

УДК 629.735.03

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ БУТСТРЕП-МЕТОДА ПРИ ПЕРВИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ РЕГИСТРИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

К.А. СОРОКИН

**Статья представлена доктором технических наук, профессором Чичковым Б.А.**

Статья посвящена исследованию применения метода бутстрепа при первичной обработке параметров авиационных газотурбинных двигателей (ГТД). Рассматривается процесс обработки данных при формировании реперных точек и базовых значений параметров на исследуемых режимах для их дальнейшей оценки. Кратко рассматриваются виды бутстрепа, алгоритм его применения. Выбирается оптимальный объем выборки бутстрепа и проводится сравнение с действующими методами.

**Ключевые слова:** параметрическая диагностика, первичная обработка параметрической информации, бутстреп-метод.

В настоящее время для оценки технического состояния авиационных ГТД наиболее широко применяется трендовый анализ на установившихся режимах работы двигателя. Для этого на каждом режиме формируются реперные точки – осредненные значения регистрируемых параметров двигателя. С учетом физических особенностей изменения параметров двигателя, необходимости совместного их использования и частоты регистрации параметрической информации для формирования реперной точки удается использовать от 6 до 30 отсчетов [1].

С учетом дальнейшей обработки параметров аппаратом математической статистики и построения на их основе анализа-прогноза технического состояния двигателя наиболее предпочтительно при заданном уровне доверительной вероятности (обычно 0,95) получать более узкие доверительные интервалы для оценки параметра.

На рис. 1 представлен типичный график изменения параметров двигателя типа ПС-90А на максимальном режиме. Участок выборки для формирования реперной точки взят с 1023 до 1047 кадра (всего 25 точек). Жирным на графике выделены параметры с достаточно большим разбросом, который оценивается колеблемостью ( $T_{м\_тнд}$  – температура масла опоры турбины низкого давления;  $P_{т1к}$  – давление топлива в первом контуре форсунок).

По стандартному алгоритму оценки параметры представлены в табл. 1.

**Таблица 1**

Статистические оценки приведенной выборки

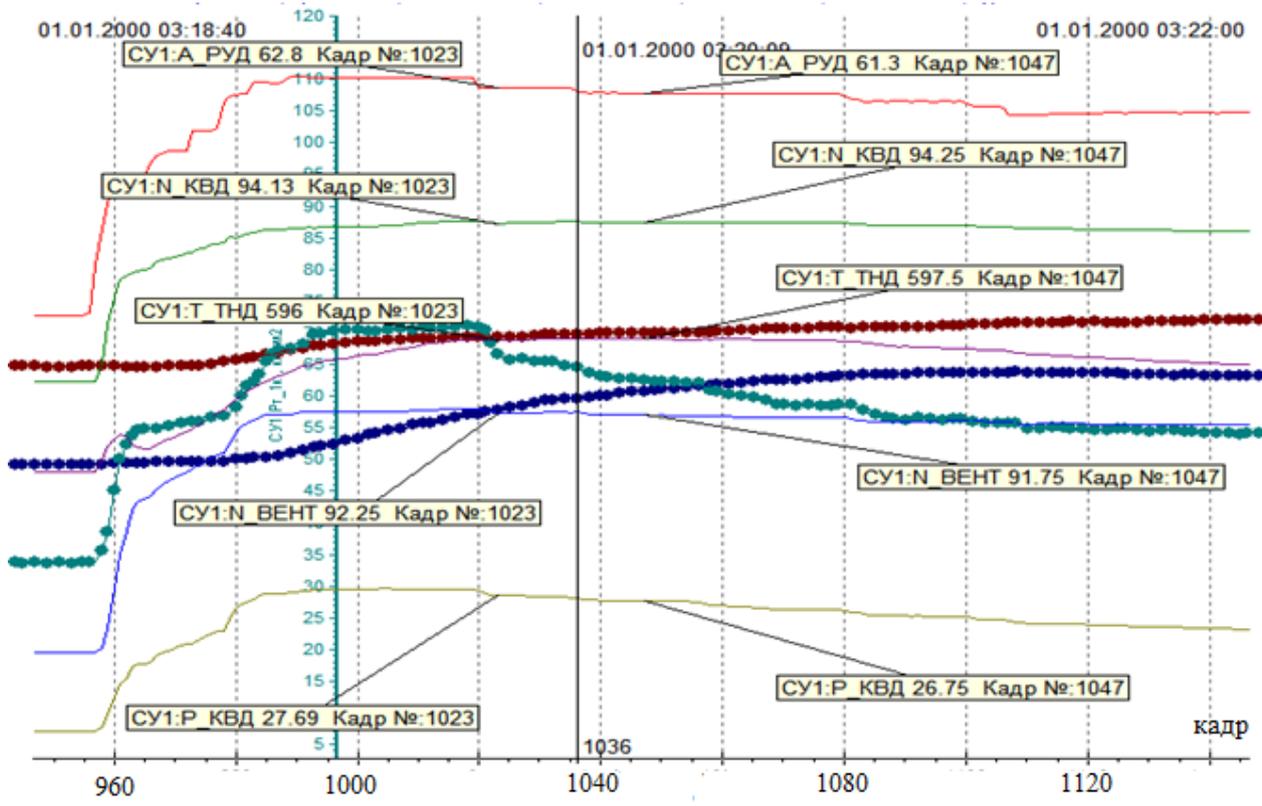
| Показатели      | $A_{руд}$ | $N_{квд}$ | $N_{вент}$ | $T_{тнд}$ | $P_{квд}$ | $T_{м\_твд}$ | $T_{м\_тнд}$ | $P_{т1к}$ |
|-----------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| Среднее         | 62,25     | 94,32     | 92,21      | 597,93    | 27,27     | 123,88       | 96,62        | 64,74     |
| СКО             | 0,728     | 0,109     | 0,281      | 0,905     | 0,338     | 0,560        | 2,367        | 1,342     |
| Колеблемость, % | 1,170     | 0,115     | 0,305      | 0,151     | 1,241     | 0,452        | 2,450        | 2,073     |
| Мин.            | 61,82     | 94,25     | 92,05      | 597,39    | 27,07     | 123,54       | 95,22        | 63,95     |
| Макс.           | 62,68     | 94,38     | 92,38      | 598,46    | 27,47     | 124,21       | 98,02        | 65,53     |

Колеблемость оценивается по стандартной формуле [3]

$$V(t) = \frac{\sigma}{\bar{x}}, \quad (1)$$

где  $\sigma$  – средне-квадратическое отклонение (СКО) выборочных данных;  $\bar{x}$  – выборочное среднее.

Для оптимизации получаемых данных и повышения качества их статистической оценки используется метод бутстрепа [4]. Бутстреп-процедура (bootstrap) была предложена (Efron, 1979 г.) как обобщение алгоритма «складного ножа». В 1989 г. сформулирована основная идея: методом статистических испытаний Монте-Карло многократно извлекать повторные выборки из эмпирического распределения [4]. Таким образом обычно формируют бутстреп-выборки от 1000 до 10000 вариаций. В общем виде в зависимости от имеющейся информации относительно статистической модели генеральной совокупности различают непараметрический и параметрический бутстреп [4].



**Рис. 1.** Типичный срез параметров двигателя ПС-90А на максимальном режиме с границами выборки для реперной точки

В работе рассматривается алгоритм непараметрической бутстреп-процедуры [4]:

*Шаг 1.* Получение большого количества «повторностей» – случайных наборов данных из изучаемой совокупности. В качестве исходных данных берется, как правило, только одна случайная выборка, полученная эмпирическим путем. На основе одной имеющейся выборки генерируется множество псевдовыборок того же размера, состоящих из случайных комбинаций исходного набора элементов. Используется алгоритм «случайного выбора с возвращением» (random sampling with replacement), т.е. извлеченное число снова помещается в «перемешиваемую колоду», прежде чем вытягивается следующее наблюдение. В результате некоторые члены в каждой отдельной псевдо-выборке могут повторяться два или более раз, тогда как другие – отсутствовать.

*Шаг 2.* Построение бутстреп-распределения оцениваемого параметра. Для каждой псевдо «повторности», полученной на шаге 1, рассчитывается значение анализируемой характеристики – среднего, медианы, стандартного квадратичного отклонения и др. Имея это множество данных, легко построить гистограмму (или ядерную функцию частотного распределения) значений любого показателя, отражающую его вариацию, что дает возможность оценить доверительные интервалы и другие полезные выборочные характеристики анализируемой величины [4].

Оценка выборочных величин будет представлена в виде:

$$\bar{X}_b = \frac{1}{b} \cdot \sum_{j=1}^b \bar{x}_j; \quad (2)$$

$$S_e = \left[ \frac{1}{b-1} \cdot \sum (\bar{x}_j - \bar{x}_b)^2 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (3)$$

где  $\bar{x}_j$  – j-е среднее значение, рассчитанное по j-й выборке; b – число испытаний бутстрепом;  $\bar{X}_b$  – среднее значение, рассчитанное методом бутстрепа.

В настоящей работе предлагается выполнять бутстреп 5000 раз, так как такой объем считается достаточным для получения достоверных результатов [4].

Выполнив расчеты с представленной выборкой, получим результаты, представленные в сравнении с начальными данными в табл. 2. В большинстве случаев метод существенно снижает разброс параметров, сужает доверительные границы. Следует отметить некоторое смещение «вниз» среднего и доверительных интервалов, что сглаживает единичные выбросы исследуемых параметров вследствие наличия сбоев в регистрации или записи параметров. В конечном итоге всё это позволяет более точно настроить допусковые значения во время статистических исследований.

На рис. 2 - 4 представлены гистограммы частотного распределения рассмотренных параметров по результатам бутстрепирования. Графики иллюстрируют, что при применении метода бутстрепа не нарушается предположение о нормальном законе распределения исследуемых величин, что имеет важное значение для дальнейшей оценки параметров.

**Таблица 2**

Статистические оценки выборки до и после бутстрепа

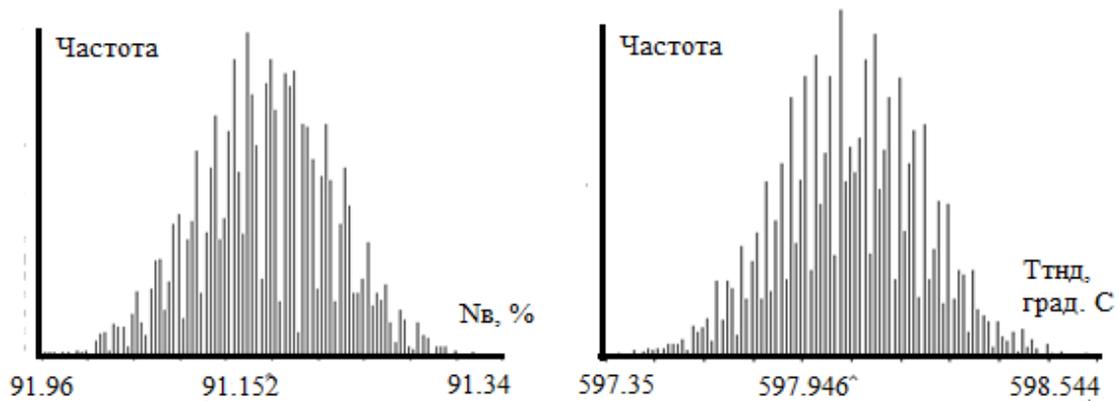
| Показатели         |       | A <sub>руд</sub> | N <sub>квд</sub> | N <sub>вент</sub> | T <sub>тнд</sub> | P <sub>квд</sub> | T <sub>м твд</sub> | T <sub>м тнд</sub> | P <sub>т1к</sub> |
|--------------------|-------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|------------------|
| Среднее            | до    | 62,25            | 94,32            | 92,21             | 597,93           | 27,27            | 123,88             | 96,62              | 64,74            |
|                    | после | 62,07            | 94,33            | 92,15             | 597,946          | 27,20            | 123,966            | 97,18              | 64,403           |
| СКО                | до    | 0,728            | 0,109            | 0,281             | 0,905            | 0,338            | 0,560              | 2,367              | 1,342            |
|                    | после | 0,14             | 0,19             | 0,18              | 1,192            | 0,074            | 0,204              | 0,473              | 0,248            |
| Колеблемость,<br>% | до    | 1,170            | 0,115            | 0,305             | 0,151            | 1,241            | 0,452              | 2,450              | 2,073            |
|                    | после | 0,222            | 0,196            | 0,194             | 0,199            | 0,272            | 0,165              | 0,486              | 0,222            |
| Мин.               | до    | 61,82            | 94,25            | 92,05             | 597,39           | 27,07            | 123,54             | 95,22              | 63,95            |
|                    | после | 61,78            | 94,28            | 92,03             | 597,534          | 27,053           | 123,739            | 96,238             | 63,834           |
| Макс.              | до    | 62,68            | 94,38            | 92,38             | 598,46           | 27,47            | 124,21             | 98,02              | 65,53            |
|                    | после | 62,39            | 94,37            | 92,27             | 598,281          | 27,336           | 124,217            | 98,212             | 64,954           |

Важной областью применения метода бутстрепа можно выделить расчет базовых (средних по первым 5, 10 и т.п. полетам) значений параметров и скользящего среднего. На примере расчета базовых значений по 10 и 20 точкам параметров T<sub>мвсу</sub> и T<sub>мвсу\_прив</sub> (рис. 7, 8) можно показать, что не нарушается допущение о нормальности распределения (рис. 5, 6), а также с учетом сужения доверительных интервалов может быть обеспечен более достоверный контроль.

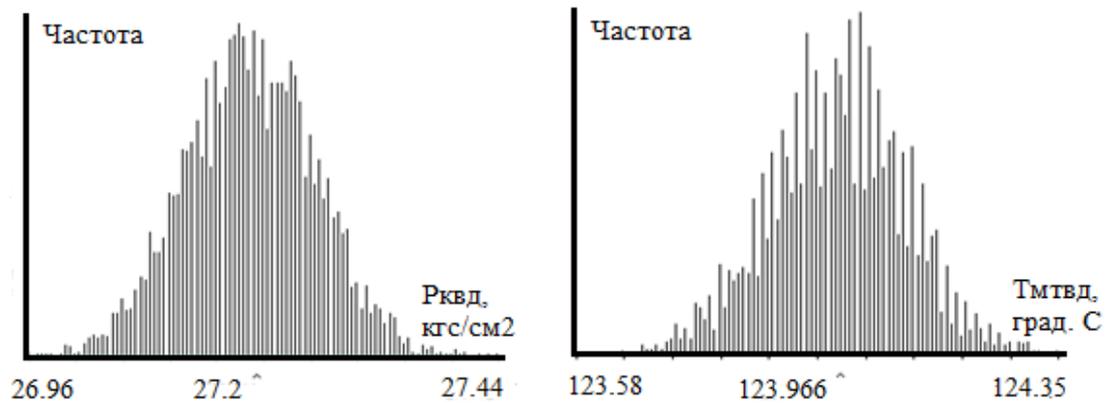
Эти параметры имеют достаточно большой разброс значений из-за конструктивных особенностей двигателя ВСУ-10, а приведение T<sub>мвсу\_прив</sub> хорошо сглаживает только при T<sub>н</sub> больше 5 °С. На рис. 5 следует обратить внимание на существенное отличие частотной диаграммы от нормального распределения. Такое изменение объясняется существенным колебанием параметра [4]. Дополнительным подтверждением флуктуаций значений параметра является существенный разброс доверительных интервалов для этого значения по сравнению с остальными расчетами.

При использовании бутстрепа при построении сглаживающей линии тренда линия изменяется плавнее стандартного скользящего среднего даже при наличии скачкообразных изменений

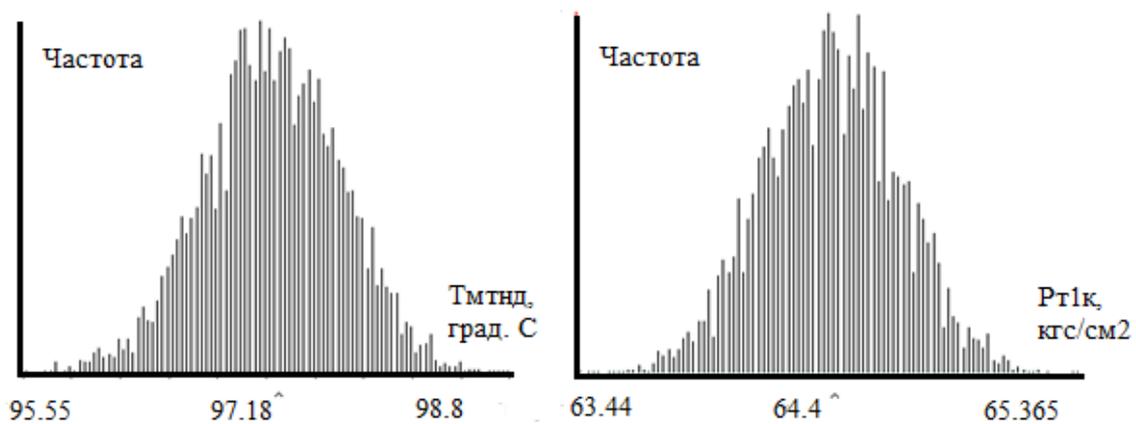
(рис. 7, 8), что позволяет эффективнее сглаживать единичные выбросы, вызванные формированием недостоверного значения в реперной точке по причине сбойного характера параметрической информации или отказа датчика, регистрирующего показания.



**Рис. 2.** Гистограмма частотного распределения параметров  $N_B$  (слева) и  $T_{TND}$  (справа) при бутстрепинге с шагом 5000



**Рис. 3.** Гистограмма частотного распределения параметров  $P_{KVD}$  (слева) и  $T_{MTVD}$  (справа) при бутстрепинге с шагом 5000



**Рис. 4.** Гистограмма частотного распределения параметров  $T_{MTND}$  (слева) и  $P_{T1K}$  (справа) при бутстрепинге с шагом 5000

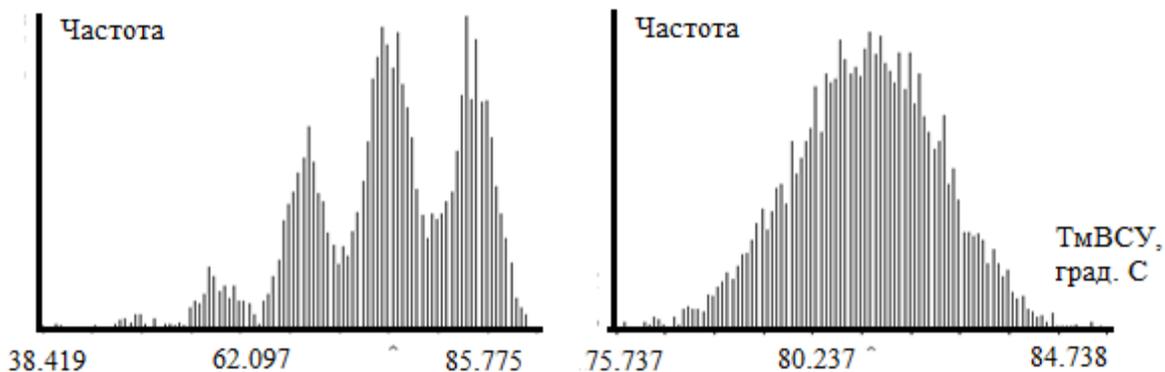


Рис. 5. Гистограмма частотного распределения параметров  $T_{mBCU}$  при формировании базового по 10 точкам (слева) и 20 точкам (справа) при бутстрепинге с шагом 5000

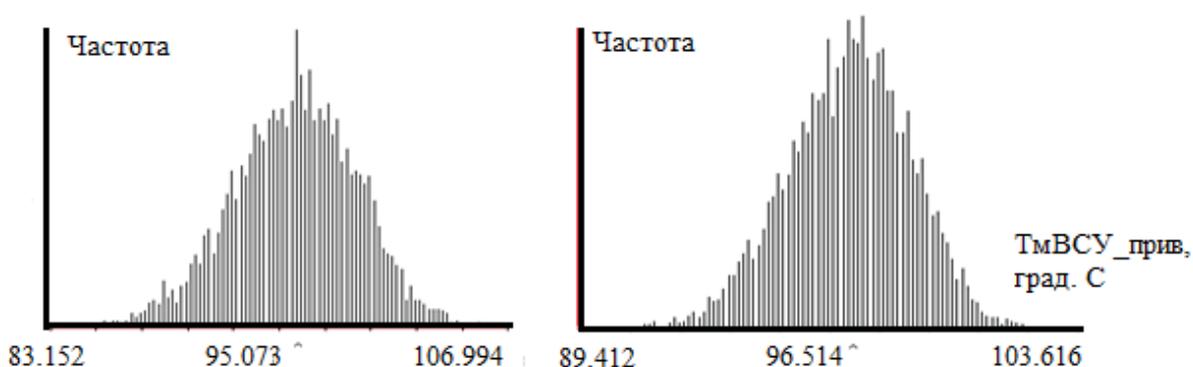


Рис. 6. Гистограмма частотного распределения параметров  $T_{mBCU\_priv}$  при формировании базового по 10 точкам (слева) и 20 точкам (справа) при бутстрепинге с шагом 5000

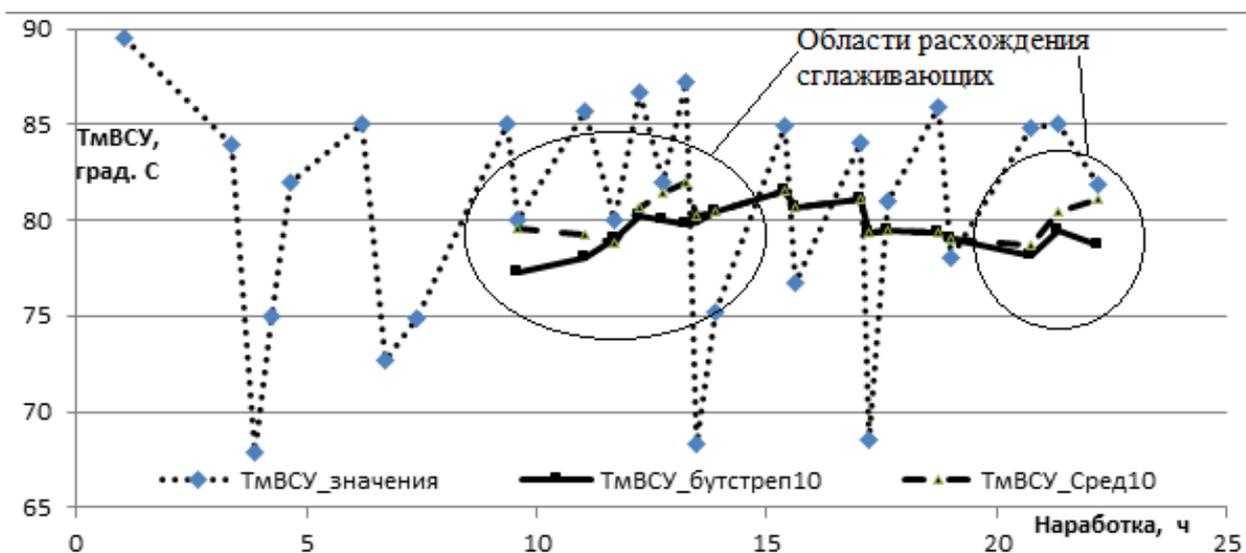
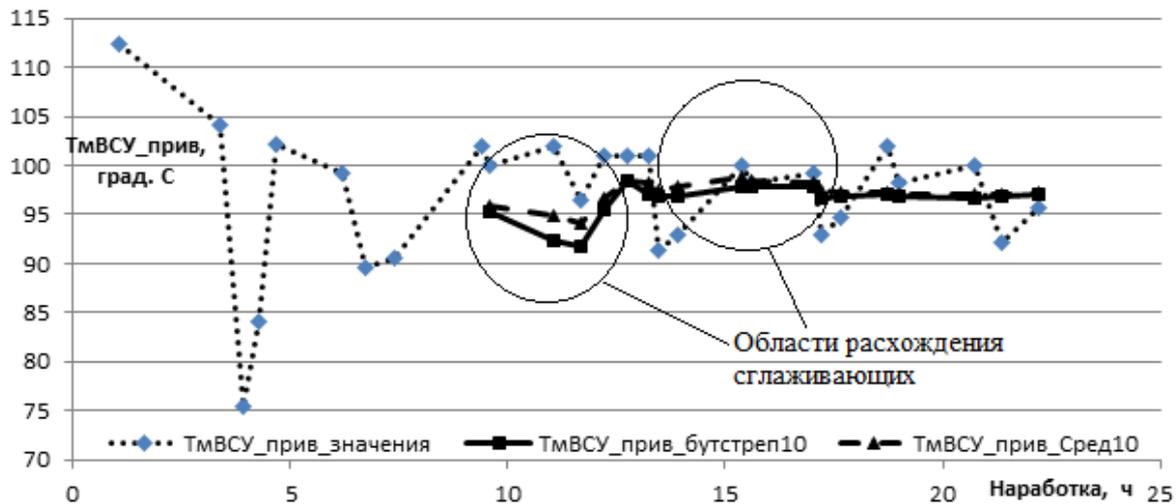


Рис. 7. График изменения параметра  $T_{mBCU}$  в первых 28 реперных точках (пунктир), скользящее-бутстреп - по 10 точкам (сплошная) и скользящее среднее - по 10 точкам (штрих)



**Рис. 8.** График изменения параметра  $T_{\text{мвсу\_прив}}$  в первых 28 реперных точках (пунктир), скользящее-бутстреп - по 10 точкам (сплошная) и скользящее среднее - по 10 точкам (штрих)

Применение бутстрепа позволяет упростить процесс первичной обработки данных, не нарушая первоначального предположения о нормальном распределении параметров в реперной точке, тем самым позволяя использовать для дальнейшей оценки стандартный метод наименьших квадратов и соответствующие регрессионные модели [3; 2]. Исследуемые временные ряды параметров обладают достаточно большим разбросом значений, вызванным их физической природой, а в некоторых случаях отказами датчиков и сбоями регистрируемой аппаратуры. В таком случае сглаживание с использованием бутстрепа эффективнее исследуемых методов, разброс точек меньше, не нарушается предположение о нормальном распределении случайной величины. Важно отметить, что бутстреп применим в корреляционном и даже в регрессионном анализе.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Айвазян С.А., Бухштабер В.М., Енюков И.С., Мешалкин Н.Д. Прикладная статистика. - М.: Финансы и статистика, 1989.
2. Сорокин К.А. Совершенствование системы параметрического диагностирования ТРДД типа ПС-90А: дис. ... магистра. - М.: МГТУ ГА, 2007.
3. Чичков Б.А. Методология оптимизации статистических диагностических моделей авиационных ГТД для установившихся режимов работы. - М.: МГТУ ГА, 2001.
4. Шитиков В.К., Розенберг Г.С. Рандомизация и бутстреп: статистический анализ в биологии и экологии с использованием R. Институт экологии волжского бассейна. - Тольятти, 2013.

#### THE RESEARCH OF BOOTSTRAP ADAPTATION DURING INITIAL GAS TURBINE ENGINE PARAMETERS PROCESSING

Sorokin K.A.

This article is dealing with the research of bootstrap adaptation during initial air-jet engine parameters processing in trend analysis. Types of bootstrap and its adaptation are shown. Optimal bootstrap variation length is chosen. Bootstrap-method is compared to active methods.

**Keywords:** parametric diagnostics, initial processing of parametric information, bootstrap-method.

#### Сведения об авторе

**Сорокин Кирилл Алексеевич**, 1984 г.р., окончил МГТУ ГА (2007), начальник группы разработки и сопровождения ПО ООО НПП «Взлет-премьер», автор 6 научных работ, область научных интересов – диагностирование авиационных ГТД по регистрируемым параметрам.