

**СНИЖЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ  
НА ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ  
ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ ДВС**

*Снижение влияния ошибок измерений на достоверность результатов приемосдаточных испытаний ДВС достигается моделированием зависимостей между нестационарными процессами изменения значений их диагностических параметров и построением адаптивного дискретного фильтра.*

*Ключевые слова: ДВС, приемосдаточные испытания, диагностические параметры, моделирование, дискретный фильтр.*

Для отечественного серийного производства двигателей внутреннего сгорания (ДВС) задача повышения эффективности технологического процесса приемосдаточных испытаний остается по-прежнему актуальной [1]. Постоянный рост требований к качеству, надежности и конкурентоспособности отечественных двигателей, с одной стороны, и необходимость снижения затрат на их производство, с другой стороны, определяют необходимость повышения точности и достоверности результатов испытаний без значительных капитальных вложений. Решение задачи может быть достигнуто на основе разработки и применения современных методов управления испытаниями и перспективных технологий анализа измерительной информации.

К настоящему времени существует большое число методов анализа измерительной информации (например, [2]), однако трудно указать методы, которые могут быть использованы в серийном производстве для достижения указанных целей.

Основной и наиболее сложной задачей приемосдаточных испытаний ДВС является достоверное определение в течение короткого интервала времени значений величин структурных параметров, характеризующих техническое состояние двигателей, по результатам измерения ограниченного множества диагностических параметров, которые функционально зависят от структурных. Решение этой зада-

чи во многом определяется адекватностью используемых математических моделей измерительной информации и точностью проводимых измерений.

Целью данной работы является снижение влияния ошибок измерений на достоверность результатов приемосдаточных испытаний, полученных использованием эмпирических моделей, описывающих зависимости между нестационарными процессами изменения значений диагностических параметров ДВС, и адаптивного дискретного фильтра.

Алгоритм получения таких зависимостей подробно описан в работах [3-6, 8]. Значения диагностических параметров являются случайными. Последовательности результатов их измерения в равноотстоящие моменты времени представляют нестационарные дискретные случайные процессы даже при работе двигателей на установившихся режимах. Моделирование таких процессов традиционными статистическими методами приводит к большим погрешностям, которые могут быть уменьшены современными методами статистического анализа и адаптивной фильтрации. Для этого формируется случайный  $1 \times 1$ -вектор  $x_t = (X_{1,t}, \dots, X_{k,t}, \dots, X_{l,t})^T$ , в каждый момент времени  $t$  содержащий значения  $l$  параметров,  $k = 1 \div l$  – номер параметра. Упорядоченные по времени последовательности, или скалярные случайные процессы, изменения диагностических параметров образуют единый многомерный случайный процесс. Между отдельными элементами многомерного процесса определяются зависимости, которые для исправных объектов имеют характер случайных, но стационарных, линейных комбинаций.

Так, например, для ДВС МеМз – 3071 крутящий момент  $M_k$ , наиболее информативный, но сложно измеримый параметр, характеризующий динамические свойства двигателей, связан с давлением воздуха во впускном коллекторе  $P_a$  и часовым расходом топлива  $G_t$  стационарной зависимостью:

$$M_{k_t} = 1.37 \cdot P_{a_t} + 3.22 \cdot G_{t_t} - 42.38 + \varepsilon_t, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_t$  – нормально распределенная ошибка моделирования с нулевым математическим ожиданием и конечной дисперсией.

Измеренные в ходе испытаний значения крутящего момента позволяют оценить значения механических потерь в сопряжениях

новых деталей, определить качество сборки основных механизмов, а так же способность нового двигателя выполнять свои функции в условиях будущей эксплуатации. Однако из-за необходимости сокращения затрат на проведение испытаний в отечественном производстве измерения значений крутящего момента на этапе приемосдаточных испытаний не проводят. В этих условиях требуемые для достоверной оценки технического состояния ДВС значения крутящего момента могут быть рассчитаны по зависимости (1), алгоритм получения которой детально описан в [5].

При определении коэффициентов модели (1) предполагалось, что значения крутящего момента  $M_k$  в левой части уравнения могут содержать ошибки, тогда как значения параметров  $P_a$  и  $G_t$ , стоящих в правой части – нет. Однако в условиях производственных стендовых испытаний очень сложно обеспечить безошибочные измерения значений  $P_a$  и  $G_t$ . Поэтому должны быть предусмотрены способы снижения влияния ошибок измерений на достоверность результатов вычисления значений  $M_k$  по уравнению (1) и, как следствие, на результаты приемосдаточных испытаний в целом.

Вычислительный эксперимент проведен по результатам испытаний малолитражных инжекторных двигателей модельного ряда MeMz – 3071 с помощью ППО RATS [9] и Maple V. Измерения параметров проводились на обкаточно-тормозном стенде с использованием рычажно-весовых устройств и датчиков проволочного типа. Интервал между измерениями составлял 7,5 секунд и рассчитывался, исходя из быстродействия измерительных устройств и теоремы Котельникова.

Если диагностические параметры ДВС измерены с допустимой погрешностью (не более 0,5% для значений  $P_a$  и  $G_t$  и не более 4% для значений  $M_k$  по ГОСТ 14846) (рис.1,2), то отклонение расчетных значений крутящего момента от измеренных значений не превышает 1,2% (рис.3).

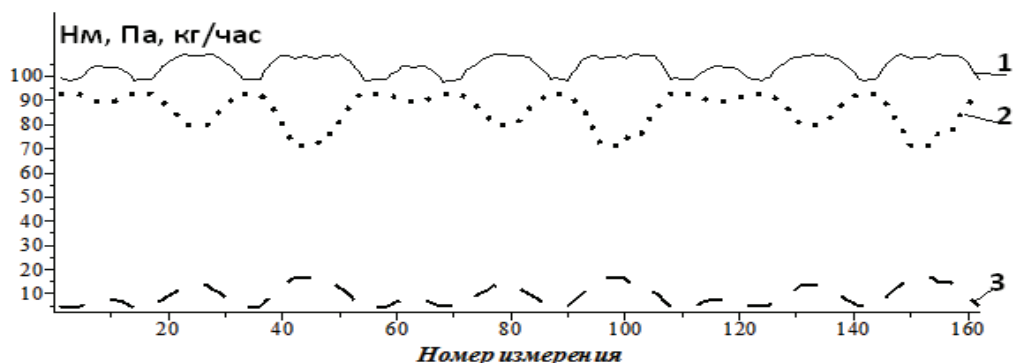


Рисунок 1 – Измерительные последовательности диагностических параметров ДВС: 1 – крутящий момент, Нм, 2 – давление воздуха во впускном коллекторе, Па, 3 – часовой расход топлива, кг/час

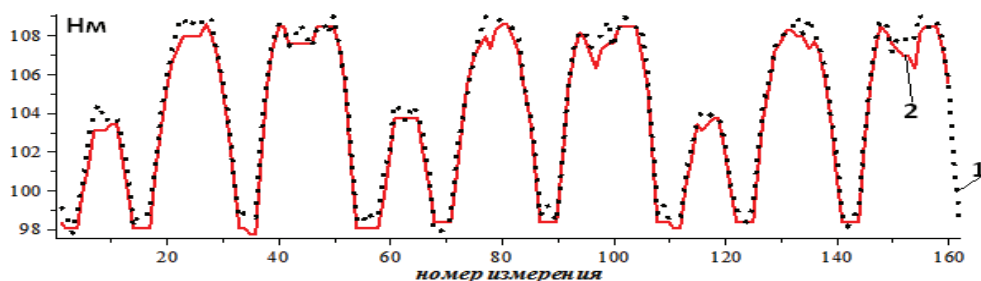


Рисунок 2 – Расчетные (2) и измеренные (1) значения крутящего момента ДВС

Отклонение расчетных значений крутящего момента от измеренных значений характеризует относительная ошибка:

$$\varepsilon_t = \frac{Mk_t^u - Mk_t^r}{Mk_t^u} \cdot 100\% \quad (2)$$

где  $Mk_t^u$  – измеренное значение крутящего момента,  $Mk_t^r$  – расчетное значение крутящего момента.

Отклонения случайны, независимы, распределены по закону, близкому к нормальному, а выборочные средние значения быстро устремляются к нулю (рис. 4, 5). Это подтверждает адекватность уравнения (1) измерительной информации и возможность его использования для оценки динамических показателей ДВС.

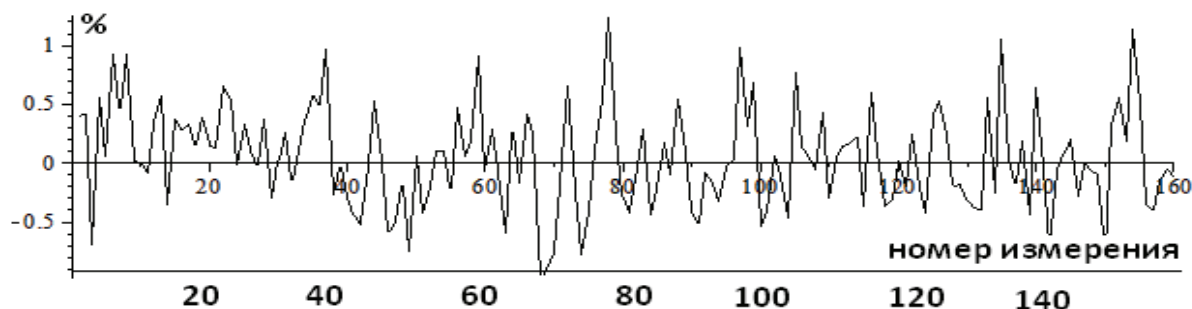


Рисунок 3 – Относительные ошибки моделирования значений крутящего момента

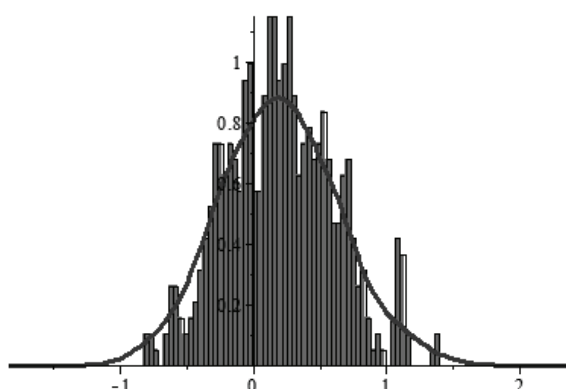


Рисунок 4 – Распределение значений ошибок моделирования

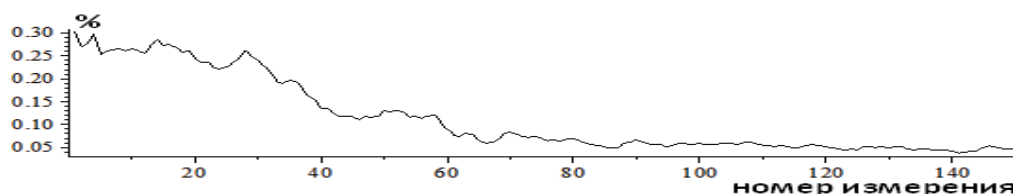


Рисунок 5 – Выборочные средние значения ошибок моделирования

Погрешности в результатах измерений, например, вызванные влиянием внешних факторов, погрешностями калибровок датчиков, а также преобразователей электрических сигналов в физические величины, приводят к отклонениям измеренных значений диагностических параметров от действительных (рис.6). Погрешности измерений представляют непрерывные случайные величины, как правило, распределенные по нормальному закону [7].

При появлении погрешностей измерений ошибки вычисления значений крутящего момента по уравнению (1) также увеличиваются (рис.7,8).

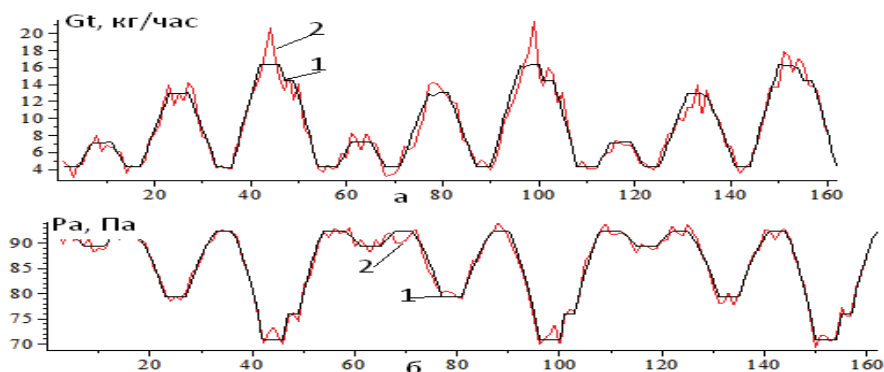


Рисунок 6 – Значения диагностических параметров, измеренные с погрешностью (2) и без погрешности (1): а – часовой расход топлива, б – давление воздуха во впускном коллекторе

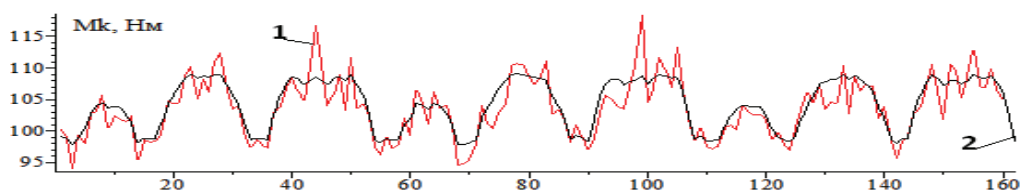


Рисунок 7 – Действительные (2) и расчетные (1) значения  $M_k$  при наличии погрешностей измерений

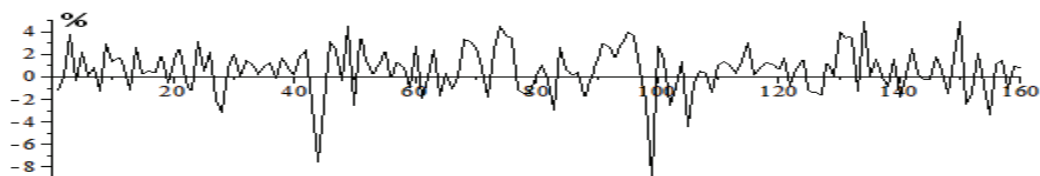


Рисунок 8 – Ошибки моделирования значений  $M_k$  при наличии погрешностей измерений

Изменение среднего значения ошибок моделирования, а также их распределение представлены на рис. 9, 10.

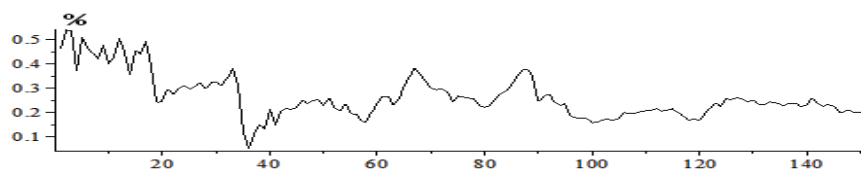


Рисунок 9 – Изменение среднего значения ошибок моделирования значений  $M_k$  при наличии ошибок в измерениях

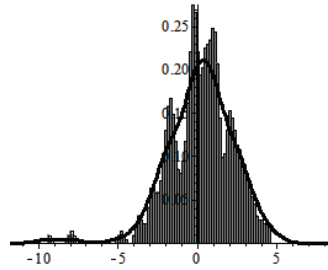


Рисунок 10 – Распределение ошибок моделирования значений  $M_k$  при наличии погрешностей измерений

Повышение точности вычисленных значений крутящего момента может быть достигнуто использованием адаптивного дискретного фильтра [8], построенного на основе информационного расхождения Кульбака-Лейблера между параметрами распределения истинного вектора состояния и его оценки и детально описанного, например, в [9].

Для этого модель (1) представлена в пространстве состояний:

$$x_t = A_0 + Ax_{t-1} + \omega_t, \quad (3)$$

$$y_t = Bx_t + v_t, \quad (4)$$

где  $x_t = [M_k \quad P_a \quad G_t]^T$  – вектор (состояний), содержащий действительные значения диагностических параметров,  $y_t$  – вектор измеренных значений диагностических параметров,  $\omega_t$  – внешние возмущения,  $A_0 = [57,3 \quad -36,4 \quad 39,1]^T$ ,

$$A = \begin{bmatrix} 1,71 & -1,25 & -2,81 \\ -1,1 & 2,46 & 3,58 \\ 0,85 & -1,20 & -1,85 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad - \text{ матрицы коэффициентов,}$$

полученные построением модели векторной авторегрессии для вектора диагностических параметров. Ошибки измерений включены в уравнение (4).

Первые два уравнения алгоритма совпадают с аналогичными уравнениями оптимального дискретного фильтра Калмана:

$$\hat{x}_{t/t-1} = A_0 + A\hat{x}_{t-1}, \quad (5)$$

$$\hat{x}_{t/t} = \hat{x}_{t/t-1} + K_t \left( y_t - B\hat{x}_{t/t-1} \right). \quad (6)$$

Здесь  $\hat{x}_{t/t-1}\sqrt{2}$  – априорная оценка вектора состояния  $x_t$  по наблюдениям  $y_{t-1}, \dots, y_0$ ,  $\hat{x}_{t/t}$  – апостериорная оценка  $x_t$  по наблюдениям  $y_t, y_{t-1}, \dots, y_0$ ,  $\left(y_t - B\hat{x}_{t/t-1}\right)$  – остаточные члены, или невязка;  $K_t$  – матрица коэффициентов. В отличие от фильтра Калмана, в используемом алгоритме матрица коэффициентов усиления  $K_t$  не содержит неизвестных вероятностных характеристик погрешностей и рассчитывается по формуле:

$$K_t = A\hat{\Sigma}_{t-1}A^TB \left[ BA\hat{\Sigma}_{t-1}A^TB^T + T_t \right]^{-1}, \quad (6)$$

где  $T_t$  – выборочная ковариационная матрица вектора наблюдений,  $\hat{\Sigma}_t$  – ковариационная матрица оценок вектора состояния.

Значения ковариационных матриц вектора наблюдений и оценок вектора состояния соответственно рассчитываются по формулам:

$$T_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( (y_i - \bar{y}_i) \cdot (y_i - \bar{y}_i)^T \right), \quad \bar{y}_i = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i y_k, \quad (7)$$

$$\hat{\Sigma}_t = [I - K_t B] A \cdot \hat{\Sigma}_{t-1} A^T [I - K_t B]^T + K_t T_t K_t^T, \quad (8)$$

$\hat{x}_t = E[\hat{x}_t]$ ,  $E[\cdot]$  – символ математического ожидания,  $I$  – единичная матрица. Фильтр (5)-(8) корректирует оценку вектора состояния по значению расхождения вероятностных характеристик оценки, полученной на предыдущем шаге оценивания, и истинного значения вектора состояния. В результате, снижается влияние погрешностей измерений на рассчитываемые по уравнению (1) значения крутящего момента. Эти значения и их отклонения от действительных значений параметров отражены графиками рис. 11 и 12.

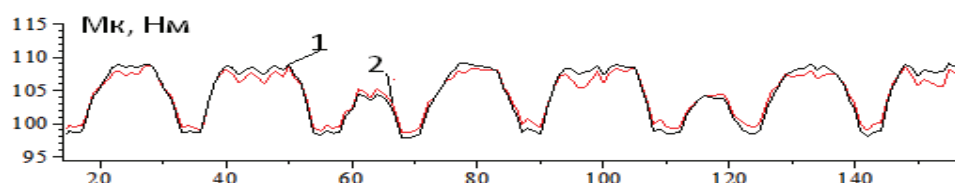


Рисунок 11 – Расчетные по сглаженным значениям диагностических параметров (2) и измеренные без погрешностей (1) значения  $M_k$



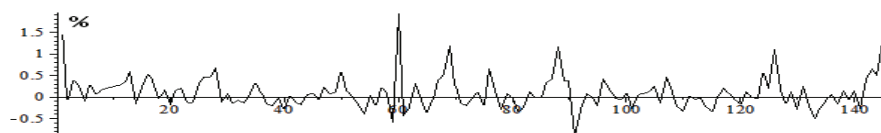


Рисунок 12 – Ошибки моделирования

Предложенный подход, позволяющий снизить влияние ошибок измерений на достоверности результатов приемосдаточных испытаний, предполагает статистическое моделирование процессов изменения значений информативных диагностических параметров ДВС, определение зависимостей между ними, и адаптивное оценивание значений диагностических параметров. Реализация указанных процедур не требует замены действующего контрольно-измерительного оборудования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Павленко Е.А. Статистические методы диагностирования технического состояния автомобильных транспортных средств / Е.А. Павленко // Автомобильная промышленность. – 2009. – №7 – С 29 – 30.
2. Халавян А.А. Statistic 6. Статистический анализ данных. 3-е изд. учеб. / А.А. Халавян. – М.: ООО «Бином-Пресс» – 2007 г. – 512 с.
3. Осипов К.Н. Контроль качества сборки ДВС на этапе приемосдаточных испытаний // К.Н. Осипов / сб. док. междунар. науч.-техн. семинара 20-21 октября 2011. г. Москва, 2011. – С.153 – 160.
4. Первухина Е.Л. Упрощение стохастических моделей в задачах оценки состояния машиностроительных изделий в ходе стендовых испытаний // Е.Л. Первухина, К.Н. Осипов, Т.Л. Степанченко / Системные технологии. Регіональний міжвузівський зб. наук. пр. – Випуск 2(73). – Дніпропетровськ, 2011. – С.153-159.
5. Первухина Е.Л. Обнаружение дефектов машиностроительных изделий в ходе приемосдаточных испытаний / Е.Л. Первухина, В.В. Голикова, К.Н. Осипов // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2010. – №5. – С. 97 – 105.
6. Осипов К.Н. Моделирование поршневых ДВС в ходе приемосдаточных испытаний по результатам измерений их диагностических параметров / К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина, Ю.Л. Рапацкий // Двигатели внутреннего сгорания. – 2011. – №2. – С. 130 – 134.
7. Маркин Н.С. Основы теории обработки результатов измерений / Н.С. Марков. – М.: Стандарт, 1991 г. – 176 с.
8. Голикова В.В. Оценка качества сборки двигателей внутреннего сгорания в ходе приемосдаточных испытаний / В.В. Голикова, К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина // Вестник КузГТУ. науч.-техн. журнал – 2010. – №6. – С 40 – 45.
9. 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.
10. Doan T.A. RATS Software Package, User's Manual, Version 8.0. / T.A. Doan. – Illinois: ESTIMA, 2010. – 550 p.