

На правах рукописи

Зотин

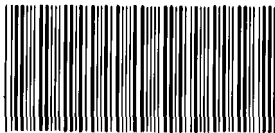
Зотин Никита Александрович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДА И СРЕДСТВ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОМПАЖА
ДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ САМОЛЁТА**

Специальность 05.07.07 – Контроль и испытание летательных аппаратов и их систем

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук



005560840

18 MAR 2015

Самара – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) на кафедре эксплуатации авиационной техники.

Научный руководитель: Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

- доктор технических наук, старший научный сотрудник Ушаков Андрей Павлович – заведующий кафедрой диагностики и неразрушающего контроля технических систем федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации»;

- доктор технических наук, профессор Носырев Дмитрий Яковлевич – профессор кафедры «Локомотивы» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Самарский государственный университет путей сообщения».

Ведущая организация:

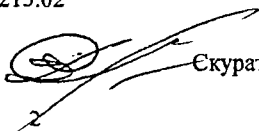
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет».

Защита состоится 24 апреля 2015 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.02, созданного на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)» (СГАУ) по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)», адрес сайта: <http://www.ssau.ru>.

Автореферат разослан 2 марта 2015 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.215.02
доктор технических наук,
профессор

 Скуратов Д.Л.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Газотурбинные двигатели (ГТД) за последние шестьдесят лет стали основным типом двигателя, применяемым в современной авиации. Они также нашли применение на сухопутном, водном, железнодорожном транспорте и в энергетике. Вне зависимости от сферы применения эффективность двигателя во многом определяет эффективность системы, в которой он используется в качестве силовой установки.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, созданный серийный двигатель эксплуатируется в течение длительного срока – 30-35 лет. Для обеспечения требуемого уровня характеристик ГТД в течение всего указанного периода эксплуатации требуется стратегия его технического обслуживания, основанная на методах, моделях, средствах определения, поддержания и восстановления его технического состояния (ТС).

Современные системы контроля, диагностики и прогнозирования (СКДиП) ТС двигателя, отличаются узкой направленностью, т.е. они способны с достаточной точностью определять и прогнозировать лишь некоторые из регламентируемых эксплуатационной документацией ТС, для определённых типов ГТД. Проведение более полных работ по диагностике ГТД, как правило, требует его демонтажа с борта летательного аппарата (ЛА), что ведёт к простоя авиационной техники или необходимости содержать резервный парк двигателей.

В связи с этим существует проблема оперативного определения и прогнозирования ТС ГТД. Использование адаптируемых к различным типам двигателей систем анализа полётной информации с целью оценки ТС ГТД позволит решить эту проблему за счёт того, что, во-первых, снизится количество тестовых воздействий на двигатель или вообще пропадёт в них потребность при его диагностике и прогнозировании, во-вторых, будет исключена необходимость демонтажа ГТД для определения его ТС. Следует отметить, что на данный момент таких систем не существует.

Таким образом, разработка методов, моделей и средств оперативного определения и прогнозирования ТС ГТД с использованием регистрируемой бортовыми автоматизированными системами контроля (БАСК) полётной информации является актуальной задачей, решение которой при массовом внедрении позволит: уменьшить время простоя техники, сократить объём резервного парка двигателей, снизить затраты на восстановление техники.

Степень разработанности темы диссертации. Вопросам диагностики и контроля ГТД посвящены работы Елисеева Ю.С., Крымова В.В., Малиновского К.А., Попова В.Г., Кебы И.В., Киселёва Ю.В., Епишева Н.И., Ионова Д.А., Короткова В.Б., Шепеля В.Г., Егорова И.В., Карасаева В.А., Максимова В.П., Жернакова С.В., Дубровина В.И., Григорьева В.А., Епифанова С.В., Лободы В.И., Васильева В.И., Бобовича А.Т., Кулика Н.С., Сорокина К.А., Чичкова Б.А., Богуслава А.В., Субботина С.А., Третьякова О.Н. и др. В этих работах изложены как общие методики, рекомендации и указания для определения ТС ГТД, так и описаны СКДиП для конкретных типов двигателей. Существенным недостатком при использовании общих методик является выполнение большого объёма работ для приложения их к решению частных задач диагностики двигателя, а к недостаткам конкретных СКДиП относится невозможность их применения для определения ТС различных типов ГТД.

Цель работы. Повышение эффективности процесса эксплуатации силовой установки самолёта.

Задачи исследования:

- 1 Разработка концептуальной модели представления ТС ГТД.
- 2 Разработка математической модели определения прогностических параметров и признаков предпомпажного ТС двигателя.
- 3 Разработка математической модели прогностических критериев предпомпажного ТС двигателя.
- 4 Разработка и реализация в программной среде методики прогнозирования предпомпажного ТС двигателя.

Научная новизна результатов исследования заключается в том, что впервые:

– в рамках точного формализма теории образов У. Гренандера, а также на базе теории множеств и мультимножеств предложена концептуальная модель представления ТС ГТД;

– на основании концептуальной модели синтезированы следующие математические модели: модель определения прогностических параметров предпомпажного ТС двигателя, модель определения прогностических признаков предпомпажного ТС двигателя, модель прогностических критериев предпомпажного ТС двигателя;

– установлено подобие контрольных и диагностических критериев ТС, а также их совпадение с прогностическими критериями, что позволяет с незначительными корректировками распространять методику прогнозирования на контроль и диагностирование объектов вообще и ГТД в частности.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработанная концептуальная модель представления ТС ГТД и построенные на её базе математические модели для определения прогностических критериев являются теоретической основой для разработки прикладных методик определения ТС многорежимных объектов.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанные методики определения прогностических критериев предпомпажного ТС ГТД, проверенные на примере экспериментального двигателя Д-18Т в составе силовой установки самолёта Ан-124 «Руслан», позволяют снизить затраты на содержание парка двигателей и выполнение работ по периодическому обслуживанию и замене агрегатов ГТД.

Методы исследования. При решении поставленных в работе задач использованы методы теории синтеза образов У. Гренандера, теории идентификации, теории множеств и мультимножеств, статистического анализа рядов динамики и теории вероятности.

Объект исследования:

Силовая установка самолёта.

Предмет исследования:

Методы, модели и алгоритмы оценки технического состояния газотурбинного двигателя.

Положения, выносимые на защиту:

- 1 Концептуальная модель представления ТС ГТД.

2 Математическая модель определения прогностических параметров и признаков предпомпажного ТС двигателя.

3 Математическая модель прогностических критериев предпомпажного ТС двигателя.

4 Методика прогнозирования предпомпажного ТС двигателя.

Степень достоверности и апробация результатов.

Основные положения диссертационной работы докладывались на симпозиуме с международным участием «Самолётостроение России. Проблемы и перспективы» (Самара, СГАУ, 2012 г.), международной научной молодёжной конференции «XII Королёвские чтения» (Самара, СГАУ, 2013 г.), XVI Всероссийском семинаре по управлению движением и навигации летательных аппаратов (Самара, СГАУ, 2013 г.), IV Международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (Ульяновск, 2014 г.).

По теме диссертации опубликовано 11 работ, в том числе 4 из них в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, определённых Высшей аттестационной комиссией РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх разделов, заключения, списка использованной литературы из 108 наименований. Основная часть диссертации изложена на 163 страницах, содержит 49 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отмечена актуальность темы диссертации, поставлена цель исследования, изложена степень разработанности темы, её научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов исследования.

В первом разделе диссертации проведено исследование ГТД как объекта технического обслуживания и ремонта с учётом антипомпажных систем и факторов, влияющих на границу газодинамической устойчивости. Помимо этого в данном разделе приведён обзор существующих СКДиП ГТД. В разделе представлены возможные виды моделей, применяемых для описания ГТД. Среди них отмечены те, использование которых в задаче определения и прогнозирования ТС рационально. Такими являются модели идентификации.

В заключении отмечено, что к основным недостаткам существующих СКДиП относятся: неспособность различать с достаточной точностью все регламентируемые эксплуатационной документацией ТС; необходимость объёмных трудозатрат на модификацию систем для их адаптации к диагностике новых типов ГТД или обеспечения возможности определять большее количество ТС; низкая оперативность процесса определения ТС.

Проведённый анализ позволил сформулировать цели и задачи исследования.

Второй раздел посвящён разработке концептуальной модели определения предпомпажного ТС ГТД. Концептуальная модель синтезирована в рамках точного формализма теории образов У. Гренандером, которая базируется на четырёх принципах: образующих (непроизводные элементы), конфигурациях (соединения

образующих по определённым правилам), идеальных изображениях и механизме деформации, переводящего «идеальный образ» в реальный.

В качестве исходных данных для описания ТС и, как следствие, производных образующих концептуальной модели использована информация с бортовой автоматизированной системы контроля (БАСК) двигателя. БАСК регистрирует около девяти сот параметров систем самолёта, внешней среды и разовых сигналов. К параметрам, характеризующим ГТД и регистрируемым БАСК, относятся: частота вращения ротора вентилятора двигателя, ротора турбины высокого давления, ротора турбины среднего давления; угол установки рычага управления двигателем; температура газов за турбиной среднего давления двигателя; общая степень повышения давления в компрессорах двигателя; расход топлива двигателя; вибросмещение вентилятора по переднему датчику вибрации, по заднему датчику вибрации; виброскорость турбокомпрессора по переднему датчику вибрации, по заднему датчику вибрации; суммарная степень повышения давления по высотной градуировочной характеристике, по наземной градуировочной характеристике в двигателе и др.). В течении полёта в среднем записывается около 10800 значений каждого параметра.

Предварительная обработка для построения набора производных элементов модели базируется на обработке множества полётных файлов. Каждый полётный файл формально представлен мультимножеством

$$X = \{F_h\}_{h=1}^{n_p} = \left\{ \left[\{c(x_i) \cdot x_i\}_{i=1}^{n_x} \right]_h \right\}_{h=1}^{n_p} = \{k(x_i) \cdot x_i\}_{i=1}^{n_x}, \quad (1)$$

где $k(x_i) \cdot x_i$ – компонента мультимножества X , содержащая все измеренные за полёт $k(x_i)$ раз значения параметра x_i ; F_h – h -тый кадр в полётном файле; n_p – число кадров зарегистрированных за один полёт.

В каждый кадр F_h записаны одновременно измеренные значения параметров двигателя, то есть формально кадр также имеет вид мультимножества

$$F = \{c(x_i) \cdot x_i\}_{i=1}^{n_x},$$

где $c(x_i) \cdot x_i$ – компонента мультимножества F , содержащая все записанные в один кадр значения параметра x_i ; n_x – число регистрируемых параметров.

Обобщённая постановка задачи определения ТС ГТД имеет вид трёхкомпонентной системы

$$\mathcal{K} = \langle \mathcal{K}_3; \mathcal{K}_{усл}; \mathcal{K}_{mp} \rangle,$$

где \mathcal{K}_3 – исходные данные для решения задачи; $\mathcal{K}_{усл}$ – условия и ограничения, которые должны быть выполнены в процессе решения; \mathcal{K}_{mp} – результат, который необходимо достичь при решении задачи.

Решение задачи определяется каждой компонентой.

Исходные данные представляют собой множества полётных файлов, записанных БАСК, нескольких экземпляров ГТД.

Следует отметить, так как каждый из полётных файлов описывает уже совершившийся полёт, то известны и ТС экземпляров двигателей на начало каждого из полётов, полученные экспертными оценками.

Таким образом, формально исходные данные имеют вид:

$$\mathcal{K}_3 = \left\{ \left\{ \left[X, s, t \right]^{l,n} \right\}_{n=1}^{N_l} \right\}_{l=1}^{N_w}, \quad (2)$$

где X в тройке $[X, s, t]^{l,n}$ – мультимножество зарегистрированных значений параметров за n -ый полёт l -гого экземпляра ГТД; s в тройке $[X, s, t]^{l,n}$ – техническое состояние ГТД на начало n -гого полёта l -гого экземпляра ГТД; t в

тройке $[X, s, t]^{l,n}$ – момент времени окончания n -ного полёта l -того экземпляра ГТД; N_l – количество полётов l -того экземпляра ГТД; n_w – количество экземпляров ГТД.

Условия и ограничения имеют вид:

$$\mathcal{K}_{ycl} = (SuppX = const),$$

где $SuppX$ – множество-перечень регистрируемых БАСК параметров,

$$SuppX = \{x_i\}_{i=1}^{n_x},$$

где x_i – регистрируемый параметр.

Требуемый результат имеет вид:

$$\mathcal{K}_{mp} = \langle M1, M2 \rangle,$$

где $M1$ – модель критериев ТС; $M2$ – модель определения ТС.

Компоненты предварительной обработки \mathcal{K}_3 и \mathcal{K}_{ycl} являются основными образующими для получения оценки ТС ГТД.

Разработанная концептуальная модель ТС ГТД представлена на рисунке 1. Данная конфигурация состоит из следующих образующих:

- «ГТД» является источником множества значений $\{u_i\}_{i=1}^{n_u}$ параметров ГТД;
- «Внешняя среда» является источником множества значений $\{r_i\}_{i=1}^{n_r}$ параметров внешней среды;

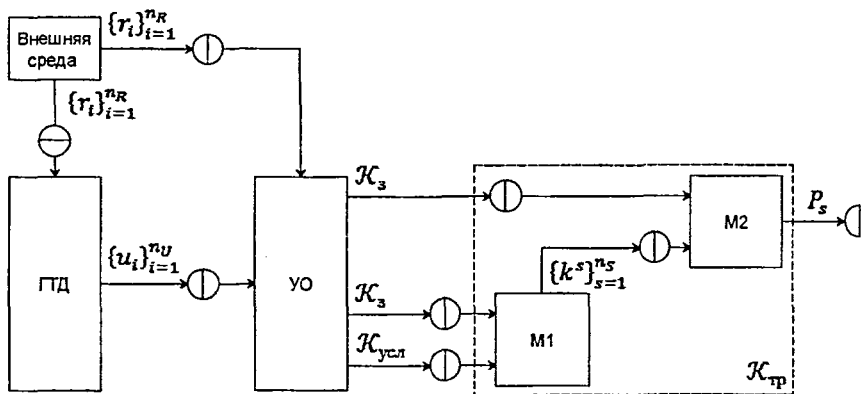


Рисунок 1 – Концептуальная модель представления ТС

– «УО» – универсальный оператор. Данная образующая формирует компоненты постановки задачи \mathcal{K}_3 и \mathcal{K}_{ycl} из принятых множеств $\{u_i\}_{i=1}^{n_u}$ и $\{r_i\}_{i=1}^{n_r}$:

$$X \subseteq \left\{ \left[\{r_i\}_{i=1}^{n_r} \cup \{u_i\}_{i=1}^{n_u} \right]_j \right\}_j^T,$$

где $\left[\{r_i\}_{i=1}^{n_r} \cup \{u_i\}_{i=1}^{n_u} \right]_j$ – множество значений параметров внешней среды и ГТД соответственно, зарегистрированных в j -тый момент времени; T – количество моментов времени. ТС s объекта в (2) получается на основании экспертной оценки, реализацию которой осуществляет образующая «УО»;

– $M1$ образующая модели определения критериев контроля, диагностирования и прогнозирования ТС;

– M2 образующая модели реализации данных критериев;

P_s на рисунке 1 – вероятность перехода ГТД в ТС s (в нашем случае в предпомпажное ТС), $\{k^s\}_{s=1}^{ns}$ – множество критериев различных ТС.

Разработанные модели M1 и M2 являются концептуальной основой математических моделей для решения задачи оценки ТС ГТД.

В третьем разделе на основе концептуальной модели разработаны математические модели вычисления прогностических параметров, признаков, критериев прогнозирования предпомпажного ТС, а также модели реализации полученных критериев для прогнозирования помпажа ГТД.

Модели разработаны с учётом двух существенных особенностей ГТД, а также с принятием одного допущения. Особенности ГТД заключаются следующим.

Во-первых, двигатель является многорежимным объектом, следовательно, любое ТС ГТД характеризуется множеством его дроссельных характеристик. Во-вторых, каждый экземпляр ГТД обладает индивидуальным набором своих характеристик, соответствующих различным ТС.

Выбор дроссельной характеристики в качестве основы для прогнозирования помпажа связан с тем, что для снятия климатической или скоростной характеристики следует обеспечить изменение атмосферных или полётных параметров в широких пределах, что значительно сложнее, чем обеспечить большой диапазон изменения режимного параметра.

Допущение состоит в том, что при переходе двигателя из одного ТС в другое, его дроссельные характеристики сохраняют свою кривизну и только параллельно перемещаются вдоль оси режимного параметра. Следовательно, для решения задачи прогнозирования ТС ГТД его необходимо характеризовать множеством величин – признаков ТС. Каждая из этих величин должна компактно и в относительных единицах представлять дроссельную характеристику.

Таким образом, в качестве признаков ТС было принято использовать относительные приведённые значения параметров (ОПЗП) ГТД, полученные путём анализа полётной информации, зарегистрированной БАСК. ОПЗП и двигателя – это отношение приведённого значения параметра (ПЗП) и двигателя находящегося в ТС s , к ПЗП и двигателя, находящегося в начальном эксплуатационном ТС s^0 . ПЗП и называется величина u , соответствующая стандартным атмосферным условиям, а также одному и тому же режиму работы двигателя. Начальным эксплуатационным называется ТС ГТД после его производства или капитального ремонта, которое характеризуется набором дроссельных характеристик, построенных на базе измерений, произведённых БАСК.

Критерий перехода ГТД в предпомпажное ТС s имеет вид

$$k^s: [P_s > P_{kp} = true] \Rightarrow w = w^s, \quad (3)$$

где k^s – критерий перехода ГТД в ТС s ; P_s – вероятность попадания ОПЗП в критериальную область ТС s , то есть область значений, соответствующую этому ТС s ; P_{kp} – критический уровень значения вероятности P_s , при превышении которого считается, что объект перейдёт в ТС s ; $w = w^s$ – символическая запись того, что двигатель перешёл в состояние s .

Для определения критериальных областей ТС s и критериальных областей не соответствующих ТС s , исходные данные для решения задачи (2) были разделены на две группы – контрольную и экспериментальную. Экспериментальная группа должна состоять из полётных файлов ГТД, перешедших за период эксплуатации в

ТС s ; контрольная группа должна состоять из полётных файлов ГТД, не перешедших за период эксплуатации в ТС s . Деление на группы основано на ранее проведённых экспертных оценках ТС ГТД, каждая из которых соответствует одному из полётных файлов. Дальнейший анализ обеих групп даст искомые критериальные области.

Математические модели построены на базе регулярных конфигураций вычислительного процесса операций обработки исходных, зарегистрированных за полёты, параметров (на примере вычисления прогностических параметров предпомпажного ТС ГТД Д-18Т).

Эти модели, объединённые между собой, представлены на рисунке 2.

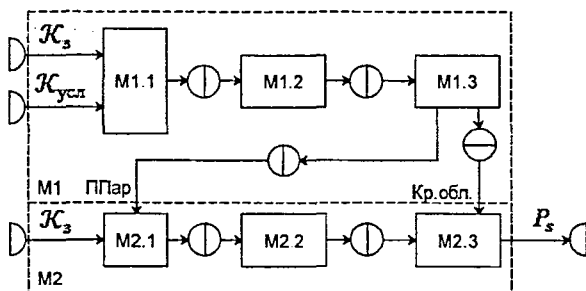


Рисунок 2 – Математические модели вычисления и применения критериев прогнозирования

Данная конфигурация состоит из следующих операторных образующих.

M1.1 – образующая построения дроссельных характеристик параметров исходных данных и рядов динамики ОПЗП формально имеет вид системы

$$\begin{cases} \mathcal{K}_s = \{ \{ \{ X, s, t \}^{l,n} \}_{n=1}^{N_l} \}_{l=1}^{n_w^s}, \\ \{ \mathcal{P}_i = u_i(q) \}_{i=1}^{n_x}, \\ \tilde{u}_i(80) = \frac{u_i(80)}{u_i^0(80)}. \end{cases}$$

В системе \mathcal{P}_i – полином аппроксимации дроссельной характеристики параметра u_i .

M1.2 – образующая построения критериальных областей (обозначение на рисунке 2 – Кр.обл.), формально имеет вид системы

$$\begin{cases} D_{u_i}^s = \bigcup_{l=1}^{n_w^s} \text{Prog} \left(\{ \tilde{u}_{l,n,l}(80) \}_{n=1}^{N_l} \right), \\ D_{u_i}^{\bar{s}} = \bigcup_{l=1}^{n_w^{\bar{s}}} \text{Meen} \left(\{ \tilde{u}_{l,n,l}(80) \}_{n=1}^{M_l} \right). \end{cases}$$

В системе $\tilde{u}_{l,n,l}(80)$ – ОПЗП u_i , соответствующее полёту № n , l -того образца ГТД; N_l – число полётов l -того образца ГТД; $D_{u_i}^s$ – критериальная область предпомпажного ТС s ; $D_{u_i}^{\bar{s}}$ – критериальная область, не соответствующая предпомпажному ТС s ; Prog – оператор интервального прогноза; Meen – оператор

построения доверительного интервала математического ожидания; n_{W^s} – количество ГТД в контрольной группе; n_{W^s} – количество ГТД в экспериментальной группе.

M1.3 – образующая вычисления прогностического признака и параметра ТС s , а также синтеза критерия перехода ГТД в предпомпажное ТС s формально имеет вид системы

$$\begin{cases} Acc(u_k) = \inf\{Acc(u_i) | [D_{u_i}^s \not\subseteq D_{u_i}^s] \cup [D_{u_i}^s \not\subseteq D_{u_i}^s]\}_{i=1}^{nu} \Rightarrow \\ \Rightarrow [\tilde{u}_k(80) = PPP^s, u_k = PPPap^s], \\ k^s: [P_s > P_{kp} = true] \Rightarrow w = w^s, \end{cases}$$

где $Acc(u_k)$ – погрешность измерения параметра u_k ГТД; $\tilde{u}_k(80) = PPP^s$ – формальная запись того, что ОПЗП $\tilde{u}_k(80)$ является прогностическим признаком; $u_k = PPPap^s$ – формальная запись того, что u_k является прогностическим параметром (обозначение на рисунке 2 – ППар); k^s – критерий перехода в ТС s (3).

M2.1 – образующая построения дроссельной характеристики прогностического параметра формально имеет следующий вид

$$\begin{cases} \mathcal{K}_3 = \{[X, t]\}_{n=1}^N, \\ u_k = PPPap^s, \\ \{[P_{u_k} = u_k(q)]_n\}_{n=1}^N. \end{cases}$$

M2.2 – образующая интервального прогнозирования прогностического признака, формально имеет следующий вид

$$\begin{cases} \tilde{u}_k(80) = \frac{u_k(80)}{u_k^0(80)}, \\ D_{u_k} = Prog\left(\{\tilde{u}_{k,n}(80)\}_{n=1}^N\right). \end{cases}$$

M2.3 – образующая определения вероятности P_s перехода ГТД в ТС s , формально имеет вид системы

$$\begin{cases} P_s = P(\forall \tilde{u}_k(80) \in D_{u_k}, \tilde{u}_k(80) \in D_{u_k}^s \wedge \tilde{u}_k(80) \notin D_{u_k}^{\bar{s}}), \\ [P_s > P_{kp} = true] \Rightarrow w = w^s. \end{cases}$$

В системе P_s – вероятность того, что значение прогностического признака попадёт в критериальную область ТС s , то есть вероятность перехода ГТД в ТС s ; D_{u_k} – область значений ОПЗП u_k , результат интервального прогноза.

Рассмотрим приведённые в разделе составляющие модели, представленные на рисунке 2, более детально.

Как было сказано ранее в качестве прогностических признаков в настоящей работе выступают ОПЗП. Графически модель алгоритма определения ОПЗП и ГТД, соответствующего одному полёту двигателя, выглядит следующим образом (рисунок 3).

На рисунке 3: R – множество значений параметров внешней среды; U – множество значений параметров ГТД; $u(q)$ – модель дроссельной характеристики; $u(q)$ – ПЗП; $\tilde{u}(80)$ – ОПЗП. Представленная конфигурация состоит из следующих образующих: «Полётный файл» – источник значений параметров ГТД и атмосферных условий, зарегистрированных за один полёт; «Аппроксимация» – оператор аппроксимации табличных данных, представленных множествами R и U ; «Вычисление значения функции» – оператор вычисления значения функции от

заданного аргумента; «/» – оператор деления. Пунктирными линиями показаны производные образующие.

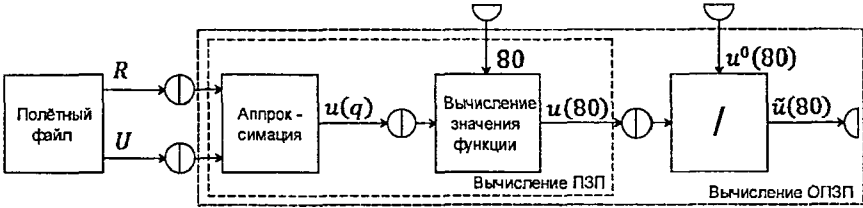


Рисунок 3 – Модель алгоритма определения относительного приведённого значения параметра двигателя

Для определения ПЗП дроссельная характеристика параметра u двигателя представляется полиномом третьей степени, полученным аппроксимацией табличных значений $\{[u(h), q(h)]\}_{h=1}^{n_F}$:

$$P = u(q) = \sum_{j=0}^3 A_j q^j,$$

где $u(h)$ в паре $[u(h), q(h)]$ – значение параметра u ГТД, записанное в кадр h ; $q(h)$ в паре $[u(h), q(h)]$ – значение режимного параметра ГТД, записанное в кадр h ; n_F – количество кадров в полётном файле; $P = u(q)$ – полином третьей степени, модель дроссельной характеристики изначально представленной в табличном виде.

В качестве режимного параметра была выбрана частота вращения вентилятора двигателя n_e , так как данный параметр измеряется с погрешностью, которая не превышает погрешности измерения других параметров.

ПЗП является компактным представлением дроссельной характеристики и определяется по модели $P = u(q) = u(n_e)$ для $n_e = 80\%$.

ОПЗП u определяется выражением

$$\tilde{u}(80) = \frac{u(80)}{u^0(80)},$$

где $u(80)$ – приведённое значение параметра u ; $u^0(80)$ – приведённое значение параметра u , соответствующее начальному эксплуатационному ТС s^0 двигателя; $\tilde{u}(80)$ – относительное приведённое значение параметра u .

Для определения параметров, относительные приведённые значения которых при прогнозировании предпомпажного ТС использовать наиболее рационально, следует рассчитать критериальные области ОПЗП, соответствующие предпомпажному и непредпомпажному ТС двигателя. Для этого необходимо построить ряды динамики ОПЗП экземпляров двигателей из контрольной и экспериментальной группы.

Математическая модель алгоритма построения ряда динамики ОПЗП представлена на рисунке 4.

Данная конфигурация состоит из следующих образующих: «Выч. ПЗП» и «Выч. ОПЗП» – операторы вычисления ПЗП и ОПЗП соответственно (входят в конфигурацию на рисунке 3); «Выч. $u^0(80)$ » – оператор вычисления ПЗП начального эксплуатационного ТС ГТД; «Объединение в множество» – образующая свёртки набора входных значений в множество.

Ряд динамики ОПЗП u представляет собой упорядоченное множество $\{\{\bar{u}(80)\}^i\}_{i=1}^N$, где $[u(80)]^i$ – ОПЗП двигателя в i -том полёте; N – число полётов. Графически ряд динамики ОПЗП представлен на рисунке 5.

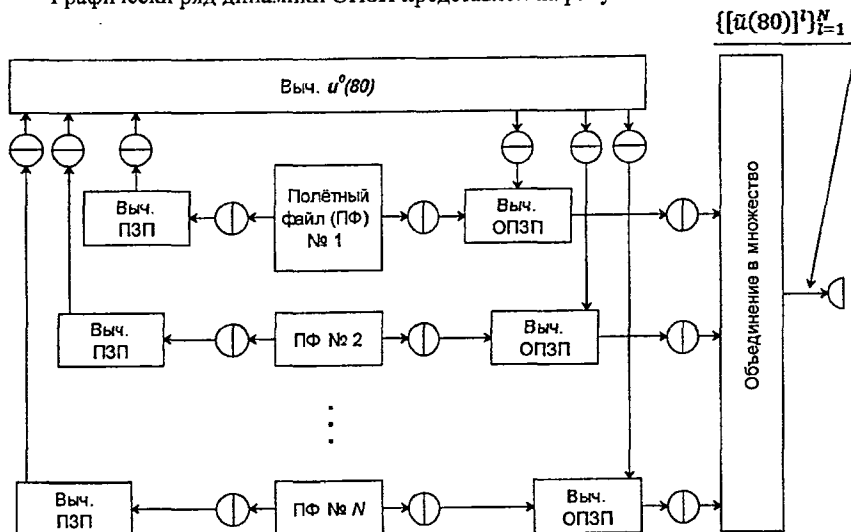


Рисунок 4 – Модель алгоритма построения ряда динамики ОПЗП

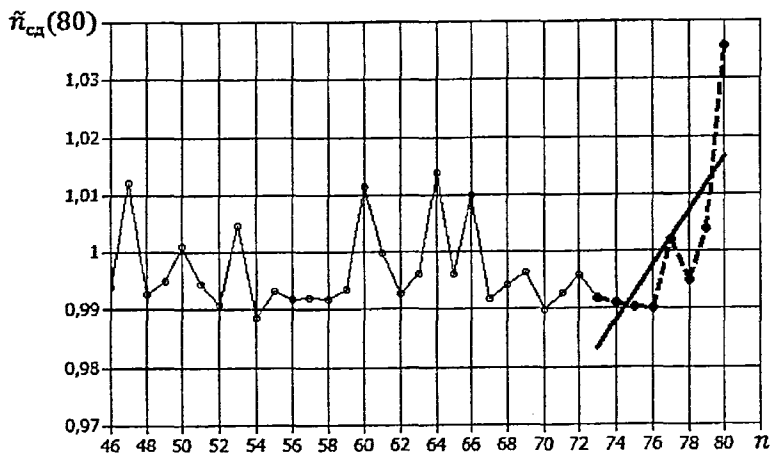


Рисунок 5 – Зависимость ОПЗП числа оборотов турбины среднего давления $\bar{n}_{сд}(80)$ от числа полётов ГТД n

Модель алгоритма определения критериальной области D^s ОПЗП u , соответствующая ТС s , представлена на рисунке 6.

Данная конфигурация состоит из уже известных производных и непроизводных образующих, а также образующей вычисления критериальной области («Выч. критериальной области»), осуществляющей интервальный прогноз, и операторной образующей объединения областей.

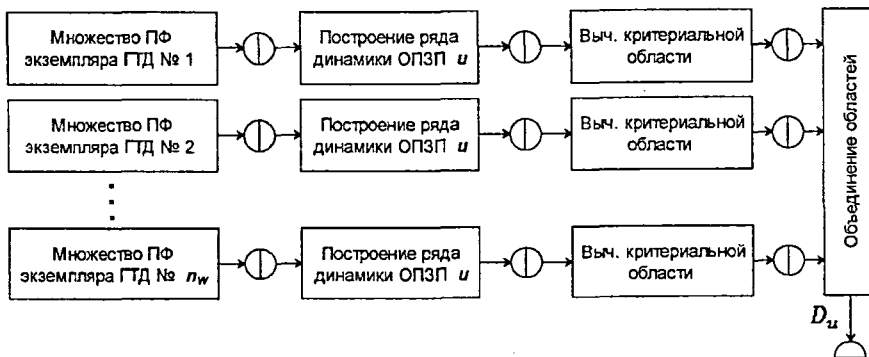


Рисунок 6 – Модель алгоритма определения критериальной области ОПЗП двигателя, соответствующей ТС s

Критериальная область ОПЗП u одного экземпляра ГТД, соответствующая ТС, D_u^s определяется методом интервального прогнозирования ОПЗП на момент времени полёта, в котором по заключению эксперта двигатель перешёл в ТС s .

При интервальном прогнозировании было принято допущение, что при переходе ГТД в предломпажное ТС появляется тенденция среднего уровня в «хвосте» ряда динамики ОПЗП, которая описывается линейной функцией (сплошная жирная линия на рисунке 5). «Хвост» ряда динамики носит название ряд наблюдений. Количество уровней m ряда наблюдений, анализ значений которых даёт интервальный прогноз, определяется исходя из значений введённых показателей оперативности и точности.

Для выбора оптимальной длины ряда наблюдений, описываемого адекватной моделью, определяется наилучшее соотношение масштабированных значений точности и оперативности прогноза

$$C_i = \frac{\widetilde{Act}_i}{\widetilde{Str}_i}.$$

Масштабированные значения коэффициентов Act_i и Str_i для каждого i -того ряда наблюдений определяются по формулам:

$$\widetilde{Act}_i = \frac{Act_i - \inf\{Act_i\}_{i=2}^M}{\sup\{Act_i\}_{i=2}^M - \inf\{Act_i\}_{i=2}^M},$$

$$\widetilde{Str}_i = \frac{Str_i - \inf\{Str_i\}_{i=2}^M}{\sup\{Str_i\}_{i=2}^M - \inf\{Str_i\}_{i=2}^M},$$

где \widetilde{Act}_i – масштабированное значение коэффициента Act_i ; \widetilde{Str}_i – масштабированное значение коэффициента Str_i ; $\{Act_i\}_{i=2}^M$ – множество всех значений коэффициентов оперативности рассматриваемых рядов наблюдений;

$\{Str_i\}_{i=2}^M$ – множество всех значений коэффициентов точности рассматриваемых рядов наблюдений; sup и inf – верхняя и нижняя граница множества соответственно.

В результате получается три зависимости от длины m ряда наблюдений $\widetilde{Act}(m)$, $\widetilde{Str}(m)$, $C(m)$ (рисунок 7).

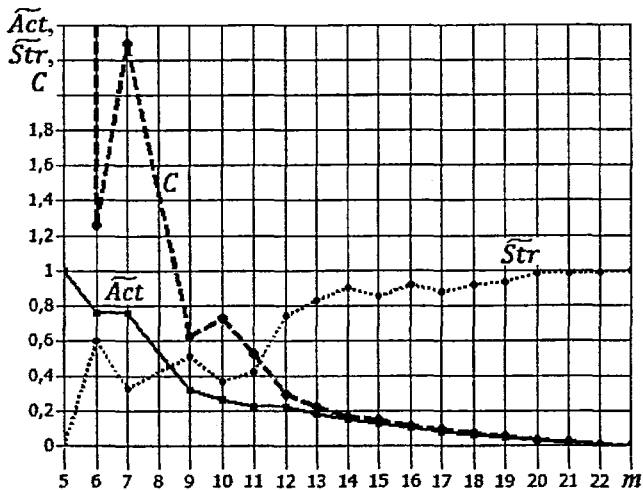


Рисунок 7 – Зависимости масштабированных показателей оперативности прогноза Act , точности прогноза Str и коэффициента их отношений C от количества уровней ряда наблюдений m

В диссертационной работе предложено считать оптимальной такую длину m ряда наблюдений, при которой коэффициент C достигает величины максимально близкой к единице или равной ей.

Используя линейную модель аппроксимации ряда наблюдений оптимальной длины ОПЗП одного экземпляра ГТД можно осуществить интервальный прогноз.

Путём объединения областей ОПЗП u , полученных при интервальном прогнозе рядов наблюдений нескольких экземпляров ГТД из экспериментальной группы, была получена критериальная область ОПЗП, соответствующая ТС s .

Критериальные области ОПЗП, не соответствующие предпомпажному ТС, определялись установлением доверительных интервалов математического ожидания сегментов рядов динамики ОПЗП ГТД контрольной группы, на которых не наблюдалась тенденция среднего уровня ряда. Сегменты ряда без тенденции среднего уровня устанавливались с использованием критерия Фостера-Стьюарта.

Критериальные области, соответствующие предпомпажному ТС и несоответствующие ему, были найдены описанным выше методом для множества параметров ГТД $\{u_i\}_{i=1}^{nU}$. Пересечение различных критериальных областей каждого параметра формирует области неопределённого ТС ГТД. При попадании прогнозируемого ОПЗП лишь в такую критериальную область – невозможно

предопределить ТС двигателя. Для одних параметров различные критериальные области пересекаются, для других – включают друг друга.

С использованием полученных критериальных областей были определены ОПЗП, которые являются признаками предпомпажного ТС.

Модель алгоритма определения признака ТС синтезирована из уже представленных моделей вычисления ОПЗП двигателя, построения ряда динамики ОПЗП и его критериальной области. Модель представлена на рисунке 8.

Параметрами, критериальные области относительных приведенных значений которых для различных ТС лишь пересекаются и не включают друг друга, являются: P_{mf} – давление топлива перед рабочими форсунками двигателя и G_m – расход топлива ГТД. Ввиду того, что точность измерения параметра P_{mf} выше, то только он был принят в качестве прогностического, а его относительное приведенное значение $\bar{P}_{mf}(80)$ является признаком предпомпажного ТС.

После определения прогностического признака в диссертационной работе было дано аналитическое обоснование того, каким образом приближение ГТД к предпомпажному ТС может влиять на изменение относительного приведенного значения давления топлива перед рабочими форсунками двигателя.

Модель алгоритма вычисления критерия прогнозирования ТС двигателя представлена на рисунке 9. Как следует из (3), критерием перехода в ТС s является значимая величина вероятности попадания ОПЗП в критериальную область ТС s .

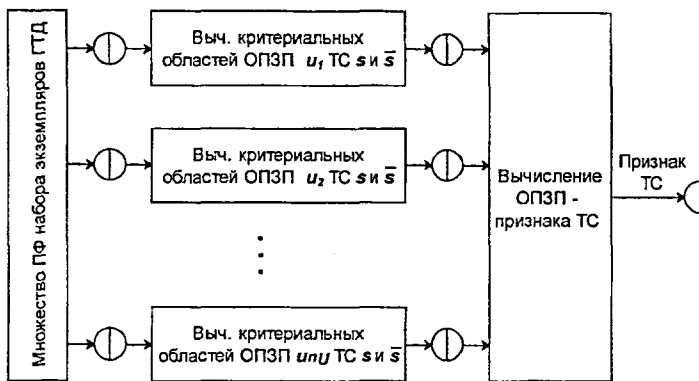


Рисунок 8 – Модель алгоритма вычисления признака ТС s

Для формирования критерия (3) необходимо знать критериальную область признака ТС и критический уровень вероятности $P_{кр}$ попадания значения признака в эту область.

Методы определения признака ТС и критериальной области были изложены при описании модели определения прогностических признаков и параметров. Значение $P_{кр}$ устанавливается оператором.

Для применения полученного критерия и расчета вероятности перехода ГТД в предпомпажное состояние используется метод интервального прогноза, описанный при построении критериальных областей, соответствующих предпомпажному ТС.

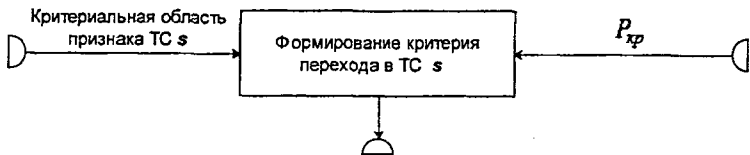


Рисунок 9 – Модель алгоритма вычисления критерия прогнозирования ТС

В конце третьего раздела в качестве примера была рассчитана вероятность перехода одного из экземпляров ГТД в предпомпажное ТС на основании следующих полученных в работе данных:

- критериальная область ОПЗП $\tilde{P}_{mf}(80)$ предпомпажного ТС, которая имеет вид числового промежутка $D_{\tilde{P}_{mf}}^s = [0,56; 1,05]$;
- критериальная область ОПЗП непередпомпажного ТС, которая имеет вид числового промежутка $D_{\tilde{P}_{mf}}^{\bar{s}} = [0,94; 1,14]$;
- точечный прогноз ОПЗП $\tilde{P}_{mf}(80)$ исследуемого экземпляра ГТД, который составил $M = 0,73$ с дисперсией $D^* = 0,013$.

С использованием значений M и D^* , а также полученных критериальных областей, были рассчитаны следующие вероятности:

- вероятность попадания в критериальную область предпомпажного ТС $D_{\tilde{P}_{mf}}^s$

$$P(D_{\tilde{P}_{mf}}^s) = 0,92 ;$$

- вероятность попадания в критериальную область непередпомпажного ТС $D_{\tilde{P}_{mf}}^{\bar{s}}$

$$P(D_{\tilde{P}_{mf}}^{\bar{s}}) = 0,07 ;$$

- вероятность попадания в критериальную область неопределённого ТС $D_{\tilde{P}_{mf}}^s \cap D_{\tilde{P}_{mf}}^{\bar{s}}$

$$P(D_{\tilde{P}_{mf}}^s \cap D_{\tilde{P}_{mf}}^{\bar{s}}) = 0,01.$$

Полученное значение вероятности наступления помпажа ($P = 0,92$), а также тот факт, что данное событие произошло в прогнозируемый период, позволяет сделать заключение о приемлемости предлагаемой методики оценки технического состояния ГТД.

В четвертом разделе разработаны алгоритмы методик определения состава контрольных, диагностических и прогностических признаков; вычисления и прогнозирования их значений; формирования критериев определения помпажа ГТД.

На базе этих методик реализовано программное обеспечение, позволяющее спрогнозировать предпомпажное состояние ГТД Д-18Т.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена актуальная научно-техническая задача разработки методики прогнозирования предпомпажного ТС ГТД, имеющая существенное значение для повышения эффективности процесса эксплуатации двигателя и безопасности полетов.

По итогам работы можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1 Проведённый анализ средств, методов, алгоритмов и моделей контроля диагностики и прогнозирования помпажа ГТД показал, что в настоящее время не существует универсальной методики определения предпомпажного ТС двигателя, которую возможно оперативно адаптировать к любому типу ГТД.

2 В рамках точного формализма теории образов У. Гренандера разработана концептуальная модель представления ТС ГТД, которая позволяет синтезировать математические модели определения диагностических параметров и признаков, математические модели критериев диагностики помпажа ГТД.

3 Разработана математическая модель определения диагностических параметров и признаков предпомпажного ТС ГТД. Признаками являются относительные приведённые значения параметров ГТД, критериальные области которых, соответствующие различным ТС, не включают друг друга.

В качестве прогностических параметров предпомпажного ТС были определены давление топлива перед рабочими форсунками двигателя и расход топлива двигателя. Аналитическое подтверждение выбора данных параметров заключается в том, что при понижении КПД компрессора повышается расход топлива, что приводит к смещению дроссельной характеристики ГТД к границе газодинамической устойчивости.

4 Разработана математическая модель критерия оценки предпомпажного ТС ГТД.

Необходимый для реализации данного критерия на практике расчет критериальной области и области значений прогностического признака производится с использованием математического аппарата анализа рядов динамики, в качестве которых выступают множества относительных приведённых значений параметров ГТД, соответствующие различным полётам.

5 Указанные ранее математические модели реализованы в программной среде LabView и позволяют определить как критериальные области и прогностические признаки предпомпажного ТС двигателя, так и, основываясь на них, спрогнозировать вероятность перехода в это ТС, анализируя множество полётных файлов, содержащих зарегистрированные значения параметров ГТД и внешней среды.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ, ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, рекомендованных ВАК:

1 Зотин, Н.А. Задача контроля и прогнозирования технического состояния газотурбинного двигателя [Текст] / Н.А. Зотин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королёва. – 2014. – № 4(46). – С. 67 – 73.

2 Зотин, Н.А. Методика синтеза критериев оценки состояния газотурбинных двигателей [Текст] / Н.А. Зотин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т.15. – №6(3). – С. 724 – 727.

3 Зайцев, А.А. Программное обеспечение модуля коммутации и управления микропроцессорной автоматизированной системы контроля авионики [Текст] / А.А. Зайцев, Н.А. Зотин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2013. – Т.15. – №6(3). – С. 765 – 770.

4 Зотин, Н.А. Проблема оценки технического состояния динамических объектов [Текст] / Н.А. Зотин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т.16. – №1(5). – С. 1397 – 1401.

В других изданиях:

5 Зотин, Н.А. Задачи определения технического состояния сложных технических объектов на примере ГТД ДТ-18Т [Текст] / Н.А. Зотин // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013. – Ч. III. – С. 59 – 64.

6 Зотин, Н.А. Методика синтеза и анализа критериев оценки качества технического состояния авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / Н.А. Зотин // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013. – Ч. III. – С. 52 – 55.

7 Коптев, А.Н. Применение теории множеств и теории образов для формирования диагностических признаков ГТД [Текст] / А.Н. Коптев, Н.А. Зотин // Управление движением и навигация летательных аппаратов: сборник трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013. – Ч. III. – С. 56 – 58.

8 Коптев, А.Н. Идентификация сложных динамических объектов на примере авиационного двигателя ГТД ДТ-18Т [Текст] / А.Н. Коптев, Н.А. Зотин // Управление движением и навигация летательных аппаратов: Сборник трудов XVI Всероссийского семинара по управлению движением и навигации летательных аппаратов. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2013. – Ч. III. – С. 59 – 64.

9 Зотин, Н.А. Разработка методики синтеза диагностических признаков газотурбинных двигателей с использованием формализма теории множеств и теории образов на примере ДТ-18Т [Текст] / Н.А. Зотин // Вестник совета молодых учёных и специалистов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национально-исследовательского университета). – Самара: СГАУ, 2013. – № 2. – С. 99 – 102.

10 Зотин, Н.А. Описание и формальное представление этапов синтеза и анализа критериев оценки качества технического состояния авиационного газотурбинного двигателя [Текст] / Н.А. Зотин // Вестник совета молодых учёных и специалистов Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С. П. Королёва (национально-исследовательского университета). – Самара: СГАУ, 2013. – № 2. – С. 103 – 106.

11 Зотин, Н.А. Разработка методики формирования диагностических признаков газотурбинных двигателей на примере ДТ-18Т [Текст] / Н.А. Зотин // Прикладные технологии в науке и образовании: науч. сборник / Самар. гос. аэрокосм. ун-т., ин-т печати. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2013. – С. 182 – 187.

Подписано в печать 20.02.2015. Формат 60 х 84/16.

Бумага офсетная. Печать оперативная.

Объем – 1,13 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 152

Отпечатано в типографии «Инсома-пресс»

443080, г. Самара, ул. Санфировой, 110А, оф. 22А,
тел. 222-92-40, E-mail: insoma@bk.ru