

**Список литературы:**

1. Алёхин В.И. Моделирование теплового и напряженно-деформированного состояния поршня с учетом дислоцированных дефектов усадочного характера / В.И. Алёхин, О.В. Акимов, А.В. Белогуб // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2010. – №19. – С. 12 – 18. 2. Алёхин В.И. Методология расчета детали поршня на прочность в местах дислокации дефектов усадочного характера / В.И. Алёхин, А.В. Белогуб, О.В. Акимов // Двигатели внутреннего сгорания – 2010. – №2. – С. 62 – 65. 3. Алехин В. И. Расчет влияния дислоцированных литейных дефектов усадочного характера на прочность литой детали поршня / В. И. Алехин, А. В. Белогуб, О. В. Акимов // Литейщик России. – 2011. – №4. – С. 16 – 19. 4. Алёхин В.И. Исследование влияния размеров литейных дефектов на напряженно-деформированное состояние поршня / В.И. Алёхин, А.В.

Белогуб, О.В. Акимов // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – №2. – С. 99 – 103.

**Bibliography (transliterated):**

1. Alyokhin V.I. Modelirovanie teplovogo i napryazhenno-deformirovannogo sostojanija porshnja s uchetom dislocirovannyh defektov usadochnogo haraktera / V.I. Alyokhin, O.V. Akimov, A.V. Belogub // Vestnik NTU «HPI». Sbornik nauchnyh trudov. – 2010. – №19. – S. 12 – 18. 2. Alyokhin V.I. Metodologija rascheta detali porshnja na prochnost' v mestah dislokacii defektov usadochnogo haraktera / V.I. Alyokhin, A.V. Belogub, O.V. Akimov // Dvigateli vnutrennego sgoranija – 2010. – №2. – S. 62 – 65. 3. Alyokhin V. I. Raschet vlijanija dislocirovannyh litejnyh defektov usadochnogo haraktera na prochnost' litoj detali porshnja / V. I. Alyokhin, A. V. Belogub, O. V. Akimov // Litejnik Rossii. – 2011. – №4. – S. 16 – 19. 4. Alyokhin V.I. Issledovanie vlijanija razmerov litejnyh defektov na napryazhenno-deformirovannoe sostojanie porshnja / V.I. Alyokhin, A.V. Belogub, O.V. Akimov // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2011. – №2. – S. 99 – 103.

УДК 621.002

**К.Н. Осипов, инж., Е.Л. Первухина, д-р техн. наук, Ю.Л. Рапацкий, канд. техн. наук**

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВС

**Введение**

Задача улучшения показателей технологического процесса приемосдаточных испытаний современных поршневых двигателей внутреннего сгорания с микропроцессорными системами управления по-прежнему остается актуальной для отечественного двигателестроения и авторемонтного производства [1, 2]. Особую трудность представляют испытания современных инжекторных ДВС, у которых электронная система управления двигателем в процессе работы регулирует значения угла опережения зажигания, момента открытия форсунок, длительность впрыска топлива и т.д. Это объясняется тем, что, с одной стороны, используемые в отечественном серийном производстве методы и средства испытаний уже не соответствуют уровню сложности испытываемых двигателей, требованиям к их качеству, в том числе, надежности, и тем, что, с другой стороны, предприятия-изготовители вынуждены сокращать производственные затраты.

Обзор литературы последних лет, например [3], показал, что к настоящему времени практически отсутствуют подходы к решению поставленной задачи в условиях массового производства, учитывающие особенности конструкции инжекторных двигателей и экономические возможности отечественных предприятий.

В связи с этим возникает необходимость совершенствования методики испытаний, прежде

всего, на основе простых моделей испытываемых двигателей и существующих программных средств.

Целью настоящей работы является улучшение показателей технологического процесса приемосдаточных испытаний поршневых ДВС путем совершенствования методики управления испытаниями и оценки качества изготовления новых двигателей в процессе их функционирования на неустановившихся режимах.

**Основная часть**

Согласно общепринятой классификации испытаний целью приемосдаточных испытаний ДВС является оценка качества сборки и проверка соответствия двигателей техническим характеристикам, указанным в нормативно-технической документации [3].

По действующим стандартам (ГОСТ 14846) такую оценку проводят на основе измерений диагностических параметров через равноотстоящие промежутки времени на нескольких установившихся режимах работы испытываемых двигателей, как правило, соответствующих максимальной мощности, максимальному крутящему моменту и холостому ходу. Под диагностическими параметрами двигателей понимают: крутящий момент, среднюю эффективную мощность, часовой и удельный расход топлива, давление масла в основной магистрали и т.д. Испытания проводят операторы с разным уровнем квалификации и опытом

работы; сроки, количество диагностических параметров и стоимость испытаний ограничены; обработка измерительной информации осуществляется по традиционным методикам статистического анализа. Действующая программа приемосдаточных испытаний, утвержденная ТУ на конкретную модель двигателя, не предусматривает проверки соответствия двигателей требуемым показателям мощности и экономичности из-за стремления предприятий снизить затраты на эксплуатацию устаревшего диагностического оборудования. Такую проверку осуществляют в ходе контрольных испытаний, которые проводят не чаще одного раза в месяц только для одного двигателя, выбранного из партии случайным образом.

Сказанное выше объясняет отчасти, почему в серийном отечественном производстве ДВС значения точности и достоверности результатов испытаний ниже требуемого уровня, регламентированного международными стандартами качества современного производства.

Можно выделить главные недостатки существующей методики приемосдаточных испытаний: проведение испытаний на установившихся режимах работы испытуемых двигателей и использование классических статистических методов для обработки измерительной информации.

В современных условиях серийного производства задача дальнейшего совершенствования технологического процесса приемосдаточных испытаний может быть решена совершенствованием системы управления процессом испытаний, а также созданием новых методов и алгоритмов обработки измерительной информации.

Достижение указанной цели связано с выбором информативных диагностических параметров, формированием методики испытаний, алгоритмов обработки измерительной информации и определением управляющих воздействий в системе испытаний, обеспечивающих получение достоверной информации о техническом состоянии испытуемых двигателей.

Для определения множества информативных диагностических параметров проведен анализ вероятных неисправностей новых двигателей. Установлено, что наиболее часто встречающиеся неисправности новых двигателей могут быть разделены на три группы: неисправности, вызванные дефектами механической обработки; неисправности из-за неточностей сборочного процесса; неисправности, вызванные погрешностями регулировок. В про-

центном соотношении наибольшее количество неисправностей связано с погрешностями сборочного процесса, вызванными отклонениями от требуемых значений величин осевых сил, обеспечивающих силовое замыкание сопряжений, и проявляется, в том числе, в увеличении монтажных зазоров, разгерметизации различных систем ДВС. Данные неисправности проявляются в виде увеличения механических потерь на трение, изменения температуры рабочих жидкостей, снижения мощности и т.д., при воздействии на сопряжения и детали двигателей знакопеременных нагрузок при смене режимов работы ДВС. Поэтому для повышения достоверности результатов испытаний новых двигателей требуется обеспечить необходимые условия нагружения деталей и сопряжений ДВС, что возможно только на неустановившихся режимах их работы. Информативными параметрами являются: часовой  $G_t$  и удельный  $g_e$  расход топлива, крутящий момент  $M_k$ , температура охлаждающей жидкости  $T_{ОЖ}$ , абсолютное давление воздуха во впускном коллекторе  $P_a$ , давление масла  $P_M$ , концентрация двухвалентного оксида углерода  $CO$  и непредельных углеводородов  $C_nH_m$  в отработавших газах [4,5].

Основные этапы предлагаемой методики испытаний с использованием усовершенствованных обкаточно-тормозных стендов, например [2], следующие.

На первом этапе коленчатый вал ДВС вращают от внешнего источника (электродвигателя). Затем для выявления грубых нарушений технологии сборки и предотвращения аварийных ситуаций (напр., заклиниваний), а также для оценки давления механических потерь в момент пуска ДВС контролируют пусковой крутящий момент, развиваемый электродвигателем (рис.1).

После завершения холодной обкатки двигатель останавливают на 15 – 20 сек. Затем подключают топливный трубопровод и вновь запускают двигатель, используя штатную систему зажигания. Максимальное количество попыток пуска ДВС не должно превышать трех (ТУ завода-изготовителя). Если ДВС не запускается, его считают неисправным. При нормальном пуске двигатель переводят в режим холостого хода. В этом режиме работа ДВС поддерживается автоматически и продолжается 240 секунд. По окончании работы двигателя на холостом ходу проверяется значение температуры охлаждающей жидкости. Значение ниже  $50^{\circ}C$  свидетельствует о наличии неисправностей. Если температура охлаждающей жидкости в норме, проводит-

ся калибровка и регулировка основных систем ДВС.

После завершения регулировочных работ система управления испытаниями измеряет и прогнозирует значения давления масла и концентрации токсических компонентов в отработавших газах, а также повторно проверяет тепловое состояние ДВС. Измерение параметров производится с интервалом 60 с. Продолжительность процесса составляет 300 с. Если параметры в норме, система переходит в автоматизированный режим оценки технического состояния механизмов ДВС (рис.2).

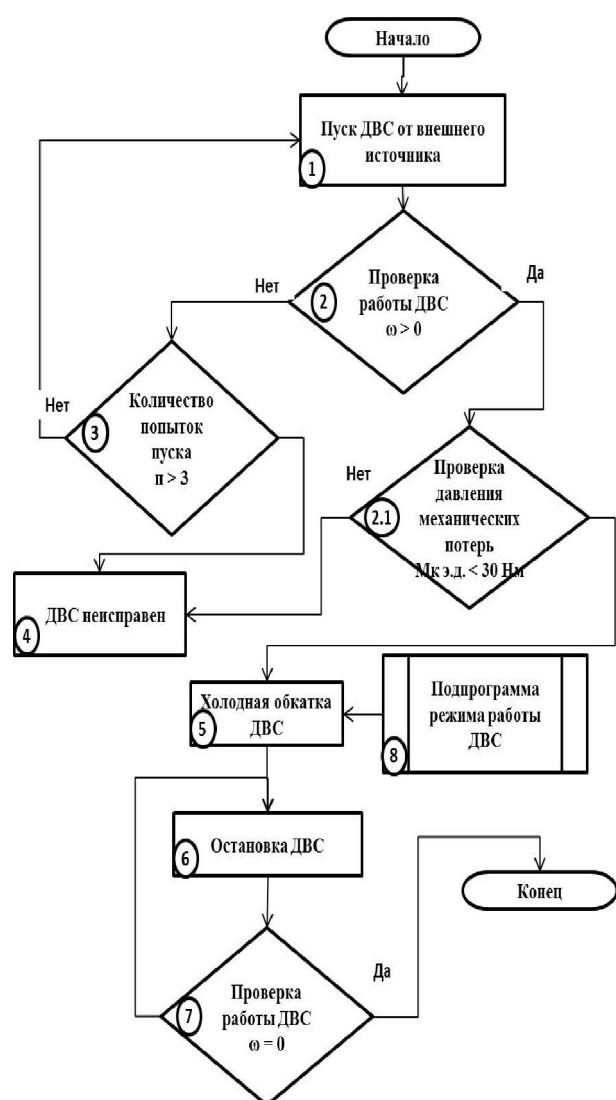


Рис. 1. Алгоритм холодной обкатки ДВС

Автоматизированная оценка технического состояния основных механизмов ДВС в отличие от существующих методик приемосдаточных испытаний реализуется на неустановившихся режимах работы двигателей (блок 1). Задание режимов работы осуществляется регулированием нагрузки и

частоты вращения коленчатого вала. Аналитическая зависимость, описывающая закон управления режимами работы испытуемых двигателей, задается в виде системы алгебраических уравнений (блок 2).

Для сокращения затрат на обслуживание динамометрического оборудования значения крутящего момента и удельного расхода топлива вычисляются по эмпирическим моделям, описывающим связи между параметрами (блок 3 – 5). Алгоритм получения таких зависимостей подробно описан в работе [7].

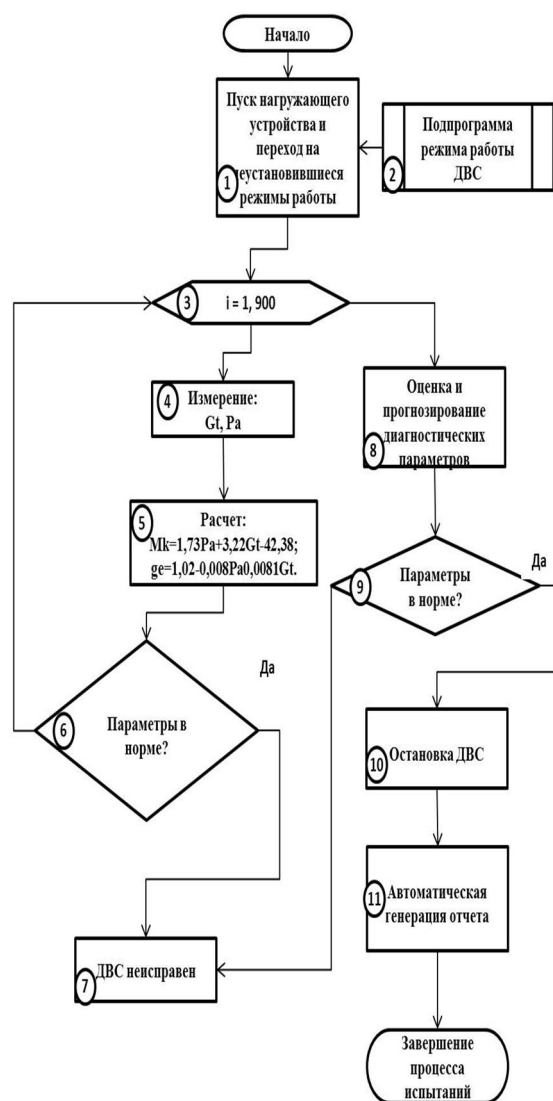


Рис. 2. Алгоритм оценки технического состояния ДВС

В случае успешной реализации цикла 3 – 6 система испытаний переходит к блоку прогнозирования значений диагностических параметров для оценки возможности завершения процесса испытаний (блок 8).

Реализация приемосдаточных испытаний на неустановившихся режимах работы ставит задачу достоверного и точного определения значений диагностических параметров, вызванных случайными погрешностями измерений быстроизменяющихся величин. Задача может быть решена на основе известных алгоритмов оценивания случайных процессов измерений информативных параметров, например, фильтра Калмана [6].

Расчет прогнозных значений диагностических параметров рассмотрим на примере изменения трех диагностических параметров ДВС МеМз – 3071: средней эффективной мощности  $N_e$  (кВт), часового  $G_t$  (кг/час) и удельного  $g_e$  (кг/кВт час) расходов топлива (рис.3).

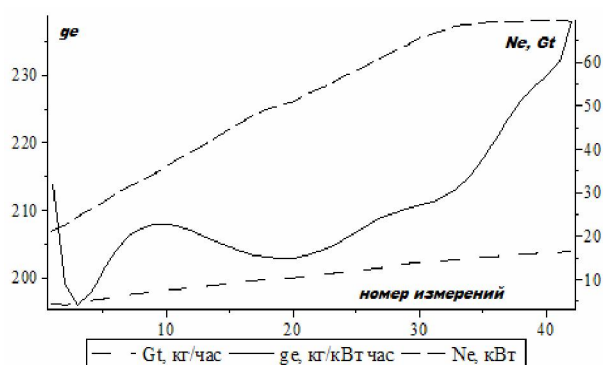


Рис. 3. Диагностические параметры ДВС МеМз – 3071

Измеренные значения параметров в момент времени  $t = 1, \dots, T$  образуют вектор  $z_t = (Z_{1,t}, \dots, Z_{l,t})^T$ ,  $l = 1, \dots, 3$ . Его изменение во времени представляет многомерный случайный процесс.

На первом этапе прогнозирования строятся эмпирические модели, описывающие взаимосвязи между отдельными элементами вектора  $z_t$ . Алгоритм получения таких зависимостей подробно описан в работах [7,8].

Модель включает уравнение состояния

$$q_t = \Pi_0 + Aq_{t-1} + \omega_{t-1}, \quad (1)$$

где  $q_t = [g_{et} \quad G_{tt} \quad N_{et}]^T$ ,  $(\omega_{t-1})$  – вектор шума размером  $3 \times 1$ ,  $\Pi_0 = [394 \quad 16,2 \quad -8,14]^T$  –  $3 \times 1$  матрица-столбец коэффициентов,

$$A = \begin{pmatrix} -0,92 & 29,1 & -5,9 \\ -0,077 & 2,03 & -0,21 \\ 0,047 & 1,55 & 6,28 \end{pmatrix} \text{ – квадратная } 3 \times 3 \text{ матрица}$$

перехода состояний,

и уравнение наблюдений

$$y_t = Bq_t, \quad (2)$$

где  $y_t$  есть  $3 \times 1$  вектор наблюдения,  $B$  –  $3 \times 3$  матрица наблюдения.

Фильтр Калмана, позволяющий по известным значениям вектора наблюдения прогнозировать значения вектора состояния, описывается следующим алгоритмом.

Первый шаг алгоритма заключается в определении априорной оценки вектора состояния по формуле:

$$\hat{q}_{t/t-1} = A\hat{q}_{t-1} + \Pi_0. \quad (3)$$

Индекс  $t/t-1$  означает, что оценивание вектора  $q_t$  в момент времени  $t$  проводят по результатам наблюдений до момента времени  $t-1$ .

При поступлении нового наблюдения  $y_t$  на вход фильтра корректируют априорную оценку  $\hat{q}_{t/t-1}$ :

$$\hat{q}_t = \hat{q}_{t/t-1} + K_t \cdot z_t \quad (4)$$

$$z_t = y_t - B\hat{q}_{t/t-1} \quad (5)$$

$z_t$  — остаточные члены, являющиеся последовательностью «белого» шума,  $K$  – матрица коэффициентов усиления, вычисляемая по формуле:

$$K_t = P_{t/t-1} B^T [B P_{t/t-1} B^T + G Q_t G^T]^{-1}. \quad (6)$$

На последнем шаге алгоритма определяются прогноз значения вектора состояния:

$$\hat{q}_{t+1/t} = A \cdot \hat{q}_{t/t} + K_t z_t. \quad (7)$$

Результаты использования алгоритма (1) – (7) представлены на рис. 4.

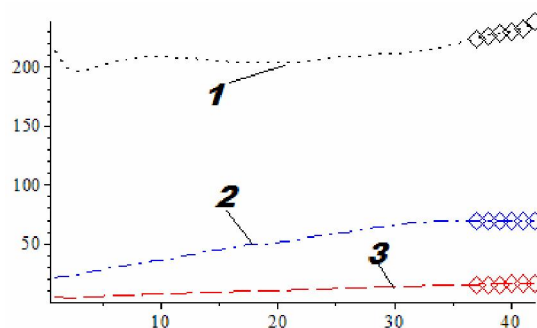


Рис. 4. Прогнозирование диагностических параметров ДВС: 1 –  $g_e$ ; 2 –  $N_e$ ; 3 –  $G_t$

Последний этап (блок 10, 11) предполагает остановку ДВС и формирование электронного отчета о результатах испытаний.

Процедуры автоматизированного расчета

крутящего момента и удельного расхода топлива по результатам измерения часового расхода топлива и абсолютного давления воздуха во впускном коллекторе, оценивания и прогнозирования значений измерительных последовательностей диагностических параметров реализованы на базе прикладного программного обеспечения *Maple V* в среде Windows, 2000, XP. Входная информация представляет последовательности диагностических параметров, технические характеристики ДВС, время упреждения прогнозных значений, количество измерений.

Выходами программы являются уточненные значения коэффициентов модели, значения мощностных и экономических показателей ДВС, оценочные и прогнозные значения диагностических параметров, выход оценочных и прогнозных значений диагностических параметров за допустимые пределы.

Главным отличием усовершенствованной методики от существующих является применение неустановившихся режимов работы испытуемых двигателей при переменной нагрузке, что позволяет выявлять производственные дефекты двигателей уже на стадии испытаний.

#### **Список литературы:**

1. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов / В.И. Пронякин // Измерительная техника. – 2008. – №10. – С 9 – 13. 2. Пат. 63767 України, G01M 15/00. Навантажувальний пристрій стенда для випробувань двигунів внутрішнього згорання / К.М. Осипов, О.Л. Первухіна, Ю.Л. Рапацький; заявник та патентовласник Севастопольський нац. тех. ун-т. – №2011 01419; заявл. 08.02.2011; опубл. 25.10.2011, бюл. №20. 3. Atkins R. An introduction to engine testing and development / R. Atkins. – USA: SAE International, 2009. – 307 p. 4. Осипов К.Н. Совершенствование методики приемосдаточных испытаний двигателей внутреннего

сгорания после сборки на основе зависимостей между параметрами / К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина, Ю.Л. Рапацкий // Проблемы машиностроения и надежности машин, РАН, Россия. – 2011. – №2. – С. 93-99. 5. Осипов К.Н. Определение режимов приемосдаточных испытаний ДВС / К.Н. Осипов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: междунар. сб. науч. тр. – 2011. – Вып. 41. – С. 261 – 266. 6. Pervukhina, E., Emmenegger J.-F. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89. 7. Первухина Е.Л., Голикова В.В., Сопин П.К. Статистическое моделирование машиностроительных изделий по диагностическим параметрам // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2008. – №6. – С. 89-95. 8. Осипов К.Н. Прогнозирование значений диагностических параметров ДВС в ходе производственных испытаний / К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина, П.К. Сопин // Вестник СевНТУ. Механика, энергетика, экология: сб. науч. ст. – 2010. – Вып. 106 – С. 84 – 88.

#### **Bibliography (transliterated):**

1. Pronjakin V.I. Problemy diagnostiki ciklicheskih mashin i mehanizmov / V.I. Pronjakin // Izeritel'naja tehnika. – 2008. – №10. – S 9 – 13. 2. Pat. 63767 Ukraini, G01M 15/00. Navantazhuval'nij pristirij stenda dlja viprobuvan' dviguniv vnutrishn'ogo zgorjannja / K.M. Osipov, O.L. Pervuhina, Ju.L. Rapackij; zajavnik ta patentovlasnik Sevastopol's'kij nac. teh. un-t. – №2011 01419; zajavl. 08.02.2011; opubl. 25.10.2011, bjul. №20. 3. Atkins R. An introduction to engine testing and development / R. Atkins. – USA: SAE International, 2009. – 307 p. 4. Osipov K.N. Sovershenstvovanie metodiki priemodatocnyh ispytanj dvigatelej vnutrennego sgoranja i nadezhnosti mashin, RAN, Rossija. – 2011. – №2. – S. 93-99. 5. Osipov K.N. Opredelenie rezhimov priemodatocnyh ispytanj DVS / K.N. Osipov // Progressivnye tehnologii i sistemy mashinostroenija: mezhdunar. sb. nauch. tr. – 2011. – Vyp. 41. – S. 261 – 266. 6. Pervukhina, E., Emmenegger J.-F. Adaptive time series filters obtained by minimization of the Kullback-Leibler divergence criterion // International Journal of Applied Mathematics, 2005. – Vol. 17. – № 1. – P.69-89. 7. Pervuhina E.L., Golikova V.V., Sopin P.K. Statisticheskoe modelirovanie mashino-stroitel'nyh izdelij po diagnosticheskim parametram // Problemy mashinostroenija i nadezhnosti mashin. – 2008. – №6. – S. 89-95. 8. Osipov K.N. Prognozirovanie znachenij diagnosticheskikh parametrov DVS v hode proizvodstvennyh ispytanj / K.N. Osipov, E.L. Pervuhi-na, P.K. Sopin // Vestnik SevNTU. Mehanika, jenergetika, jekologija: sb. nauch. st. – 2010. – Vyp. 106 – S. 84 – 88.