

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.002:681.324

В.В. Голикова, К.Н. Осипов, Е.Л. Первухина

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА СБОРКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ В ХОДЕ ПРИЕМОСДАТОЧНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Проблема оценки качества сборки двигателей внутреннего сгорания (ДВС) в ходе приемосдаточных испытаний до сих пор остается актуальной, несмотря на все существующие подходы к ее решению [1,2]. Это объясняется постоянным совершенствованием и усложнением конструкции современных ДВС, ужесточением требований к их качеству, надежности, экологической безопасности, отсутствием универсальных методов автоматизации испытаний, а также их высокой стоимостью.

Оценку качества сборки, в которую включены регулировочные и крепежные работы, в ходе приемосдаточных испытаний проводят методами неразрушающего контроля по измерениям диагностических параметров. К таким параметрам, как правило, относят параметры функционирования, отражающие значения структурных параметров (шероховатости, зазоров в сопряжениях и т.д.), т.е. техническое состояние двигателей.

Для четырехтактных двигателей внутреннего сгорания, устанавливаемых на наземный транспорт, основными диагностическими параметрами являются: крутящий момент, давление масла, рас-

ход топлива, температура масла, температура охлаждающей жидкости, разрежение во впускном коллекторе, содержание CO и CH₄ в отработавших газах, мощность механических потерь. Для ДВС, оборудованных электронной системой управления, к таким параметрам относят также длительность впрыска форсунок, степень открытия клапана холостого хода и т.д. Решение о годности двигателей к эксплуатации формируют в результате сравнения измеренных значений диагностических параметров с допустимыми значениями (при возможном отклонении от номинальных значений до 5%). Измерение и обработку измерительной информации в ходе испытаний на ряде предприятий до сих пор осуществляют вручную. Это приводит к погрешностям, снижению достоверности и, как следствие, принятию ошибочных решений по результатам испытаний, снижению конкурентоспособности выпускаемых двигателей.

В работе предлагается подход к оценке качества сборки ДВС в ходе приемосдаточных испытаний на основе современных методов статистического моделирования и информационных технологий.

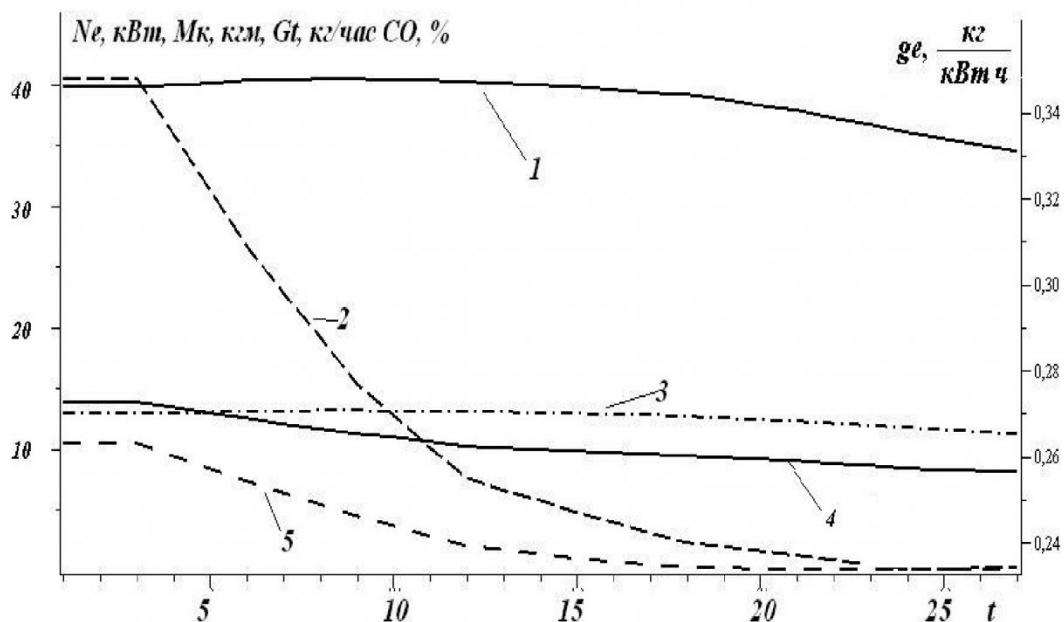


Рис. 1 – Последовательные измерения параметров ДВС: 1 – Ne (кВт); 2 – ge (кг/кВт·ч); 3 – Mк (Нм); 4 – Gt (кг/ч); 5 – CO (%)

Рассмотрим процесс измерения пяти основных параметров двигателя, используемых для построения стандартизированной нагрузочной характеристики в ходе контрольных испытаний. Диагностическими параметрами для четырехтактного карбюраторного двигателя на постоянной частоте вращения коленчатого вала $n=3000$ мин⁻¹ выбраны: часовой расход топлива Gt (кг/ч), крутящий момент Mk (Нм), эффективная мощность Ne (кВт), удельный расход топлива ge (кг/кВт·ч) и содержание CO (%) в отработавших газах. Эффективная мощность является расчетным параметром, однако она также включена в рассмотрение.

Измерение параметров осуществляется в равнотстоящие промежутки времени. В результате отдельные скалярные процессы образуют динамические (временные) ряды $X_{i,t}, \dots, X_{i,T}$, $i = 1 \dots n$ – номер исследуемого параметра, $t=1, \dots, T$ – дискретное время. Изменения отдельных параметров представляют нестационарные случайные процессы со стационарными приращениями (рис.1). По ГОСТ – 14846 измерение контролируемых параметров должно осуществляться одновременно, что позволяет объединять отдельные скалярные процессы, описывающие изменение указанных параметров, в один многомерный процесс. Тогда в каждый момент времени t параметры образуют вектор $x_t = (X_{1,t}, \dots, X_{n,t})^T$ размерности $n \times 1$.

Изменение этого вектора во времени с учетом причинно-следственных зависимостей между параметрами составляет суть статистического исследования.

Алгоритм построения эмпирической модели

ДВС по наблюдаемым данным в предположении стабильности сборочного процесса подробно описан в работе [3]. Модель далее представляется в пространстве состояний и состоит из двух уравнений. Уравнение состояния связывает текущее и предшествующее значение вектора диагностических параметров

$$x_t = \Pi_0 + Ax_{t-1} + \omega_t \quad .(1)$$

Здесь $x_t = (Mk_t \ Gt_t \ CO_t \ Ne_t \ ge_t)^T$ – вектор состояния, содержащий значения перечисленных параметров в текущий момент времени t , $\Pi_0 = (6,4 \ -27,8 \ -49,5 \ 19,2 \ 0,7)^T$ – 5×1 вектор-столбец коэффициентов T – знак транспонирования, $(\omega_{t-1})^T = [\varepsilon_t \ 0 \ \dots \ 0]$ – 5×1 вектор шума, $E[w_t, w_k^T] = Q_t \delta_{ik}$, E – символ математического ожидания,

$$A = \begin{pmatrix} -0,540 & 0,914 & -0,037 & 0,307 & -31,789 \\ 0,236 & -1,775 & -0,010 & 0,569 & 118,84 \\ 1,999 & -4,511 & 0,482 & 0,320 & 224,97 \\ -1,789 & 2,662 & -0,083 & 1,023 & -94,621 \\ 0,060 & -0,077 & -0,002 & -0,002 & 4,189 \end{pmatrix}$$

– переходная квадратная матрица для параметров, изменение которых изображено на рис. 1..

Уравнение наблюдения за испытуемым объектом имеет вид:

$$y_t = Bx_t \quad (2)$$

где $B = [I_5 \ 0 \ \dots \ 0]$ – 5×5 матрица наблюдения, I_5 – единичная матрица размера 5×5 , y_t – вектор наблюдения размера 5×1 .

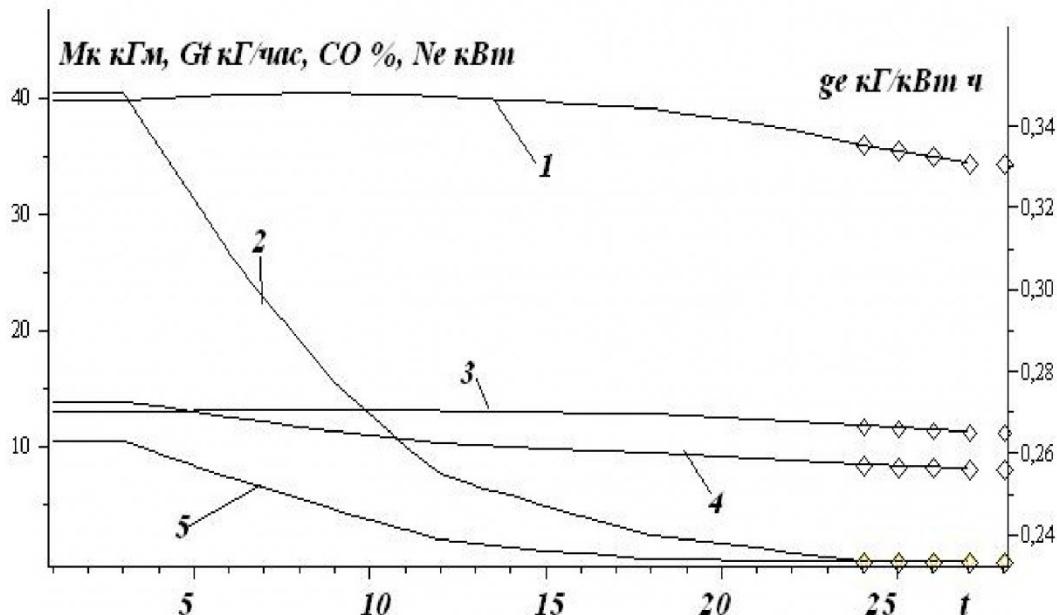


Рис. 2 . Процессы изменения параметров ДВС и их оценочные и прогнозные значения: 1 – Ne (кВт); 2 – ge (кг/кВт·ч); 3 – Mk (Нм); 4 – Gt (кг/ч); 5 – CO (%), \diamond – прогнозное значение

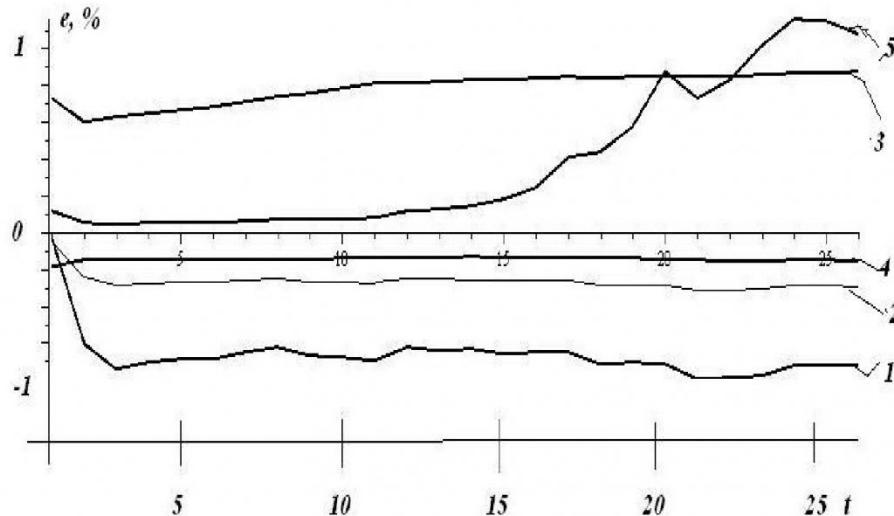


Рис. 3. Графики ошибок оценивания: 1 – Ne (kBm); 2 – ge ($kg/kBm \cdot ч$); 3 – Mk (Hm); 4 – Gt ($kg/ч$); 5 – CO (%)

Исходя из предположения о стабильности сборочного процесса, будем считать матрицы A и B в системе уравнений (1-2) для исправного двигателя не зависящими от времени.

Составная матрица

$$\left[B^T \left| A^T B^T \right| \dots \left| \left(A^T \right)^{n-1} B^T \right. \right]$$

размера $n \times nm = 5 \times 25$ имеет ранг, равный 5. В теории автоматического управления это означает, что вектор наблюдения однозначно отображается на вектор состояния и, другими словами, возможно определение оценочных значений вектора состояния \hat{x}_t по значениям вектора y_t в любой момент времени t , т.е. в реальном времени поступления каждого нового наблюдения (измерения).

Наиболее известным и распространенным ал-

горитмом для получения искомых оценок является алгоритм, называемый фильтром Калмана [4]. Его растущая популярность и приложение к различным техническим и экономическим приложениям объясняется простотой необходимых для оценки вычислений и возможностью получения оценок, оптимальных с точки зрения минимального квадрата ошибок оценивания.

Уравнения, описывающие алгоритм фильтра Калмана, имеют следующий вид.

Априорная оценка вектора состояния определяется по формуле:

$$\hat{x}_{t/t-1} = A \hat{x}_{t-1}, \quad (3)$$

где обозначение $t/t-1$ означает оценку вектора состояния \hat{x}_t для момента времени t , полученную по результатам $t-1$ включительно.

Априорная ковариационная матрица ошибок

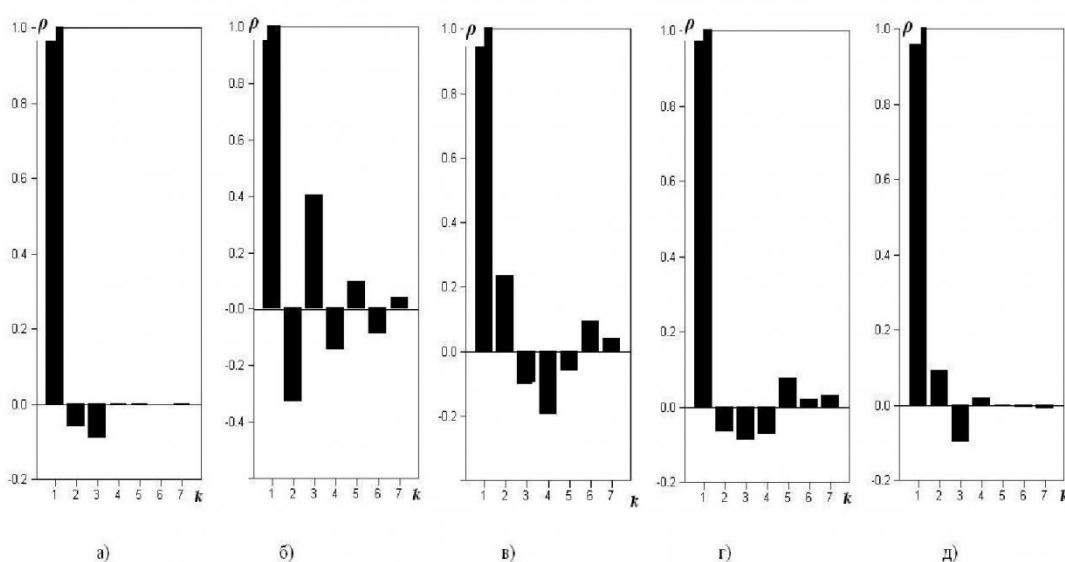


Рис. 4 . График автокорреляционных функций ошибок оценивания:
а) – Ne , б) – ge , в) – Mk , г) – Gt , д) – CO

оценивания определяется как:

$$\begin{aligned} P_{t/t-1} &\equiv E\left\{\left[x_{t/t-1} - \hat{x}_{t/t-1}\right] \cdot \left[x_{t/t-1} - \hat{x}_{t/t-1}\right]^T\right\} = \\ &= AP_{t-1}A^T + HR_tH^T \end{aligned} \quad (4)$$

При поступлении на вход фильтра нового наблюдения y_t априорная оценка $\hat{x}_{t/t-1}$ корректируется:

$$\hat{x}_t = \hat{x}_{t|t-1} + K_t(y_t - B\hat{x}_{t|t-1}). \quad (5)$$

Здесь K_t – коэффициент усиления фильтра, который вычисляется по формуле:

$$K_t = P_{t/t-1}B^T \left[BP_{t/t-1}B^T + GQ_tG^T \right]^{-1} \quad (6)$$

Последний шаг алгоритма заключается в определении прогнозной оценки вектора состояния:

$$\hat{x}_{t+1/t} = (A - K_tB)\hat{x}_{t/t-1} + K_t y_t = A\hat{x}_{t/t-1} + K_t z_t \quad (7)$$

Алгоритм (3) – (7) реализован на ЭВМ на базе прикладного программного обеспечения Maple V

в среде Windows. Пять оценочных и прогнозных значений диагностических параметров вместе с измеренными значениями представлены на рисунке 2.

$$\text{График ошибок оценивания } \varepsilon_i = \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i}$$

изображен на рис.3.

При оценке диагностических параметров исправного двигателя ошибка оценивания (рис.3) не превышает 1%. Графики автокорреляционных функций ошибок оценивания показаны на рис. 4. При построении графиков численное значение автокорреляционных функций откладывалось по оси ординат (ρ), а значение времени задержки (κ) – по оси абсцисс.

Дефекты деталей или нарушение процесса сборки приводят к изменению значений структурных параметров двигателей, что, в свою очередь, ведет к изменению величин диагностических параметров.

Например, нарушение соосности клапана и направляющей втулки клапана приводит к появ-

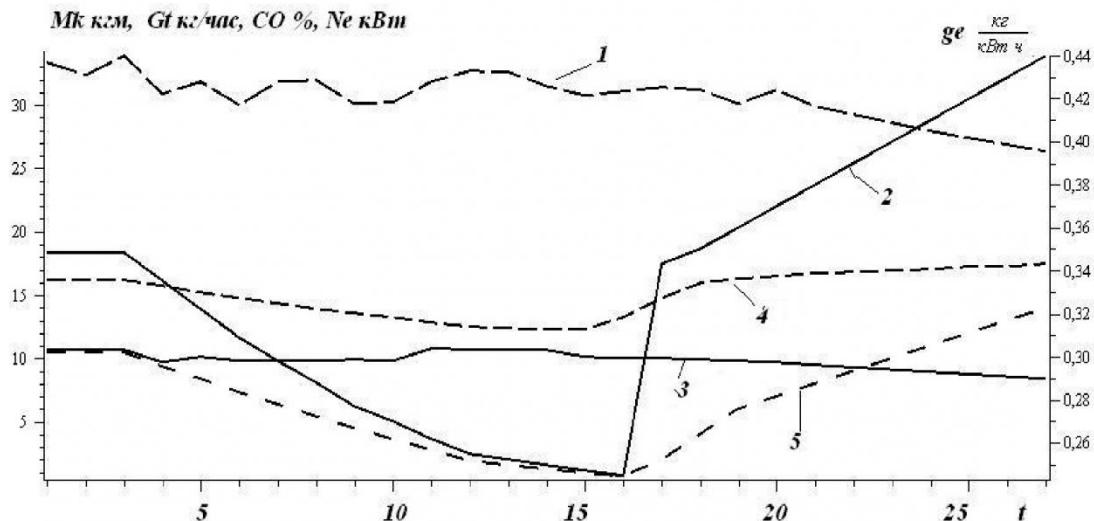


Рис. 5. Графики изменения диагностических параметров неисправного ДВС:
1 – Ne (кВт); 2 – ge (кг/кВт·с); 3 – Mk (кгм); 4 – Gt (кг/ч); 5 – CO (%)

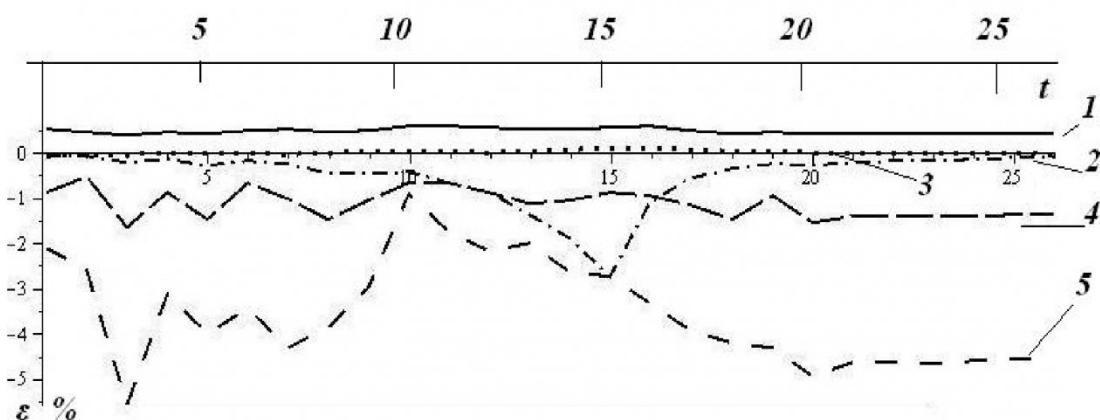


Рис. 6. Ошибки оценивания диагностических параметров неисправного ДВС:
1 – Ne (кВт); 2 – ge (кг/кВт·с); 3 – Mk (кгм); 4 – Gt (кг/ч); 5 – CO (%)

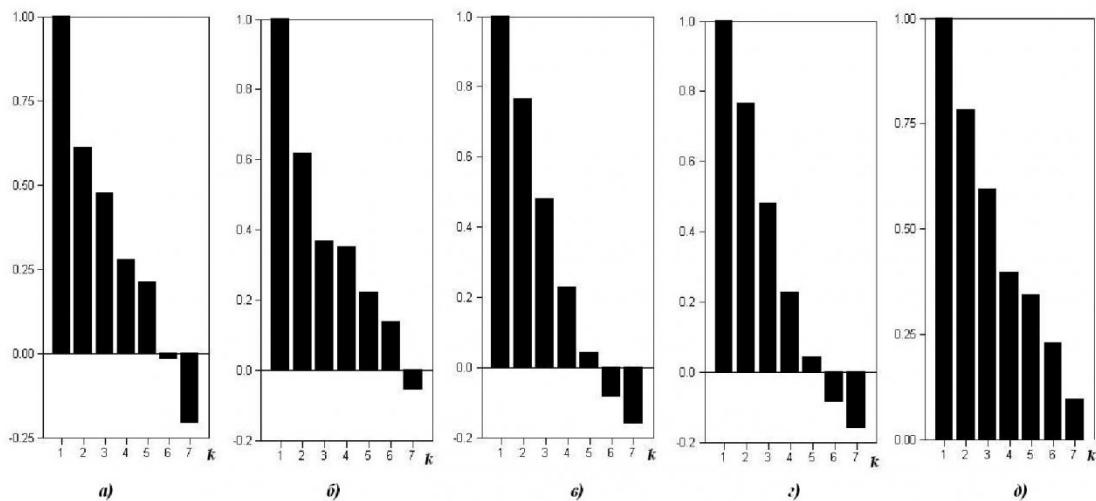


Рис. 7 – График автокорреляционной функции ошибок оценивания диагностических параметров неисправного ДВС: а) – Ne , б) – ge , в) – Mk , г) – Gt , д) – CO

лению зазора между клапаном и седлом клапана. В результате появляется утечка рабочего тела (смеси топлива с воздухом) в момент сжатия и горения, что вызывает падение среднего индикаторного и эффективного давления. Падение эффективного давления вызывает снижение крутящего момента, мощности, увеличение расхода топлива и т.д.

Последовательности значений диагностических параметров неисправного двигателя представлены на рис. 5.

Изменение величин диагностических параметров приводит к нарушению статистических зависимостей между параметрами и, как следствие, структуры и коэффициентов модели [5]. Использование модели (1), (2) для прогноза значений параметров без учета этих изменений приводит,

как показал вычислительный эксперимент, к резкому увеличению (в 5-10 раз) ошибок оценивания (рис. 6). График автокорреляционных функций показывает высокую степень зависимости последовательных значений ошибок оценивания (рис.7).

На наш взгляд, оценка качества сборки ДВС в ходе приемо-сдаточных испытаний может быть проведена современными методами многомерного статистического моделирования по значениям параметров функционирования.

Основными преимуществами предложенного подхода является отсутствие в дополнительном измерительном оборудовании, простота вычислительной реализации алгоритма оценивания, а также возможность прогноза изменения технического состояния испытуемых двигателей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалев и др. Под общ. ред. В.В. Клюева. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
2. Пронякин В.И. Проблемы диагностики циклических машин и механизмов / В.И. Пронякин // Измерительная техника. – 2008. – №10. – С 9 – 13.
3. Первухина Е.Л., Голикова В.В. Анализ нестационарных случайных процессов в задачах автоматизации производственных испытаний машиностроительных изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2007. – №8. – С. 29-35.
4. Durbin J., Koopman S.J. Time Series Analysis by State Space Methods. Oxford: Oxford University Press, 2005.
5. Первухина Е.Л., Сопин П.К., Голикова В.В. Оценка состояния машиностроительных изделий в ходе производственных испытаний после сборки. Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. №10.

□ Авторы статьи:

Первухина
Елена Львовна

- докт.техн.наук, проф. каф. технической механики и машиноведения (Севастопольский национальный технический университет).
E-mail elena@pervuh.sebastopol.ua
Тел. (0692) 43-51-61

Голикова

Виктория Викторовна

- канд.техн.наук, ст. препод. каф. технической механики и машиноведения (Севастопольский национальный технический университет),
E-mail elena@pervuh.sebastopol.ua
Тел. (0692) 43-51-61

Осипов

Константин Николаевич
- аспирант каф. технической механики и машиноведения (Севастопольский национальный технический университет)
E-mail elena@pervuh.sebastopol.ua
Тел. (0692) 43-51-61