

УДК 004.942

## Метод идентификации объектов ракетно-космической техники на основе корреляционного анализа и тензорного исчисления данных телеметрирования

### Method for identifying objects of rocket and space technology based on correlation analysis and tensor calculus of telemetry data

**Лоскутов / Loskutov A.**

Андрей Иванович

(vka@mil.ru)

доктор технических наук, профессор.

ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия

им. А. Ф. Можайского» МО РФ

(ВКА им. А. Ф. Можайского),

начальник кафедры телеметрических систем,

комплексной обработки и защиты информации.

г. Санкт-Петербург

**Шиян / Shiyen A.**

Александр Николаевич

(vka@mil.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

заместитель начальника академии

по вооружению – начальник отдела.

г. Санкт-Петербург

**Кондратюк / Kondratyuk V.**

Виктор Игоревич

(vka@mil.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

старший преподаватель кафедры телеметрических

систем, комплексной обработки и защиты

информации.

г. Санкт-Петербург

**Юдицких / Yuditskikh E.**

Евгений Олегович

(vka@mil.ru)

ВКА им. А. Ф. Можайского,

адъюнкт кафедры телеметрических систем,

комплексной обработки и защиты информации.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: идентификация – identification; спектрально-корреляционный анализ – spectral correlation analysis; тензорное исчисление – tensor calculus.

В статье предложен метод идентификации объектов ракетно-космической техники на основе последовательного формирования совокупности матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов телеметрируемых параметров, формирование на их основе соответствующего тензора, расчет тензора изменения математического ожидания выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов телеметрируемых параметров, формирование тензора доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов для решения задач контроля технического состояния.

The article proposes a method for identifying objects of rocket and space technology on the basis of sequential formation of a set of matrices of sample pair-by-pair mutual-correlation coefficients of telemetered parameters, the formation of the corresponding tensor on their basis, calculation of the tensor of change of mathematical expectation of selective pair-pair mutual-correlation coefficients of telemetered parameters, formation of a tensor of confidence intervals of sample paired mutual-correlation coefficients for solving technical condition control problems.

### Введение

В настоящее время вопросы обеспечения требуемого уровня эксплуатационной надежности сложных объектов ракетно-космической техники (ОРКТ), таких как КА, РН, РБ на этапах заводских испытаний, полигонных испытаний при подготовке к применению, а также при проведении летно-конструкторских испытаний и штатном управлении КА в орбитальном полете, приобретают особую остроту. Это связано, прежде всего, с необходимостью реализации этапов их разработки, изготовления, подготовки к применению и применению по назначению с учетом требований импортозамещения в условиях беспрецедентного санкционного давления. В таких условиях решение задач идентификации и технического диагностирования сложных ОРКТ на различных этапах их жизненного цикла приобретает особое значение.

Существующая в настоящее время система технического диагностирования в «широком смысле» при подготовке и применению ОРКТ в целом обеспечивает необходимые показатели их надежности, позволяющие выполнять задачи по предназначению с требуемым качеством, однако не лишена некоторых

недостатков. Одно из направлений совершенствования типовых методик и способов идентификации и технического диагностирования сложных ОРКТ при проведении испытаний на техническом и стартовом комплексах, а также управления КА, связано с разработкой модели дополненной идентификации и технического диагностирования КА, РН, РБ с функцией распознавания ошибок типовых решений [1]. Применение указанных моделей позволяет обнаружить признаки ошибок контроля ТС и технического диагностирования систем и ОРКТ в целом и, следовательно, повысить показатели достоверности соответствующих процессов.

В развитие этих идей предложено для решения задач идентификации ОРКТ в целом и контроля его технического состояния использовать математический аппарат спектрально-корреляционного анализа и тензорного исчисления [2]. Для идентификации ОРКТ в целом предложено перейти из пространства признаков – телеметрируемых параметров, регистрируемых при типовых запусках, типовых испытаниях или типовых циклов управления ОРКТ, в новое пространство признаков – пространство выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП. Также предложен метод идентификации ОРКТ в целом на основе последовательного формирования совокупности матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП, формирование на их основе соответствующего тензора, расчет тензора изменения математического ожидания выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП на основе усреднения по совокупности типовых запусков, испытаний или циклов управления ОРКТ и формирование тензора доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП как модели функционирования ОРКТ в целом. На основе предложенной модели функционирования ОРКТ в целом возможно решение задач контроля технического состояния ОРКТ в целом и в совокупности с типовыми методами контроля ТС ОРКТ – дополненного контроля его ТС.

### **Анализ практики идентификации сложных объектов ракетно-космической техники и пути ее совершенствования**

Разработанные к настоящему времени методы математического моделирования процессов функционирования, технического диагностирования и контроля ОРКТ, их бортовых систем отличаются значительным разнообразием [3–6]. Как было показано в [1], задачи идентификации, контроля ТС и технического диагностирования сложных ОРКТ решаются на основе посистемного подхода в несколько этапов. Здесь под идентификацией подразумевается определение структуры и параметров математической модели, обеспечивающей наилучшее совпадение

выходных координат модели и моделируемого объекта при одинаковых входных воздействиях [4].

На первом этапе разрабатываются модели функционирования отдельных систем, подсистем и агрегатов ОРКТ, а также модели их контроля и диагностирования. В качестве диагностических признаков или параметров состояний соответствующих моделей функционирования систем, подсистем ОРКТ и контроля их технического состояния в существующей типовой системе идентификации и технического диагностирования ОРКТ применяются, прежде всего, телеметрируемые параметры в соответствии с программой телеизмерений ОРКТ. А инструкции по оценке работы бортовых систем в полете или аналогичные им инструкции, собственно, являются своеобразными вербальными моделями функционирования систем ОРКТ и контроля их технического состояния, реализующими в основном простой метод допускового контроля.

На втором этапе модель функционирования сложного ОРКТ в целом формируется на основе совокупности моделей функционирования отдельных систем, подсистем и агрегатов, а способы контроля и диагностирования ОРКТ в целом основываются на использовании результатов посистемного контроля и диагностирования предыдущего этапа. Такой подход к решению задач идентификации и технического диагностирования сложных ОРКТ позволяет решать эти задачи с требуемым качеством, однако не избавлен от некоторых недостатков. Одним из недостатков такого подхода является существенное ограничение полноты использования всего объема накапливаемой апостериорной информации. На основании [1] предлагается для совершенствования существующей системы идентификации и технического диагностирования сложных ОРКТ дополнительно использовать унифицированные в отношении ОРКТ в целом модели его функционирования и контроля технического состояния, полученные и уточняемые по результатам обработки апостериорной информации (данных телеизмерений) с целью повышения качества решения задач идентификации и технического диагностирования ОРКТ.

### **Постановка задачи идентификации сложных объектов ракетно-космической техники в целом по данным телеметрирования**

Задача идентификации сложного ОРКТ в целом по данным телеизмерений предполагает необходимость разработки модели функционирования ОРКТ на основе унифицированного математического аппарата, инвариантного к физической природе процессов в различных системах ОРКТ.

Математическую постановку задачи идентификации ОРКТ в целом по данным телеметрирования можно представить следующим образом.

Дано:

$S = \{S_e\}$  – множество однотипных объектов (процессов) телеметрирования (запусков РН, РБ, одинаковых операций управления космическим аппаратом (КА));

$C$  – множество ситуаций функционирования однотипных объектов (процессов) телеметрирования, включающих определенные последовательности команд в соответствии с циклограммой бортового комплекса управления РН, РБ при запуске или типовой программы управления КА, а также соответствующие им реакции бортовых систем;

$\Lambda = \{\Lambda_e\}$  – множество исходных данных телеметрирования по однотипным  $e=1, (1), N$  объектам (процессам) телеметрирования, где  $\Lambda_e = \{\bar{\lambda}_p^e(iT_0)\}$  – множество данных телеметрирования по одному однотипному объекту (процессу) телеметрирования,

$$\bar{\lambda}_p^e(iT_0) = [\lambda_1^e(iT_0), \lambda_2^e(iT_0), \dots, \lambda_p^e(iT_0), \dots, \lambda_N^e(iT_0)], \\ p = 1, (1), N;$$

$T = \{iT_0\}$  – множество моментов времени формирования данных телеметрирования;

$D$  – множество показателей качества функционирования типовых объектов телеметрирования;

$R = \{r_{k,p}(n)\}$  – множество выходных параметров функционирования объектов телеметрирования;

$Tr = \{Tr^{(e)}(R)\}$  – множество тензоров выходных параметров функционирования объектов телеметрирования.

Содержательная постановка научной задачи: разработать метод идентификации ОРКК  $\Psi$  с определением модели  $M_S$  функционирования типового объекта  $S_e$ , устанавливающей закономерность соответствия множества тензоров параметров функционирования объектов телеметрирования, сформированных на основе множества выходных параметров  $R$ , и множества показателей качества его функционирования  $D$  от множества однотипных объектов (процессов) телеметрирования  $S$ , множества ситуаций функционирования однотипных объектов  $C$ , множества исходных данных телеметрирования  $\Lambda$ , множества моментов времени формирования данных телеметрирования  $T$  в условиях физической реализуемости множеств  $C$  и  $\Lambda$ .

Формальная постановка научной задачи:

$$\Psi : M_S = \langle S, C, \Lambda, T \rangle \rightarrow Tr(R, D) \begin{cases} C \subseteq C_{\text{доп}}; \\ \Lambda \subseteq \Lambda_{\text{доп}}. \end{cases} \quad (1)$$

Таким образом, решение задачи идентификации ОРКК позволяет определить параметры модели его функционирования.

## Метод идентификации объектов ракетно-космической техники в целом по данным телеметрирования

Как было указано ранее, предложено для решения задач идентификации ОРКК в целом использовать математический аппарат корреляционного анализа и тензорного исчисления. Это позволяет перейти из пространства признаков – телеметрируемых параметров, в новое пространство признаков – пространство выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов телеметрируемых параметров (ТМП).

На множестве исходных данных телеметрирования, зарегистрированных за все время  $T$  функционирования ОРКК при проведении запусков, типовых испытаний, выполнении типовых циклов управления по  $N$  телеметрируемым параметрам  $\lambda_p^e(iT_0)$  на выборочном временном интервале  $\Delta t$ , включающем выборку из  $n$  отсчетов каждого телеметрируемого параметра, формируются квадратные  $N \times N$  матрицы  $[r_{k,p}(n)]_l$  выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов телеметрируемых параметров  $r_{k,p}(n)$ . Схема формирования матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов телеметрируемых параметров представлена на рис. 1.

Из совокупности  $L$  матриц  $[r_{k,p}(n)]_l$ , содержащей данные о статистической зависимости ТМП по одному из  $E$  объектов (процессов) телеметрирования, формируется тензор  $Tr^{(e)}_{2,L}(R_{\text{кор}})$  как линейный многокомпонентный алгебраический объект, заданный на векторном пространстве выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП. Здесь индекс 2 обозначает матрицу корреляционных коэффициентов, индекс  $L$  обозначает количество матриц, включенных в тензор и индекс  $e$  обозначает номер типового объекта (процесса). По совокупности  $E$  типовых объектов (процессов) формируется тензор изменения математического ожидания выборочных коэффициентов попарной корреляции ТМП

$M[Tr^{(e)}_{2,L}(R_{\text{кор}})]$ . Этот тензор будет содержать  $L$  матриц  $[M[r_{k,p}(n)]]_{N \times N}$ . По каждому элементу  $M[r_{k,p}(n)]$  каждой  $l$ -й матрицы рассчитываются доверительные интервалы  $(r^{(l)}_{k,p}(n)_{\min}, r^{(l)}_{k,p}(n)_{\max})$ . На основе этих доверительных интервалов формируется тензор доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП  $Tr^{(E)}_{2,L}(\Delta R)$ , который содержит  $L$  матриц  $[(r^{(l)}_{k,p}(n)_{\min}, r^{(l)}_{k,p}(n)_{\max})]_{N \times N}$ . Данный тензор будет являться моделью функционирования ОРКК при типовом запуске, типовом испытании или типовом цикле управления.

В этом случае ключевым является выбор метода расчета оценок математического ожидания  $M^*[r^{(e)}_{l,k,p}(n)]_E$ , среднеквадратического отклонения этих величин и

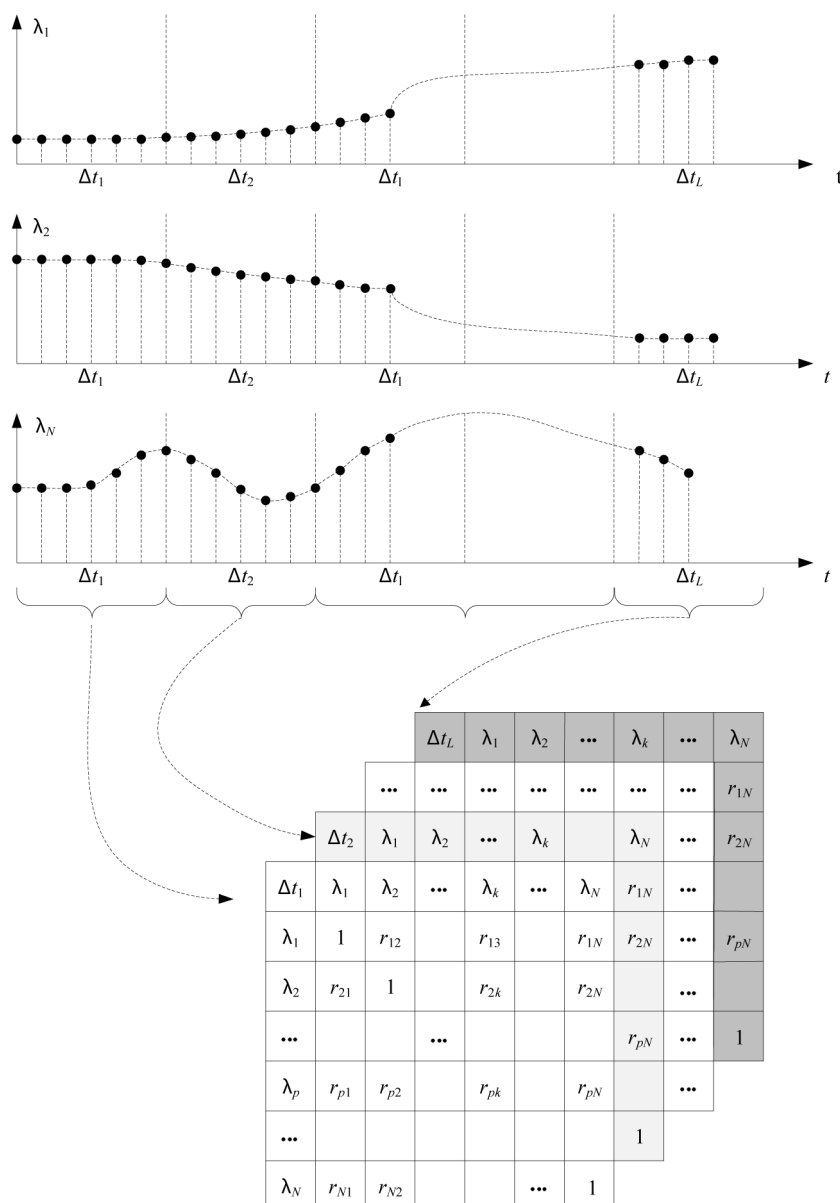


Рис. 1. Схема формирования матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП

соответствующих им доверительных интервалов  $(r_{l^{(E)}}^{(E)}_{k,p(n)_{\min}}, r_{l^{(E)}}^{(E)}_{k,p(n)_{\max}})$ . Здесь  $l$  – номер интервала расчета,  $n$  – количество отсчетов  $k$ -го и  $p$ -го параметров, по которым рассчитывается этот коэффициент взаимной попарной корреляции (определяемых частотой опроса параметра и размером временного интервала),  $e = 1, 2, \dots, E$  – номер реализаций одинаковых телеметрируемых процессов (запусков РН, РБ, технологических циклов управления КА), по которым рассчитываются соответствующие оценки. Отметим, что такие оценки математического ожидания, среднее квадратическое отклонение и соответствующий им доверительный интервал рассчитываются для каждого выборочного

попарного взаимно-корреляционного коэффициента и становятся модельными. Таким образом, общее количество подлежащих расчету коэффициентов корреляции и доверительных интервалов составит  $LN^2/2$ . Учитывая изложенное, выбор метода их расчета в связи с большим объемом вычислений должен производиться с учетом принципа реализуемости вычислительной сложности алгоритма реализации этих методов расчета.

Кроме того, на выбор методов этих расчетов оказывает влияние объем априорной информации об объекте контроля, характеристиках множества квазидетерминированных и случайных процессов, и составля-



ющих в совокупности процесс функционирования сложного ОРКТ. И здесь при выборе метода расчета оценок матожидания и соответствующих им доверительных интервалов примем допущение о нормальности или значительной степени нормальности законов распределения случайного процесса выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов  $r_{l,k,p}^{(e)}(n)$  как дискретной функции времени при  $l = 1, 2, \dots, L$ . Это допущение можно признать обоснованным в силу, прежде всего, первой предельной теоремы теории вероятностей. Кроме того, известно, что большинство используемых в прикладной математической статистике распределений вероятностей так или иначе связано с нормальным законом или сводится к нему. Однако при выборе методов будем обращать внимание прежде всего на те, которые наименее критичны с точки зрения строгости требования нормальности закона распределения. Кроме того, будем учитывать, что поскольку расчет оценок мато-

жидания и соответствующих им доверительных интервалов предполагается проводить по каждому  $r_{l,k,p}^{(e)}(n)$ , пока предъявлять требования к стационарности и, тем более, эргодичности процессов не будем.

На рис. 2 представлена схема расчета модельных допусковых интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП. Здесь на всех выбранных интервалах времени  $\Delta t_l$  производится расчет выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов  $r_{l,k,p}^{(e)}(n)$ ,  $l = 1, 2, \dots, L$  по всем парам  $\lambda_k$  и  $\lambda_p$  для совокупности ТМП, полученной по результатам одного запуска РКН, одного типового испытания ОРКТ или одного типового технологического цикла управления КА. Такой же расчет  $r_{l,k,p}^{(e)}(n)$  проводится для всех  $E$  объектов (процессов).

На основе этой модели будет решаться задача контроля технического состояния ОРКТ в целом и его дополненного контроля.

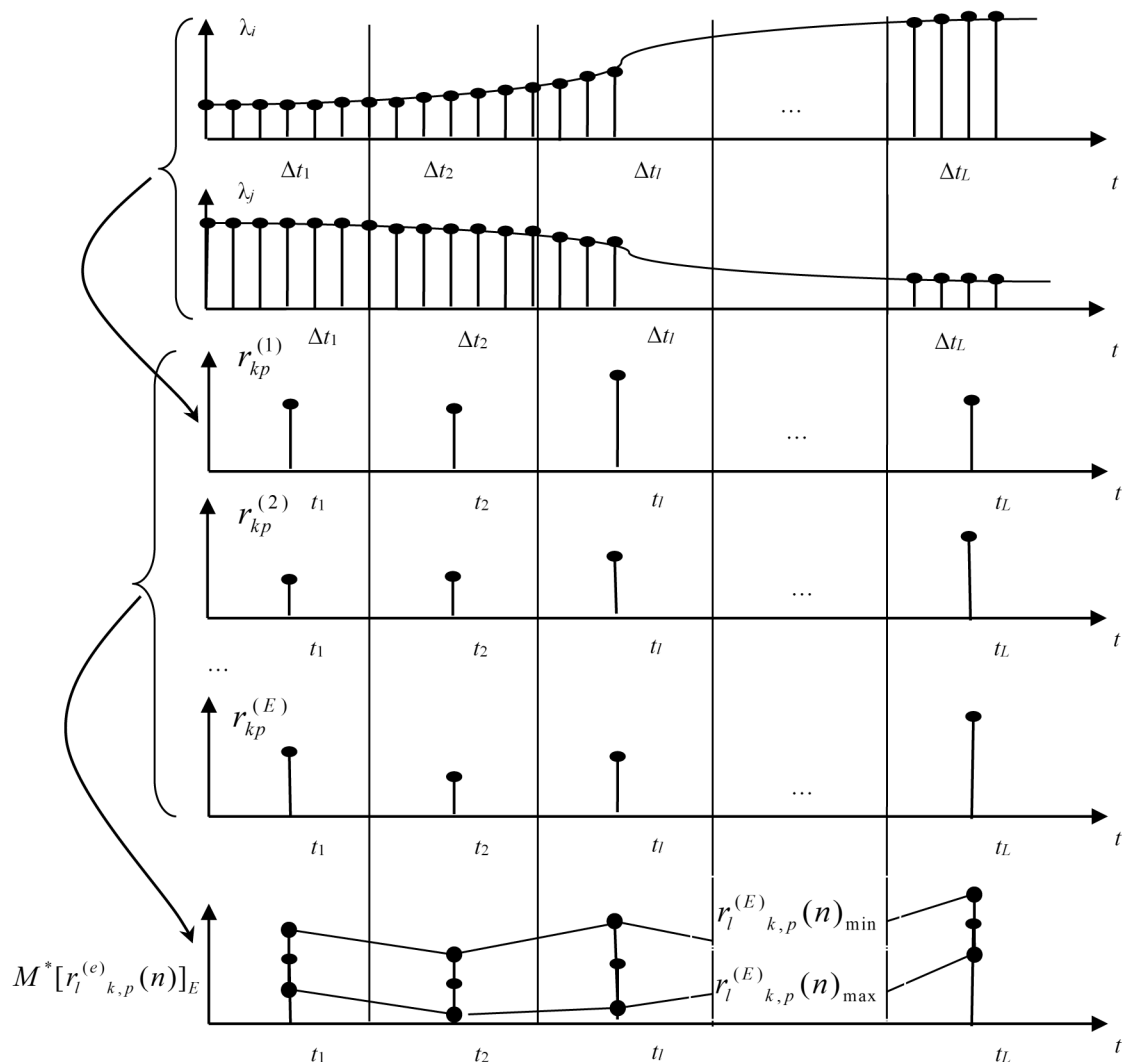


Рис. 2. Схема расчета модельных доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП

## Метод идентификации объектов ракетно-космической техники в целом по данным телеметрирования

Предложена поэтапная схема реализации процессов идентификации, а также разработаны и описаны алгоритмы реализации каждого этапа идентификации ОРКТ в целом, которые могут быть непосредственно реализованы при разработке специального программно-математического обеспечения типовых автоматизированных испытательных комплексов, средств обработки и анализа ТМИ.

Для решения задачи контроля технического состояния сложного ОРКТ в целом на основе описанной выше модели его функционирования, а именно тензора доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТПМ, необходима реализация нескольких последовательных этапов, представленных на рис. 3.

**Этап 1.** На этом этапе создаётся база данных значений телеметрируемых параметров, полученных в процессе типового запуска, типового испытания ОРКТ или типовой операции управления КА. На основе данной базы данных формируется общая таблица синхронизированных по времени данных медленноменяющихся параметров (ММП) соответствующего типового функционирования ОРКТ.

В случае, если в процессе телеметрирования ОРКТ формируются данные быстроменяющихся параметров (БМП), каждый быстроменяющийся параметр преобразуется в совокупность медленноменяющихся параметров, и все вновь полученные ММП включаются в базу данных значений телеметрируемых параметров и, соответственно, используются при формировании общей таблицы синхронизированных ММП. В данной статье подробно существо этих преобразований не рассматривается ввиду объёмности данных вопросов.

Сформированная общая таблица синхронизированных ММП будет являться источником исходных данных для формирования пространства признаков выборочных попарных коэффициентов корреляции ТМП.

**Этап 2.** Здесь производится определение размера выборки (количества последовательных отсчетов ТМП) – так называемого «окна» для вычисления выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП, расчет статистики для проверки на значимости отличия от нуля выборочных коэффициентов попарной корреляции. Коэффициенты корреляции рассчитываются следующим образом:

$$r_{k,p} = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i^{(k)} - \bar{\lambda}^{(k)}) (\lambda_i^{(p)} - \bar{\lambda}^{(p)})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\lambda_i^{(k)} - \bar{\lambda}^{(k)})^2 (\lambda_i^{(p)} - \bar{\lambda}^{(p)})^2}},$$

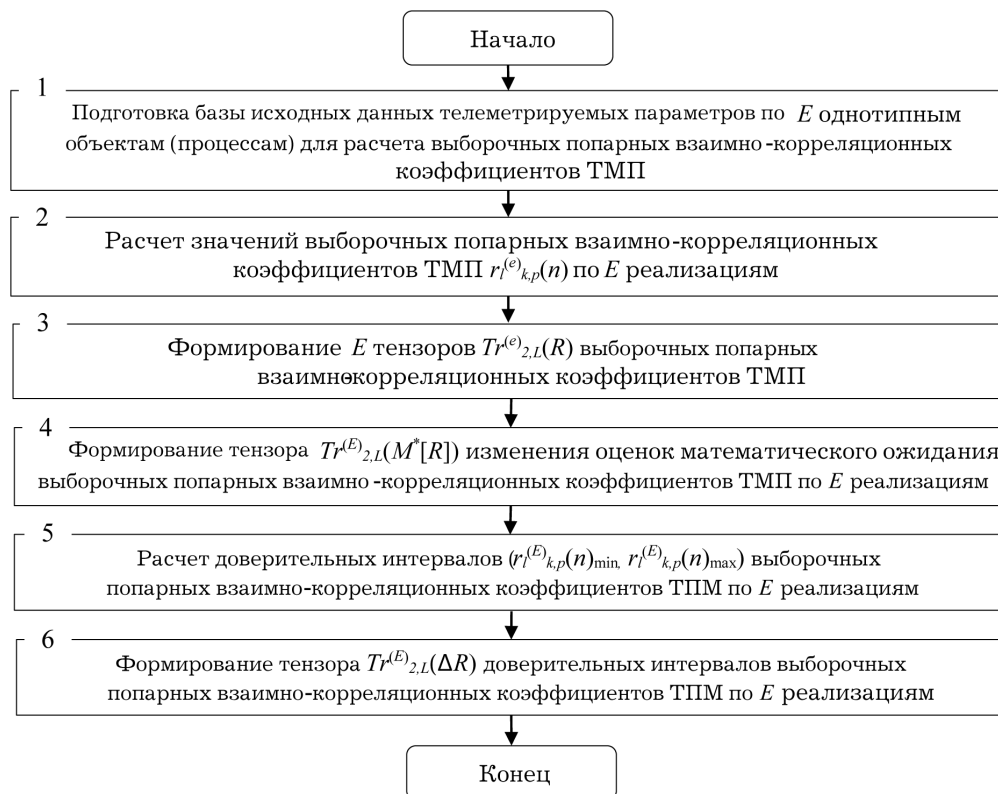


Рис. 3. Этапы идентификации ОРКТ в целом по данным телеизмерений

$$\bar{\lambda}^{(*)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i^{(*)},$$

где  $\lambda_i$  – значение  $i$ -го отсчета телеметрируемого параметра в текущей  $l$ -й выборке,  $i=1, (1), n$ ;

$\bar{\lambda}$  – оценка математического ожидания по текущей  $l$ -й выборке значений телеметрируемого параметра;

$n$  – количество отсчетов выборки телеметрируемого параметра для расчета корреляционных коэффициентов;

$k$  – параметр столбца матрицы;

$p$  – параметр строки матрицы.

Далее проводится проверка статистической значимости отличия от нуля взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП и формирование матрицы выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП, вычисленных по текущему «окну». Сформированная матрица сохраняется. Затем некоторым способом

берется следующий набор последовательных отсчетов ТМП (при их неизменном количестве), формируется и сохраняется следующая матрица попарных коэффициентов корреляции ТМП. Процесс формирования матриц по выбранному способу смещения «окон» продолжается на всем интервале данных телеметрирования, выбранных для идентификации ОРКТ.

Результатом окончания данного этапа является  $L=T/\Delta t_l$  матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП.

Блок-схема алгоритма 2 этапа идентификации ОРКТ в целом по данным телеизмерений представлена на рис. 4.

**Этап 3.** На этом этапе из совокупности  $L$  матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП формируется тензор выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП для одного объекта (процесса) из множества  $E$ .

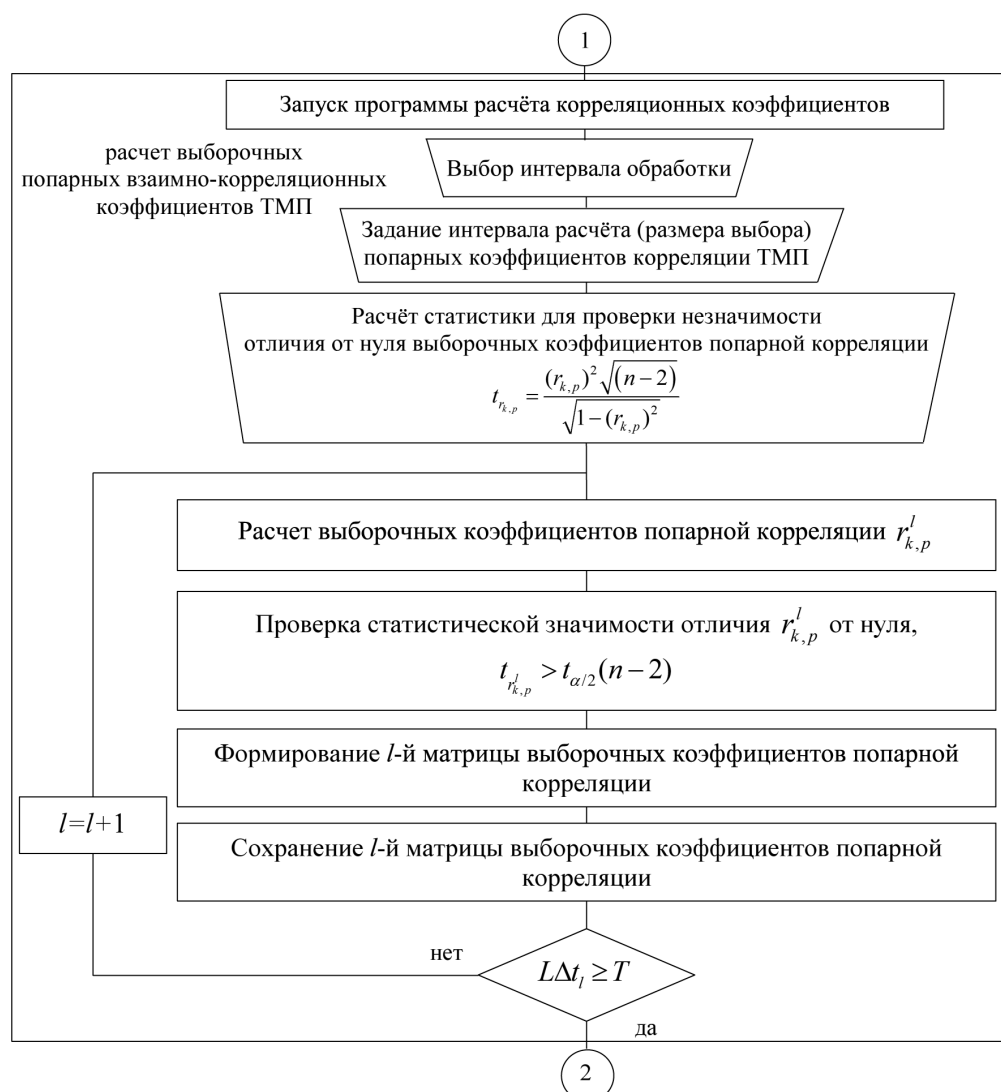


Рис. 4. Алгоритм расчета выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП

Далее процедура 2 и 3 этапов повторяется для всех  $E$  объектов (процедур).

**В рамках 4 этапа** идентификации производится формирование тензора  $Tr^{(E)}_{2,L}(M^*[R])$  изменения математического ожидания выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП по  $E$  реализациям.

**В рамках 5 этапа** производится расчет доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов относительно оценки математического ожидания.

**В рамках 6 этапа** производится формирование тензора  $Tr^{(E)}_{2,L}(\Delta R)$  доверительных интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП по  $E$  реализациям.

При реализации 4 и 5 этапов ключевым является выбор метода расчета оценок математического ожидания  $M^*[r^{(e)}_{l,k,p}(n)]_E$ , среднеквадратического отклонения этих величин и соответствующих им доверительных интервалов  $(r^{(e)}_{l,k,p}(n)_{\min}, r^{(e)}_{l,k,p}(n)_{\max})$ .

При реализации 4 этапа идентификации по выборке  $E$  реализаций  $r^{(e)}_{l,k,p}(n)$  производится расчет оценок

математического ожидания  $M^*[r^{(e)}_{l,k,p}(n)]_E = \bar{r}^*_{l,k,p}$ , среднеквадратического отклонения  $\bar{\sigma}^*_{l,k,p}$  и на их основе соответствующего модельного доверительного интервала  $(\bar{r}^*_{l,k,p} - k_{l,k,p}\bar{\sigma}^*_{l,k,p}, \bar{r}^*_{l,k,p} + k_{l,k,p}\bar{\sigma}^*_{l,k,p})$ . Здесь очевидно равенство

$$r^{(E)}_{l,k,p}(n)_{\min} = \bar{r}^*_{l,k,p} - k_{l,k,p}\bar{\sigma}^*_{l,k,p};$$

$$r^{(E)}_{l,k,p}(n)_{\max} = \bar{r}^*_{l,k,p} + k_{l,k,p}\bar{\sigma}^*_{l,k,p}.$$

Для расчета математического ожидания  $\bar{r}^*_{l,k,p}$  целесообразно выбрать следующие точечные оценки [7]: оценка максимального правдоподобия, оценка по выборочной медиане, быстрые оценки Кенюя.

Алгоритм реализации 4 этапа идентификации представлен на рис. 5.

**Этапы 5, 6.** Исходными данными для реализации этих этапов являются совокупность  $E$  тензоров  $Tr^{(E)}_{2,L}(R)$  выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП и сформированный на предыдущем этапе тензор  $Tr^{(E)}_{2,L}(M^*[R])$  оценок математического ожидания выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП по  $E$  реализациям.

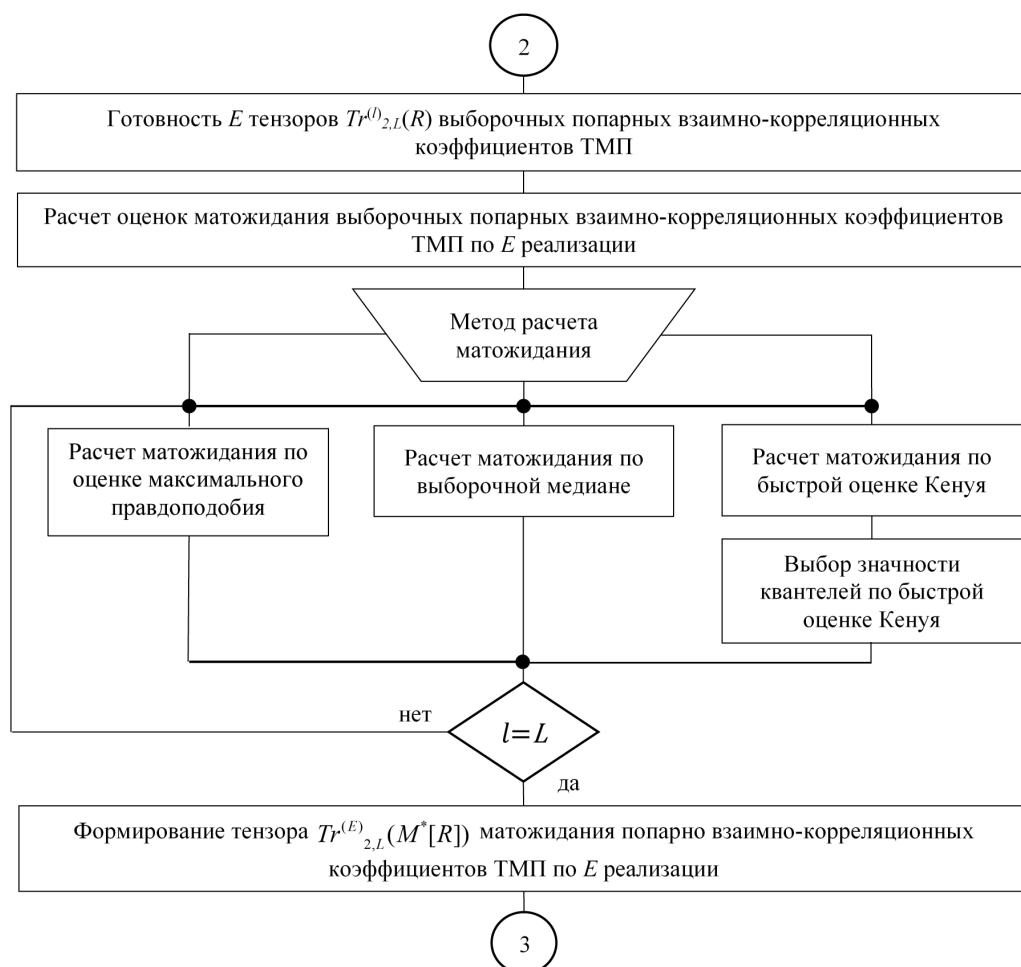


Рис. 5. Алгоритм формирования тензора оценок математического ожидания выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП



Блок-схема алгоритма этапов 5, 6 идентификации ОРКТ в целом по данным телеизмерений представлена на рис. 6.

Здесь производится расчет оценки среднеквадратического отклонения  $\sigma_{lkr}^*$  выборочного попарного взаимно-корреляционного коэффициента  $r_{lkr}^{(E)}(n)$  по выборочной дисперсии  $(\sigma_{lkr}^*)^2$ , далее производится расчет уточненной несмещенной оценки среднеквадратического отклонения по  $l$ -й матрице коэффициентов ( $l$ -му временному интервалу) и формируется допустимый интервал  $(r_{lkr}^{(E)}(n)_{\min}, r_{lkr}^{(E)}(n)_{\max})$  выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТПМ. Расчет производится по  $E$  реализациям. Таким же образом производится расчет допустимых интервалов для всех элементов  $l$ -й матрицы. Таким же образом производится расчет всех  $L$  матриц таких же оценок и на их основе формируется тензор  $Tr_{2,L}^{(E)}(\Delta R)$  допустимых интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТПМ по  $E$  реализациям.

### Анализ временной эффективности алгоритмов идентификации объектов ракетно-космической техники по данным телеметрирования

В настоящее время для оценки эффективности алгоритмов, как правило, используют показатели временной эффективности, являющиеся индикаторами скорости работы алгоритма. Одним из таких

показателей является время выполнения алгоритма  $T_{Al}$ , которое выражается функцией от некоторого параметра или параметров, связанных с размером входных данных. Физическая размерность этой функции может быть выражена в единицах времени – секундах или даже в количестве машинных тактов при выполнении этих операций. Расчет такого показателя временной эффективности для алгоритмов идентификации ОРКТ в целом с учетом объема входных данных, а именно данных телеметрирования, представляется важным для обоснования возможности практической реализации предложенных методов и моделей.

Обозначим:

$N$  – количество телеметрируемых параметров;

$n$  – объем выборки (количество отсчетов) ТМП для расчета выборочных попарных коэффициентов корреляции;

$L$  – количество временных интервалов за весь период регистрации ТМИ для формирования выборок расчета выборочных попарных коэффициентов корреляции;

$E$  – количество телеметрируемых объектов (процессов);

$c_{op}^+$  – время выполнения основной операции алгоритма (сложение);

$c_{op}^x$  – время выполнения основной операции алгоритма (умножение);

$c_{op}^>$  – время выполнения основной операции алгоритма (сравнение);

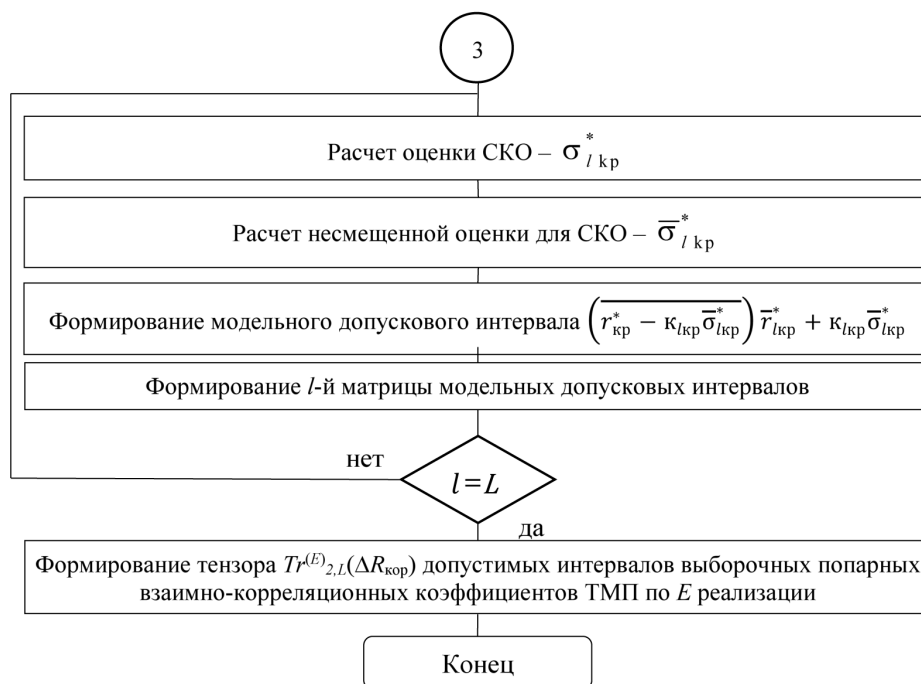


Рис. 6. Алгоритм расчета допустимых интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТПМ и формирование тензора допустимых интервалов

$c_{op}^-$  – время выполнения основной операции алгоритма (запись в таблицу).

Время работы алгоритма идентификации ОРКТ в целом по данным телеметрирования включает время работы алгоритма подготовки исходных данных  $T_{Al}^{ПД}$ , время работы алгоритма расчета  $E$  тензоров типовых объектов (процессов)  $T_{Al}^{ТЗТО}$ , время работы алгоритма расчета матожиданий и тензора допусковых интервалов  $T_{Al}^{ТЗДИ}$ :

$$T_{Al} = T_{Al}^{ПД} + T_{Al}^{ТЗТО} + T_{Al}^{ТЗДИ}.$$

Расчет времени работы алгоритма подготовки исходных данных:

$$T_{Al}^{ПД} = c_{op}^- NLE.$$

Расчет времени работы алгоритма расчета  $E$  тензоров типовых объектов (процессов):

– время расчета одного коэффициента корреляции:

$$\begin{aligned} n(2c_{op}^+ + c_{op}^x) + 3nc_{op}^x + 2c_{op}^x + nc_{op}^+ = \\ = 3nc_{op}^+ + (4n + 2)c_{op}^x = 3nc_{op}^+ + 4nc_{op}^x; \end{aligned}$$

– время проверки:

$$\frac{1}{2}L(N^2 - N)c_{op}^x;$$

– время расчета  $E$  тензоров:

$$\begin{aligned} T_{Al}^{ТЗТО} &= \frac{1}{2}LE(N^2 - N)(3nc_{op}^+ + 4nc_{op}^x) + \frac{1}{2}LE(N^2 - N)c_{op}^x = \\ &= \frac{1}{2}LE(N^2 - N)(3nc_{op}^+ + 4nc_{op}^x + c_{op}^x). \end{aligned}$$

Расчет времени работы алгоритма расчета матожиданий и тензора допусковых интервалов:

– время расчета матожиданий по  $E$  объектам:

а) оценка максимального правдоподобия:

$$\frac{1}{2}L(N^2 - N)L(Ec_{op}^+ + c_{op}^x);$$

б) оценка по выборочной медиане:

$$\frac{1}{2}L(N^2 - N)L(Ec_{op}^+ + c_{op}^x);$$

в) быстрая оценка Кенуя по 3 квантилям:

$$\frac{1}{2}L(N^2 - N)L(Ec_{op}^- + 2c_{op}^+ + 3c_{op}^x);$$

г) быстрая оценка Кенуя по 5 квантилям:

$$\frac{1}{2}L(N^2 - N)L(Ec_{op}^- + 4c_{op}^+ + 5c_{op}^x);$$

– время расчета дисперсий по  $E$  объектам:

$$\frac{1}{2}L(N^2 - N)L((E^2 + 2)c_{op}^x + Ec_{op}^+).$$

Тогда максимальное время работы алгоритма идентификации ОРКТ в целом по данным телеметрирования (с расчетом матожидания быстрой оценкой Кенуя по 5 квантилям):

$$\begin{aligned} T_{Al} &= c_{op}^- NLE + \frac{1}{2}LE(N^2 - N)(3nc_{op}^+ + 4nc_{op}^x + c_{op}^x) + \\ &+ \frac{1}{2}(N^2 - N)L(Ec_{op}^- + 4c_{op}^+ + 5c_{op}^x) \Big|_{N^2 - N = N^2} \approx \\ &\approx \frac{1}{2}N^2LE \left( \left( \frac{2 + N}{N} \right) c_{op}^- + \right. \\ &\left. + \left( 3n + \frac{4}{E} \right) c_{op}^+ + \left( 4n + \frac{5}{E} \right) c_{op}^x + c_{op}^x \right) \Big|_{\substack{\frac{2+N}{N} \approx 1 \\ 3n + \frac{4}{E} \approx 3n \\ 4n + \frac{5}{E} \approx 4n}} \approx \\ &\approx \frac{1}{2}N^2LE(c_{op}^- + 3nc_{op}^+ + 4nc_{op}^x + c_{op}^x). \end{aligned}$$

Понимая, что расчет матожидания быстрой оценкой Кенуя по 5 квантилям предполагает выполнения наибольшего по сравнению с другими способами расчета матожиданий количества основных операций, окончательно можно записать:

$$T_{Al} \leq \frac{1}{2}N^2LE(c_{op}^- + 3nc_{op}^+ + 4nc_{op}^x + c_{op}^x).$$

Анализ полученного выражения с учетом практически возможных диапазонов значений переменных

$$N \in [50, 500], L \in [500, 1000], E \in [5, 25], n \in [5, 25]$$

показывает, что время работы алгоритма идентификации ОРКТ имеет порядок роста количества основных операций, соответствующий произведению квадратичного порядка роста в зависимости от количества временных интервалов за весь период регистрации ТМИ для формирования выборок ТМП. Таким образом, порядок роста количества основных операций алгоритма идентификации ОРКТ в целом по данным телеметрирования можно отнести к кубическому классу временной эффективности алгоритмов,

что позволяет сделать вывод о возможности реализации данного алгоритма на практике.

### Заключение

Предложен метод идентификации ОРКТ в целом на основе последовательного формирования совокупности матриц выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП, формирование на их основе соответствующего тензора, расчет тензора математических ожиданий выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП на основе усреднения по совокупности типовых запусков, испытаний или циклов управления ОРКТ и формирование тензора допусковых интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТПМ как модели функционирования ОРКТ в целом. Предложены конкретные методы расчета оценок математических ожиданий, среднеквадратических отклонений и на их основе модельных допусковых интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП. Представлены соответствующие алгоритмы идентификации ОРКТ, включающие алгоритм подготовки исходных данных телеметрируемых параметров, алгоритм расчета выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП, алгоритм формирования тензора оценок математического ожидания выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТМП и алгоритм расчета допусковых интервалов выборочных попарных взаимно-корреляционных коэффициентов ТПМ и формирование тензора допусковых интервалов.

Произведен анализ временной эффективности алгоритмов идентификации ОРКТ по данным телеметрирования. Сделан вывод о том, что порядок роста количества основных операций алгоритма идентификации ОРКТ в целом по данным телеметрирования можно отнести к кубическому классу временной эффективности алгоритмов. Представленные алгоритмы могут быть непосредственно реализованы при разработке специального программно-математического обеспечения типовых автоматизированных испытательных комплексов, средств обработки и анализа ТМИ.

На основе предложенной модели функционирования ОРКТ возможно решение задачи контроля технического состояния ОРКТ в целом, и в совокупности с типовыми методами контроля ТС ОРКТ выполнение дополненного контроля его ТС.

Предложенный подход не требует существенного изменения сложившейся системы идентификации, технического диагностирования и обеспечения эксплуатационной надежности сложных ОРКТ, предполагая только проведение дополнительной обработки получаемых в процессе эксплуатации данных телеизмерений, и может применяться в дополнение к типовым технологическим процессам.

### Литература

1. Модель дополненной идентификации и технического диагностирования космических аппаратов, ракет-носителей, разгонных блоков с функцией распознавания ошибок типовых решений / А.И. Лоскутов, В.И. Кондратюк, Е.А. Ряхова, А.В. Столяров // *Нелинейный мир*. – 2021. – Т. 19, № 1. – С. 46–57.
2. Иващенко, А. В. Исследование возможности автоматизации взаимного корреляционно-спектрального анализа / А.В. Иващенко // *Исследовано в России*. – 2004. – № 2. – С. 10–15.
3. Мальцев, Г. Н. Исследование процесса диагностирования бортовой аппаратуры автоматических космических аппаратов с использованием дискретно-событийной имитационной модели / Г.Н. Мальцев, А.В. Назаров, В.Л. Якимов // *Труды СПИИРАН*. – 2018. – № 1 (56). – С. 95–121.
4. Дмитриев, А. К. Идентификация и техническая диагностика / А.К. Дмитриев, Р.М. Юсупов. – Москва : МО СССР, 1987. – 521 с.
5. Дмитриев, А. К. Модели и методы анализа технического состояния бортовых систем / А.К. Дмитриев. – Санкт-Петербург : ВКУ им. А.Ф. Можайского, 1999. – 171 с.
6. Соколов, Н. Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций / Н.Л. Соколов // *Успехи современного естествознания*. – 2007. – № 6. – С. 16–20.
7. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / А.И. Кобзарь. – Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 813 с.
8. Левитин, А. В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ / А.В. Левитин ; пер. с англ. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2006. – 576 с.
9. Ахо, А. В. Структуры данных и алгоритмы / А.В. Ахо, Д.Э. Хопкрофт, Д.У. Джеффри ; пер. с англ. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2000. – 384 с.