

УДК 629.7.06

## **ПРИМЕНЕНИЕ АППРОКСИМАТИВНОГО АНАЛИЗА РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ЗАДАЧЕ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГИДРОСИСТЕМ**

©2009 К. Ю. Мальчиков, Л. М. Логвинов, М. А. Ковалев

Самарский государственный аэрокосмический университет

Рассматривается задача повышения чувствительности датчиков встроенного контроля параметров частиц износа в рабочей жидкости гидросистем. Предложен алгоритм обработки экспериментальных данных о распределении дисперсного состава частиц износа. Приведена методика прогнозирования распределения дисперсного состава частиц износа размером менее 5мкм по данным о распределении более крупных частиц.

*Датчик встроенного контроля, диагностирование технического состояния гидравлических систем, распределение дисперсного состава частиц износа, аппроксимация плотности вероятности*

Гидравлические системы (ГС) являются одними из наиболее распространенных и широко используемых систем в современной авиационной и аэрокосмической технике. Расширение круга решаемых с помощью ГС задач предопределило значительное усложнение ее структуры. Следовательно, существенно возросли требования к надёжности как отдельных узлов, так и гидросистем в целом. В большей степени эти требования относятся к системам, для которых характерны жесткие условия эксплуатации, связанные с высокими значениями температуры и давления рабочей жидкости (РЖ), значительным уровнем вибрации и пульсации. В связи с этим актуальной задачей является построение систем диагностирования технического состояния ГС [1, 2].

Наиболее информативными диагностическими параметрами при определении технического состояния гидросистем являются состав и концентрация продуктов износа в РЖ [1, 3]. Так как ГС являются замкнутыми, то появление и увеличение концентрации частиц износа обусловлено процессом износа пар трения в трибомеханических узлах гидроагрегатов [1, 3, 4].

В настоящее время существуют два подхода к определению уровня загрязнения РЖ. Первый основан на анализе отобранной из ГС пробы жидкости. В результате проведения анализа определяется класс чистоты РЖ в соответствии с ГОСТ 17216-2001. Этот стандарт каждому классу чистоты РЖ ставит в соответствие определенное распределение дисперсного состава частиц загрязнения жидкости, который регламентируется как

количество частиц в девяти размерных фракциях в 100 мл жидкости. Всего этот стандарт устанавливает 19 классов.

Данный подход определения чистоты РЖ имеет ряд существенных недостатков. Прежде всего, это высокая методическая погрешность измерения уровня загрязнения жидкости (30...50%), что обусловлено сложностью обеспечения требуемой степени чистоты пробоотборной посуды, трудностью соблюдения правил и методики отбора пробы и другими факторами. Дополнительно увеличивает методическую погрешность и фактор «фильтрующего эффекта» малого зазора в пробоотборном кране, особенно при отборе проб жидкости из магистралей высокого давления, характерных для авиационной техники. Кроме того, этот способ контроля не позволяет получать информацию в реальном масштабе времени, что значительно снижает эффективность использования диагностической информации, содержащейся в параметрах частиц загрязнения РЖ, и предотвращения отказов ГС, обусловленных повышенным уровнем загрязнения жидкости [1].

Постепенное развитие средств контроля уровня загрязнения РЖ привело к появлению другого подхода, основанного на применении датчиков встроенного контроля (ДВК) [1]. Особенностью датчиков такого типа является то, что они устанавливаются непосредственно в магистраль ГС. Это позволяет отказаться от традиционного отбора пробы жидкости, что значительно повышает объективность и информативность анализа, а также его оперативность.

В отраслевой научно-исследовательской лаборатории ОНИЛ-16 Самарского государственного аэрокосмического университета (СГАУ) разработаны ДВК [1], определяющие дисперсный состав частиц загрязнения на основе различных методов: фотоэлектрического, вихретокового, пьезоэлектрического, контактно-зарядного и др. Наиболее широкое распространение среди них на практике получили фотоэлектрические ДВК типа «Поток». На основе этих датчиков в этой же лаборатории была создана диагностическая система «Фотон-965», качество и высокие возможности которой подтверждаются сертификатами и опытом эксплуатации в различных отраслях народного хозяйства. Уникальность этой системы заключается в том, что она позволяет определять уровень загрязнения непосредственно в потоке рабочей жидкости (при расходах жидкости до 100 л/мин и давлении в ГС до 28 МПа). Опыт эксплуатации этой системы указывает на принципиальную возможность создания встроенной системы контроля уровня загрязнения рабочей жидкости ГС изделий авиационной техники.

Несмотря на определенные достоинства разработанные к настоящему времени средства встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости ГС имеют существенный недостаток, связанный с ограниченным значением чувствительности датчиков. Так, ДВК «Поток» позволяют регистрировать только частицы износа размером более 5 мкм.

Однако в последние годы наметилась тенденция к увеличению рабочего давления в магистралях гидросистем, что позволяет при малых массово-габаритных характеристиках элементов ГС достичь высокой мощности и производительности. Так, в ГС современных изделий авиационной техники наиболее широко используется рабочее давление значением 21...28 МПа, при котором зазоры в узлах трения гидроагрегатов имеют величину порядка 10...15 мкм. Однако согласно расчетам оптимальным является значение давления РЖ близкое к 50 МПа [5]. При этом зазоры в узлах трения составляют величину 1...3 мкм. Таким образом, для более достоверной диагностики технического состояния узлов ГС необходимо повысить

чувствительность существующих ДВК дисперсного состава частиц загрязнения.

Но разработка средств регистрации частиц износа столь малых размеров, которые могли бы работать в жестких условиях эксплуатации, затруднительна и требует значительных материальных затрат. Поэтому повышение чувствительности существующих ДВК предлагается производить за счет математической обработки экспериментальных данных, получаемых с выходов ДВК. Такой подход позволит решить поставленную задачу без внесения существенных изменений в конструкцию датчика.

Данные о размерах частиц износа, проходящих через измерительный объем ДВК, представляют собой случайный процесс (СП). В результате первичной обработки данных можно получить гистограмму СП, которая является кусочно-постоянной оценкой. Для построения более гладкой и дифференцируемой оценки СП можно воспользоваться методами аппроксимативного анализа [6, 7, 8].

Известно, что распределение частиц износа в РЖ подчиняется логарифмически-нормальному закону распределения [2, 3, 4] плотность распределения вероятности которого имеет вид

$$f(x, a, \sigma_x) = \frac{1}{x\sigma_x\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - a)^2}{\sigma_x^2}}, \quad (1)$$

зависящий от двух параметров  $a$  и  $\sigma_x$ , представляющих собой натуральные логарифмы математического ожидания и среднеквадратического отклонения соответственно.

Задача аппроксимации состоит в определении оптимальных значений параметров  $a$  и  $\sigma_x$  таких, чтобы выражение (1) максимально соответствовало экспериментальным данным. Для определения значений параметров  $a$  и  $\sigma_x$  целесообразно воспользоваться методом наименьших квадратов [6, 8]:

$$\Delta = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(x_j) - f(x_j, a, \sigma_x)]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где  $\hat{f}_x(x_j) = \frac{y_j}{y_\Sigma}$  – эмпирическая плотность распределение частиц износа в РЖ;  $x_j$  – размер  $j$ -й частицы износа;  $y_j$  – количест-

во частиц износа в  $j$ -м дифференциальном коридоре;  $y_{\Sigma}$  – общее количество частиц износа,  $M = \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\Delta x}$  – число дифференциальных коридоров;  $x_{\min}$  и  $x_{\max}$  – соответственно минимальное и максимальное значения размеров частиц износа;  $\Delta x$  – интервал дискретизации, значение которого выбирается из следующего условия [6, 8]

$$\Delta x = \sqrt{\frac{8\delta}{|F''(x)|_{\max}}}, \quad (3)$$

где  $\delta$  – погрешность аппроксимации функции распределения,  $|F''(x)|_{\max}$  – максимальное значение модуля второй производной функции распределения.

Выражение для расчета второй производной функции распределения имеет вид

$$|F''(x)| = -\frac{1}{\sigma_x^3 \sqrt{2\pi x^2}} e^{-\frac{(\ln x - a)^2}{2\sigma_x^2}} (\sigma_x^2 + \ln x - a). \quad (4)$$

Эта функция имеет два максимума при

$x_{1,2} = e^{a - 1,5\sigma_x^2 \pm \sqrt{0,25\sigma_x^4 + \sigma_x^2}}$ . Выбрав из  $x_1$  и  $x_2$  такое значение, при котором достигается наибольшее  $|F''(x)|$ , и, задавшись  $\delta$ , можно рассчитать интервал дискретизации  $\Delta x$ .

Для определения параметров  $a$  и  $\sigma_x$  аппроксимирующей функции (1) согласно (2) необходимо решить следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} f_1 = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(x_j) - f(x_j, a, \sigma_x)] \frac{\partial f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial a} = 0, \\ f_2 = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(x_j) - f(x_j, a, \sigma_x)] \frac{\partial f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial \sigma_x} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Решение данной системы в аналитическом виде затруднительно, поэтому целесообразно воспользоваться приближенными методами, например методом Ньютона. Данный метод является итеративным. Тогда, выражения для определения оптимальных значений параметров аппроксимирующей функции примут вид:

$$a^{(n+1)} = a^{(n)} - \frac{1}{\Delta'} \left[ \frac{\partial f_2}{\partial \sigma^{(n)}} f_1 - \frac{\partial f_1}{\partial \sigma^{(n)}} f_2 \right], \quad (6)$$

$$\sigma_x^{(n+1)} = \sigma_x^{(n)} - \frac{1}{\Delta'} \left[ \frac{\partial f_1}{\partial a^{(n)}} f_1 - \frac{\partial f_2}{\partial a^{(n)}} f_2 \right], \quad (7)$$

где:  $\Delta' = \frac{\partial f_1}{\partial a} \frac{\partial f_2}{\partial \sigma} - \frac{\partial f_1}{\partial \sigma} \frac{\partial f_2}{\partial a}$ ,

$$\frac{\partial f_1}{\partial a} = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(x_j) - f(x_j, a, \sigma_x)] \times \frac{\partial^2 f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial a^2} - \left[ \frac{\partial f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial a} \right]^2,$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial \sigma_x} = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(x_j) - f(x_j, a, \sigma_x)] \times \frac{\partial^2 f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial \sigma_x^2} - \left[ \frac{\partial f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial \sigma_x} \right]^2,$$

$$\frac{\partial f_2}{\partial a} = \frac{\partial f_1}{\partial \sigma_x} = \sum_{j=1}^M [\hat{f}_x(x_j) - f(x_j, a, \sigma_x)] \times \frac{\partial^2 f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial a \partial \sigma_x} - \left[ \frac{\partial f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial a} \times \frac{\partial f(x_j, a, \sigma_x)}{\partial \sigma_x} \right].$$

В качестве начальных условий решения рекуррентных уравнений (6) и (7) целесообразно использовать значения математического ожидания и среднеквадратического отклонения, рассчитанных на основе экспериментальных данных, полученных с выхода ДВК:

$$\alpha_0 = \left( \sum_{j=1}^M (\hat{f}_j(x_j) \cdot \ln(x_j)) \right), \quad (8)$$

$$\sigma_{x0} = \sum_{j=1}^M (\hat{f}_j(x_j) \cdot (\ln(x_j) - \alpha_0)^2). \quad (9)$$

При этом выполнение итерационного алгоритма (6), (7) необходимо продолжать до тех пор, пока не выполнится условие:

$$\begin{cases} |\alpha_{n+1} - \alpha_n| \leq \varepsilon, \\ |\sigma_{x_{n+1}} - \sigma_{x_n}| \leq \varepsilon. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, выражения (6)-(9) позволяют рассчитать оптимальные значения параметров  $a$  и  $\sigma_x$  аппроксимирующей функции (1) с заданной точностью  $\varepsilon$  по экспериментальным данным, полученным с выхода ДВК.

Для проверки работоспособности приведенного алгоритма был проведен машинный эксперимент, в ходе которого был сгенерирован псевдослучайный процесс, подчиняющийся логарифмически-нормальному закону распределения с параметрами:  $y_{\Sigma} = 2600$ ;  $a = 2,665$ ;  $\sigma_x = 1,02$  (соответствует 5-му классу чистоты РЖ по ГОСТ 17216-2001). В результате выполнения алгоритма

аппроксимации были получены оптимальные значения аппроксимирующей функции (1)  $a = 2,665, \sigma_x = 1,02$ . При этом квадратическая погрешность (2) составила  $\Delta = 0.0037$ . Графически результат аппроксимации представлен на рис. 1.

Алгоритм (6)-(10) позволяет решить задачу аппроксимации опытных данных для частиц износа всех размеров. Однако, как было отмечено выше, используемые ДВК позволяют регистрировать лишь частицы диаметром более 5 мкм.

Таким образом, задачу повышения чувствительности ДВК можно сформулировать следующим образом: на основе анализа распределения дисперсного состава частиц износа диаметром более 5 мкм необходимо спрогнозировать распределение дисперсного состава частиц размером менее 5 мкм.

Восстановление функции плотности распределения является ключевой задачей в процессе прогнозирования распределения дисперсного состава частиц износа в РЖ гидросистемы. Основная проблема, возникающая при этом, состоит в том, что неизвестно общее количество частиц загрязнения  $y_x$  в выражении (2).

В результате в системе уравнений (5) появляется третий неизвестный параметр. Для того чтобы систему можно было разрешить, необходимо включить в нее еще одно уравнение. В качестве такого уравнения целесообразно использовать условие нормировки для плотности вероятности:

$$\int_0^{\infty} f(x_j, a, \sigma_x) = 1. \quad (11)$$

В этом случае система уравнений (5) примет следующий вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \Delta}{\partial a} = \sum_{j=1}^M [K \cdot \hat{f}_x(x_j) - f_a(x_j, a, \sigma)] \times \\ \quad \times \frac{\partial f_a(x_j, a, \sigma)}{\partial a} = 0, \\ \frac{\partial \Delta}{\partial \sigma} = \sum_{j=1}^M [K \cdot \hat{f}_x(x_j) - f_a(x_j, a, \sigma)] \times \\ \quad \times \frac{\partial f_a(x_j, a, \sigma)}{\partial \sigma} = 0, \\ \int_0^{\infty} f(x, a, \sigma_x) dx = 1. \end{array} \right. , (12)$$

где  $K$  – масштабирующий коэффициент, определяющий долю неопределенных частиц износа в общем количестве. Решив эту систему уравнений, можно восстанавливать неизвестную область плотности вероятности распределения дисперсного состава частиц загрязнения.

Проверка работоспособности алгоритма восстановления плотности вероятности (15) проводилась в 2 этапа. На первом этапе был проведен машинный эксперимент. При этом был сгенерирован псевдослучайный процесс, подчиняющийся логарифмически-нормальному закону распределения с параметрами  $y_x = 3116, a = 2,665, \sigma_x = 1,02$  (соответствует 7-му классу чистоты РЖ по ГОСТ 17216-2001). На основе данных о распределении частиц износа размером 7-100 мкм была восстановлена плотность вероятности распределения частиц размером 1-7 мкм. В результате решения системы уравнений (12) были определены оптимальные значения параметров аппроксимирующей функции (1)  $a = 2,812, \sigma_x = 1,17$ . при этом значение квадратической погрешности составило  $\Delta = 0,0047$ .

Для второго этапа проверки работоспособности алгоритма восстановления в ОНИЛ-16 СГАУ были получены экспериментальные распределения дисперсного состава частиц износа размером более 5 мкм.

Так как распределение частиц износа размером 1...5 мкм неизвестно, то для анализа степени соответствия восстановленной плотности вероятности исходным данным оценка квадратической погрешности (2) производилась на интервале 5...25 мкм. При этом значение квадратической погрешности составило  $\Delta = 0,0015$ . Графически результат данного эксперимента представлен на рис. 2.

Таким образом, в результате решения системы уравнений (12) и определения оптимальных параметров  $a$  и  $\sigma_x$  аппроксимирующей функции (1) восстановлена функция плотности вероятности распределения дисперсного состава частиц износа в рабочей жидкости ГС.

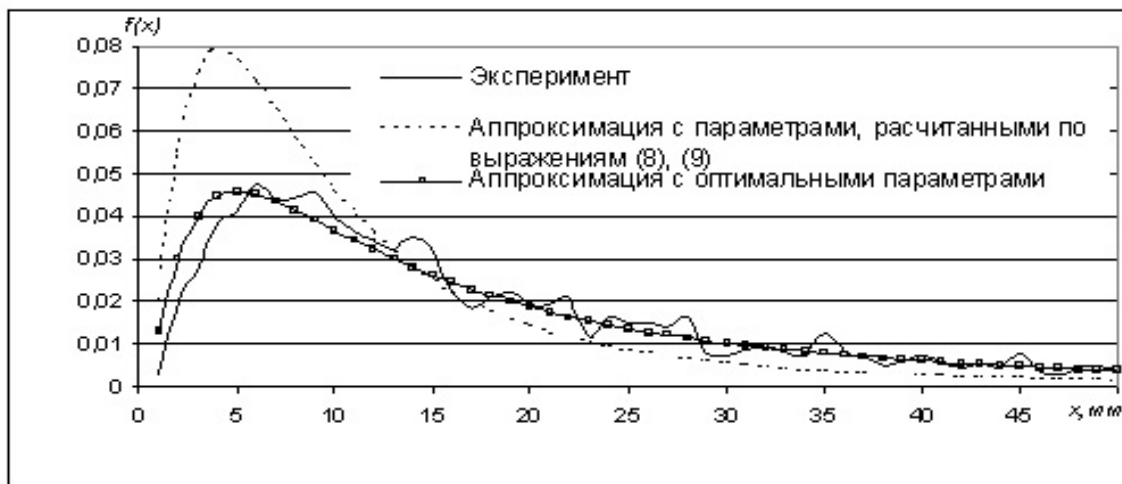


Рис. 1. Результаты аппроксимации плотности распределения логарифмически-нормального закона

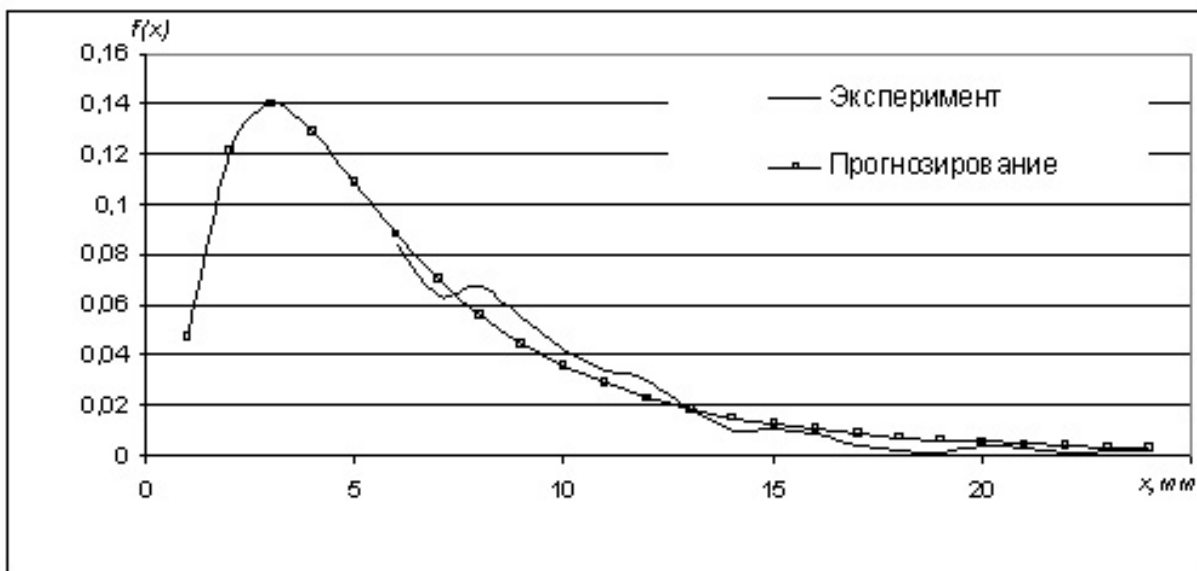


Рис. 2. Результат восстановления плотности вероятности распределения частиц износа в РЖ

Из вышеизложенного следует, что применение математического аппарата аппроксимативного анализа для обработки экспериментальных данных позволяет значительно повысить чувствительность ДВК, не внося изменений в конструкцию датчиков. За счет этого можно достигнуть существенного повышения возможностей систем диагностирования технического состояния гидросистем.

#### Библиографический список

1. Логвинов, Л.М. Техническая диагностика жидкостных систем технологического оборудования по параметрам рабочей жид-

кости/Л.М. Логвинов.- М: ЦНТИ "Поиск", 1992.-91с

2. Никитин, Г.А. Влияние загрязненности жидкости на надежность работы гидросистем летательных аппаратов/Г.А. Никитин, С.В. Чирков. - М.: Транспорт, 1969. - 184с.

3. Fitch E.C. Fluid Contamination Control // Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. - 433р.

4. Тимиркеев, Р.Г. Промышленная чистота и тонкая фильтрация жидкостей летательных аппаратов/ Р.Г.Тимиркеев, В.М. Сапожников. - М.: Машиностроение, 1986.-152с.

5. Черненко, Ж.С. Гидравлические системы транспортных самолетов/ Ж.С.Черненко [и др.]. – М.: Транспорт, 1975. – 184с.

6. Прохоров, С.А. Прикладной анализ случайных процессов/С.А. Прохоров [и др.] под ред. С.А.Прохорова. -Самара: СНЦ РАН, 2007. -582с.
7. Бендат, Дж. Измерение и анализ случайных процессов/Дж. Бендат, А.Пирсол. -М.: Мир, 1974.-463с.
8. Прохоров, С.А. Аппроксимативный анализ случайных процессов/С.А.Прохоров. - Самар. гос. аэрокосм. ун-т, -Самара, 2001. - 329 с.

### References

1. L.M. Logvinov Technical Diagnostics liquid Systems of hydraulic Systems of the process Environment on hydraulic Fluid Moscow: "CNTI"Poisk" (Search) , 1992.-91p. [in Russian]
2. G.A. Nikitin and S. V. Chirkov, Influence of Fluid Contamination on Reliability of Hydraulic System of Aircraft Moscow: "Transport", 1969. – 184p. [in Russian]

3. Fitch E.C. Fluid Contamination Control // Technology transfer Series #4, Oklahome, FFS, INC. 1988. - 433p.
4. R.G. Timirkeev, V.M. Sapozhnikov, Industrial cleanliness and fine filtration of liquids of aircrafts. Moscow: "Mashinostroenie" (Mechanical engineering), 1986.-152p. [in Russian]
5. J.S. Chernenko, G.S. Lagosuk, Hydraulic systems of transport aircraft. Moscow: "Transport", 1975, 184p.
6. S.A. Prokhorov, A.V. Grafkin, V.V. Grafkin and other, Application study of random process, edited by S.A. Prokhorov Samara branch of Russian Academy of Sciences, 2007, 582p., – [in Russian].
7. Bendat J, Piersol A, Measurement and analysis of random data Moscow: "Mir" (World), 1974.-463p. [in Russian]
8. S.A. Prokhorov, Approximative analysis of random Processes, Samara State Aerospace University, 2001, 329p. [in Russian]

## USE OF APPROXIMATIVE ANALYSIS OUTCOME OF EXPERIMENT IN PROBLEM OF DIAGNOSTICS TECHNICAL CONDITIONS OF HYDRAULIC SYSTEMS

© 2009 K. Y. Malchikov, L. M. Logvinov, M. A. Kovalev

Samara State Aerospace University

The problem of increasing the sensitivity of the built-in control sensors of parameters particles of contamination in a working fluid of hydraulic systems is considered. We offer the algorithm of processing of experimental data about distribution of contamination particles powder. The technique of forecasting distribution of contamination particles powder in the size less then  $5\mu\text{m}$  by data about distribution of larger particles is described

*Built-in sensor, technical state of hydraulic system diagnosis, distribution of contamination particles powder, approximation of probability density function*

### Информация об авторах

**Мальчиков Константин Юрьевич** – аспирант кафедры Радиотехнических устройств, Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 8-(960)-8139010. E-mail: [malq@inbox.ru](mailto:malq@inbox.ru). Область научных интересов: датчики встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости, тензорный анализ систем.

**Логвинов Леонид Митрофанович** - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Радиотехнических устройств Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 8-(846)-3356422, 8-(846)-2674550. E-mail: [rtu@ssau.ru](mailto:rtu@ssau.ru). Область научных интересов: датчики встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости, тензорный анализ систем.

**Ковалев Михаил Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент, начальник военной кафедры Самарского государственного аэрокосмического университета. Тел. 8-(846)-2674422, 8-(846)-2615089. E-mail: [kovalev@ssau.ru](mailto:kovalev@ssau.ru). Область научных интересов: повышение

надежности гидросистем воздушных судов, упреждающее обслуживание, диагностические системы технического состояния гидросистем по параметрам частиц износа, датчики встроенного контроля уровня загрязнения рабочей жидкости, тензорный анализ систем.

**Malchikov Konstantin Yurjevich** – postgraduate of Samara State Aerospace University. Phone: 8-(960)-8139010. E-mail: [malq@inbox.ru](mailto:malq@inbox.ru). Area of research: tensor analysis of systems.

**Logvinov Leonid Mitrofanovich** – doctor of technical science, professor, chief of Samara State Aerospace University department. Phone: 8-(846)-3356422, 8-(846)-2674550. E-mail: [rtu@ssau.ru](mailto:rtu@ssau.ru). Area of research: gauges of the built - in control of a level of contamination of a working liquid, tensor analysis of systems.

**Kovalev Mihail Anatolievich** - the chief of military faculty of Samara State Aerospace University. Phone: 8-(846)-2674422, 8-(846)-2615089. E-mail: [kovalev@ssau.ru](mailto:kovalev@ssau.ru). Area of research: Increase of reliability of hydrosystems of the aircrafts, proactive maintenance, diagnostic systems of a technical condition of hydrosystems on parameters of particles contamination, gauges of the built - in control of a level of contamination of a working liquid, tensor analysis of systems.