 Рос. Федерация. № 2021134460; заявл. 24.11.2021; опубл. 16.01.2023, Бюл. № 2. 17 с.

References

1. Ignatiev S.V., Nechaev V.V. Evaluation of the effectiveness of functioning and directions for improving the processes of maintaining and ensuring the operational condition of military automotive equipment // Issues of defense technology. Series 16. Technical means of countering terrorism. 2020. № 1–2 (139–140). Pp. 36–42.

2. Nechaev V.V., Dubovsky V.A. A formalized description of the process of localization of failure occurring during the operation of military vehicles // Bulletin of the Military Academy of

Logistics named after A.V. Khrulev. 2020. № 1 (21). Pp. 58–64.

3. Kartukov A.G., Nechaev V.V. Method for determining the compression spread in the cylinders of an internal combustion engine when scrolling the crankshaft // Engine engineering. 2017. № 1 (267). Pp. 31–33.

4. Nechaev V.V. Modeling of the system of regulated maintenance of automotive equipment // Construction and road vehicles. Issue 12. Moscow: Innovative Mechanical Engineering, 2019. Pp. 37–40.

5. Malkin V.S. Theoretical foundations of technical operation. Lecture notes for university students. Tolyatti: TSU, 2004. 242 p.

6. Nechaev V.V., Golovko K.V. Method of determining the technical condition of the cylinder piston group of the engine by the amount of gas pressure in the crankcase // Engine building. Issue 4 (284). St. Petersburg: Ecology, 2018. Pp. 31–34.

7. Patrin A.N., Nechaev V.V., Merkushev Yu.N. Functional diagnostics of electromagnetic injectors of internal combustion engines with spark ignition // Automotive industry. 2007. No 8. Pp. 29–31.

8. Nechaev V.V., Vorobyov E.V., Tarasenko A.A. Methods of technical diagnostics of the cylinder piston group of diesel engines by cold cranking // Engineering Bulletin of the Don. 2018. № 3 (50). 23 p.

9. Arinin I.N. Technical operation of a car [Text]: A textbook for universities. Rostov: Feniks Publ., 2015. 308 p.

10. Program for calculation of speed of two-track crawler machine afloat: certificate of state registration of computer program № 2023661584 Ros. Federation. No. 023660233; filed. 11.05.2023; published 01.06.2023, Bulletin No. 6.

11. Method of operation of automobile equipment: patent. 2731740 Ros. Federation. No. 201914383; avv. 23.12.2019; published 08.09.2020, Bulletin No. 25. 7 p.

12. Method of complex diagnostics of engine and transmission units of automotive equipment: patent. 2788020 Ros. Federation. No. 2021134460; avv. 24.11.2021; published 16.01.2023, Bulletin No. 2. 17 p.