

ДИАГНОСТИКА ПИЛОТАЖНО-НАВИГАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ НА ЭТАПЕ ПРОИЗВОДСТВА САМОЛЁТОВ

© 2011 А. Н. Коптев, А. В. Кириллов

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва
(национальный исследовательский университет)

Рассмотрена проблема диагностики пилотажно-навигационных комплексов на этапе производства самолётов. На основе тензорной методологии предложены методы представления структуры комплекса и его систем, позволяющие существенно упростить алгоритм формирования диагностируемых параметров и применять новые подходы к диагностике пилотажно-навигационных комплексов. В качестве примера рассматривается пилотажно-навигационный комплекс самолёта АН-140.

Пилотажно-навигационный комплекс, диагностика, динамический контроль, производство летательных аппаратов, математическое моделирование, теория образов, тензорный анализ сетей.

В настоящее время происходит непрерывный процесс совершенствования авиационного оборудования в соответствии с постоянно усложняющимися задачами, решаемыми современными авиационными пилотажно-навигационными комплексами (ПНК). Совместное применение пилотажного комплекса (ПК) и навигационного комплекса (НК) позволяет объединить навигацию и пилотирование в единый процесс управления полётом самолёта.

В составе ПНК пилотажный комплекс является управляющей системой, обеспечивающей стабилизацию положения самолёта относительно центра масс и исполнение команд экипажа или НК для управления полётом по заданной пространственно-временной траектории. ПК выдаёт управляющие механические воздействия как на рулевые приводы, перемещающие воздушные рули, так и на сектор газа, регулирующий тягу двигателей.

В качестве информационной системы используется НК, представляющий собой автоматизированный комплекс взаимосвязанных технических средств, обеспечивающих выполнение всей совокупности навигационных функций с представлением экипажу данных, необходимых для управления центром масс самолёта.

Одновременно эти данные вводятся в систему автоматического управления полётом. Основными навигационными функциями, выполняемыми НК, являются:

- запоминание информации о требуемой траектории движения самолёта;
- измерение текущих значений действительных параметров движения самолёта;
- определение рассогласования между действительным и требуемым законами движения самолёта и формирование управляющих воздействий, обеспечивающих реализацию требуемой траектории движения.

С развитием авиации, ростом числа и сложности задач существенно повысились требования к информационному обеспечению полёта. Эксплуатационные характеристики современного самолёта определяются не только техническим уровнем его планера и двигательной установки, но и в большой степени совершенством бортового оборудования. Это оборудование должно обеспечивать высокоточную четырёхмерную навигацию, посадку в сложных метеоусловиях, всесторонний контроль, диагностику и локализацию отказов бортовой аппаратуры, информационную разгрузку экипажа.

В середине 70-х годов завершился процесс формирования предпосылок перехода бортового оборудования ПНК на цифровые средства передачи и обработки информации, что потребовало нового принципа организации его структуры. Широкое применение в авиации цифровой вычислительной техники породило и новые проблемы проектирования бортовых комплексов оборудования на базе различных способов объединения вычислительных средств в единую систему. В этих условиях особенно актуальными стали выбор функционально-структурного облика бортового оборудования, а также разработка эффективного математического и программного обеспечения, необходимого для его функционирования.

В настоящее время уже существует несколько поколений базовых интегрированных комплексов авионики [1, 2, 3,].

Первое поколение – комплекс стандартного цифрового пилотажно-навигационного оборудования (КСПНО), установленный на самолётах В-757/767, А-320, ИЛ-96, ТУ-204, АН-74, Ан-140, период разработки – 1980 – 1993 гг.

Второе поколение – интегрированные комплексы бортового оборудования (ИКБО-95), установленные на самолётах В-777, Бе-200, ТУ-214, ТУ-204-300, ТУ-334, АН-148, период разработки – 1995 – 2003 гг.

Третье поколение – (ИКБО-2005), установленные на самолётах А-380, период разработки – 2005 – 2006 гг.

Возросшая сложность ПНК привела к необходимости совершенствования процессов производства, подразумевающего внедрение современных технологических процессов изготовления и контроля продукции, без чего принципиально невозможно создавать сложную техническую систему на уровне современных требований.

В условиях сильной конкуренции на мировом рынке авиационной продукции российским авиастроительным предприятиям необходимо искать пути снижения стоимости и повышения качества изго-

товления самолётов. В качестве одного из таких направлений можно выделить переход на новые совершенные технологические процессы сборки и автоматизированной отработки бортовых комплексов оборудования, в частности, систем пилотажно-навигационных комплексов.

Трудоёмкость изготовления и отработки систем ПНК составляет более 50% от общей трудоёмкости изготовления всего самолёта. Поэтому требуется совершенствование методов и средств для выполнения этих работ, позволяющих повысить производительность труда за счёт автоматизации технологических процессов.

Применяемые в настоящее время специализированные системы инструментального контроля ПНК требуют больших затрат времени высококвалифицированных специалистов и не обеспечивают объективного контроля и быстрого поиска неисправностей. В связи с этим существует комплексная проблема контроля систем и агрегатов ПНК, решение которой требует наличия объективных высокопроизводительных и надёжных средств контроля.

Следует отметить, что этому вопросу в отечественной литературе уделено недостаточно внимания. Число работ, посвящённых производственному контролю как составной части всех технологических процессов изготовления самолётов, невелико. К ним относятся труды А. Н. Коптева, В. А. Прилепского, Д. В. Гольдена, В. И. Сагунова, Г. М. Загруднинова, Б. Г. Соловьёва. Анализ проблемы показывает, что в серийном производстве отсутствуют достаточно эффективные автоматизированные средства контроля сложных бортовых комплексов оборудования, которые могли бы применяться на всех этапах производства от входного контроля до лётно-испытательной станции и в процессе эксплуатации без предъявления специальных требований к борту самолёта.

Главной проблемой при отработке всего ПНК как единой бортовой системы, выполняющей конкретные задачи, является отсутствие полной динамической про-

верки работоспособности комплекса в наземных условиях. Достаточный уровень качества достигается путём отработки бортовых систем после проведения серии испытательных полётов.

Большое число испытательных полётов и их высокая стоимость делают лётные испытания весьма затратными для авиастроительных предприятий. В этом смысле при условии, что лётные испытания являются неотъемлемой частью производства самолёта, крайне важно стремиться максимально снизить объём внеплановых (повторных) полётов за счёт внедрения более совершенных методов и средств наземной отработки самолёта и его бортовых систем.

Для решения этой проблемы необходимы принципиально новые технологии контроля и диагностики систем и агрегатов ПНК на этапе сборки и монтажа, подразумевающие получение полной динамической картины состояния объекта контроля. В статье рассмотрены основы организации подобных методик диагностики.

В случае ПНК в целом вид системы уравнений для оценки его технического состояния неизвестен, и задача заключается в том, чтобы найти эту систему уравнений, которая в общем случае имеет вид математической модели, представляющей функцию

$$Y' = f(x'_1, x'_2, \dots, x'_n, n_1, n_2, \dots, n_m),$$

где n_1, n_2, \dots, n_m – внутренние параметры модели, адекватные параметрам регулярной структуры оригинала и его аппаратной реализации.

При этом к числу варьируемых параметров x'_1, x'_2, \dots, x'_n отнесены все учитываемые внешние факторы и параметры диагностируемого объекта, а к числу искомым параметров относят внутренние параметры модели n_1, n_2, \dots, n_m , связывающие факторы x'_1, x'_2, \dots, x'_n с показателем Y' наиболее правдоподобным отношением.

Подход к объектам контроля должен быть формализованным и основанным на

положении о том, что любая сложная система представляет собой n -й набор составных элементов, которые можно рассматривать как образующие [4]. Под образующими следует понимать объекты, стандартные блоки, типичные элементы. Однако это не значит, что любая образующая является элементарной единицей (для электрических цепей – ёмкость или индуктивность).

Так, например, ПНК как объект в целом, можно разделить на следующие образующие: система управления, навигационное оборудование, система определения воздушно-скоростных параметров полёта, курсовая система. В свою очередь каждая из этих образующих раскладывается на свои составные образующие: вычислительные блоки, исполнительные механизмы, датчики, соединительные жгуты, распределительные узлы и т. д.

Таким образом, образующие представляют собой компоненты ПНК – носители информации. Множество всех образующих комплекса K запишем в виде

$$K = \cup K^a,$$

где K^a – непересекающиеся классы образующих,

a – общий индекс класса образующих.

При этом любая образующая обладает обобщённым набором свойств, который можно разделить на три группы: признаки, связи, идентификатор [4].

Признак – это какая-либо количественная характеристика образующей. Образующая может обладать сколь угодно большим набором признаков, однако для оценки её состояния может быть достаточно анализ только части этого набора.

Связь – это свойство образующей, характеризующее её способность вступать во взаимодействие с другими образующими в составе регулярных структур – конфигурации. Множество связей всякой образующей формирует структуру связей, которая является системной основой ПНК.

В дополнение к свойствам образующих необходим также идентификатор или

имя для того, чтобы иметь возможность различать используемые в ПНК образующие (в том числе и для различения, когда несколько одинаковых образующих входят в состав одного объекта).

Введём одно из важнейших для представления ПНК понятий: структурное объединение стандартных блоков (образующих), задействованных для решения конкретной пилотажно-навигационной задачи. Это отношение представляет собой конфигурацию, которая определяется составом и структурой.

Полный набор конфигураций для решения всего комплекса задач ПНК позволяет построить его математическую модель в виде

$$T = J(k) / R = \langle K, S, \Sigma, r \rangle,$$

где

$J(k)$ – множество конфигураций, построенных с учётом набора правил и ограничений k ;

R – отношение между конфигурациями из $J(k)$;

T – множество всех изображений, которые могут принимать конфигурации из $J(k)$;

K – классы образующих ;

S – множество их отображений ;

Σ – тип соединения – множество графов, заданных на компонентах образующей ;

Γ – отношение связи.

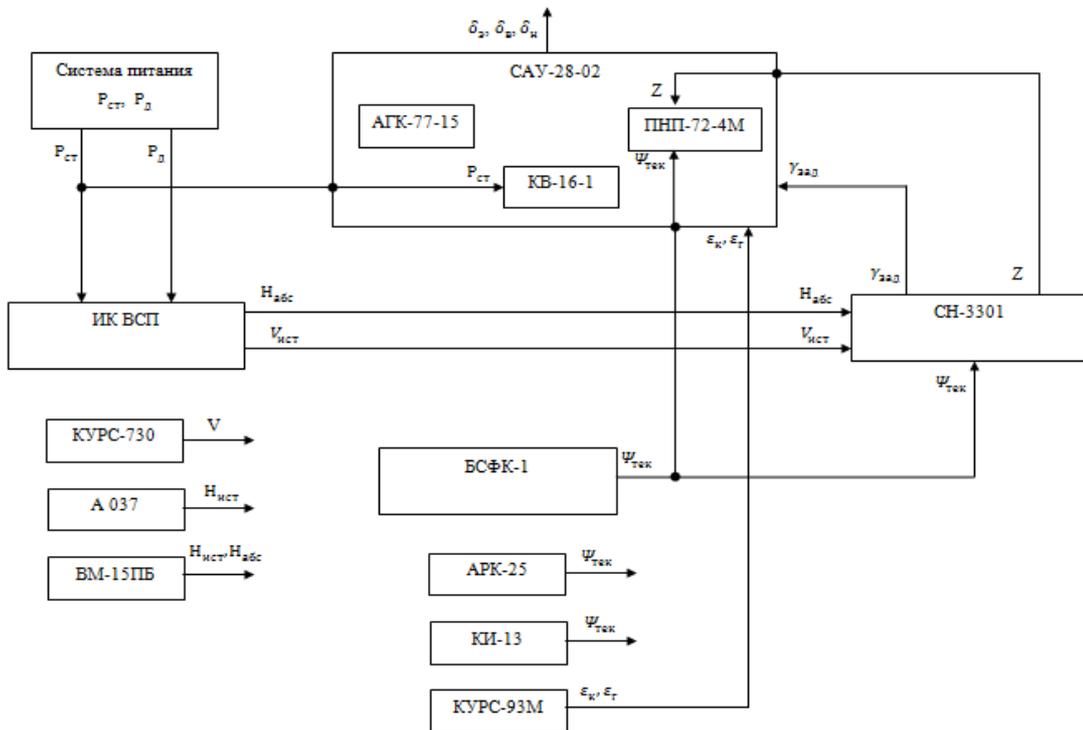


Рис. 1. Структурная схема ПНК самолёта АН-140

В качестве примера рассмотрим пилотажно-навигационный комплекс самолёта АН-140 (рис. 1) как связанный набор конфигураций φ , определённый составом и структурой.

Состав реальной системы представим как

$$S = \{d_1, d_2, \dots, d_n\},$$

где

S – некоторое множество, не имеющее структуры ;

d_n – множество образующих, при $n \in [1, \dots, \infty)$.

Для задания множества образующих d_n воспользуемся единичной квадратной матрицей $d_{i,j}$ (рис. 2), элементы которой указывают на наличие или отсутствие образующей d_n в множестве S .

Представленная матрица лишь определяет состав конфигурации ϕ , не раскры-

вая структуру соединений. Структура конфигурации ПНК ϕ представляет собой множество соединений β , существующих между всеми или некоторыми связями образующих, входящих в её состав.

	Сис. пит.дав.	ИК ВСП	БСФК-1	СН-3301	САУ-28-02
Сис. пит.дав.	1	0	0	0	0
ИК ВСП	0	1	0	0	0
БСФК-1	0	0	1	0	0
СН-3301	0	0	0	1	0
САУ-28-02	0	0	0	0	1

Рис. 2. Единичная матрица

Множество соединений β зададим с помощью несингулярной матрицы соединений, в которой единицы и нули указывают на наличие или отсутствие соединений в определённых парах образующих (рис. 3). Поскольку некоторые элементы ПНК взаимодействуют с несколькими другими одновременно, то множество соединений β больше множества образующих $d_n : b > d_n$, и, следовательно, сумма входов и выходов соответствующих образующих d_n больше 1. Более того, едини-

цы данной матрицы (рис. 3) не означают элементарную единичную связь, а сами могут быть разложены в свою матрицу соединений.

В результате задания всех связей ПНК самолёта АН-140 может быть представлен как сеть, которую можно описать в рамках тензорного анализа сетей Г. Крона [5]. Суть применения топологии и тензорного анализа сетей в теории представления ПНК заключается в следующем.

	Система питания дав. $P_{см}$	Система питания дав. $P_{нал}$	ИК ВСП $H_{авс}$	ИК ВСП $V_{см}$	БСФК-1 $\Psi_{тек}$	СН-3301 $\gamma_{вод}$	САУ-28-02 δ_2, δ_3
Система питания дав. $P_{см}$	1	0	1	1	0	0	1
Система питания дав. $P_{нал}$	0	1	0	1	0	0	0
ИК ВСП $H_{авс}$	1	0	1	0	0	1	0
ИК ВСП $V_{см}$	1	1	0	1	0	1	0
БСФК-1 $\Psi_{тек}$	0	0	0	0	1	1	1
СН-3301 $\gamma_{вод}$	0	0	1	1	1	1	1
САУ-28-02 δ_2, δ_3	1	0	0	0	1	1	1

Рис. 3. Несингулярная матрица соединений

Все различные объекты или системы рассматриваются как проекции обобщённого объекта или системы в частных системах координат вводимого пространства, структура которого различна и усложняется в зависимости от этапа их представления: для этапа макропредставления используется обычное представление компонентов (Евклидово и дискретное), для представления электрических цепей – пространство-структура. Классу эквивалентности I, содержащему одну конфигурацию, используемую для контроля режимов работы ПНК, присвоится индекс образующей d_n , включающий конечный набор компонент, обладающих набором признаков:

$$d_1 = (a_{11}, a_{12}, a_{13}, \dots, a_{1m});$$

$$d_2 = (a_{21}, a_{22}, a_{23}, \dots, a_{2k});$$

.....

$$d_n = (a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, \dots, a_{nj}),$$

где

$a_{i,j}$ – конечный набор из j признаков, полностью характеризующих все возможные состояния i -й образующей, представляющей конфигурацию.

Проделав подобную операцию для всех конфигураций, получим компаунд-тензор, описывающий ПНК и характеризующий все возможные отображения объекта контроля. Данный компаунд-тензор будет меняться с изменением этапа контроля ПНК.

Таким образом, единичная проверка конкретной функции объекта контроля подразумевает получение с помощью специальной контрольно-проверочной аппаратуры текущего значения компаунд-тензора, характеризующего состав и структуру объекта контроля в данный момент времени. Затем в результате серии из n измерений получим n -мерный мультикомпаунд-тензор, характеризующий изменение состояния объекта контроля во времени.

Ввиду высокой сложности современных ПНК не представляется возможным определить для них минимальный набор диагностических признаков. Даже если это сделать, то результат проверки в виде набора значений этих признаков будет характеризовать только статическое состояние ПНК, что недостаточно для гарантии полностью исправной работы в полёте.

Поэтому предлагается в качестве набора диагностических признаков использовать набор конфигураций, введённых выше. Состав и структура связей каждой конфигурации определяет совокупность агрегатов и систем ПНК, задействованных в конкретной пилотажно-навигационной задаче. При этом в наземных условиях в рамках имитации полёта задаётся проверяемая задача и оценивается реакция ПНК по её выполнению. Для интегральной оценки множество параметров компаундируется и математически описывается компаунд-тензором, у которого один вход есть множество параметров, изменяющих его состояние, а единственный выход интегрирует множество выходных параметров, позволяющих оценить состояние объекта. Таким образом, в качестве диагностического признака задаётся не отдельно взятый параметр, а процесс функционирования ПНК.

Для каждого частного случая анализ ПНК с помощью представленной методики позволяет получить полный набор конфигураций, которые, с одной стороны, позволяют определить полную динамическую оценку ПНК и, с другой стороны, имитация которых в наземных условиях технически возможна.

Развитие вычислительной техники делает возможным реализовать подобные модели алгоритмов диагностирования с помощью специальных аппаратных средств. Например, для имитации режимов работы аппаратуры ПНК самолёта АН-140 предлагается использовать технические комплексы, представленные на рис. 4.

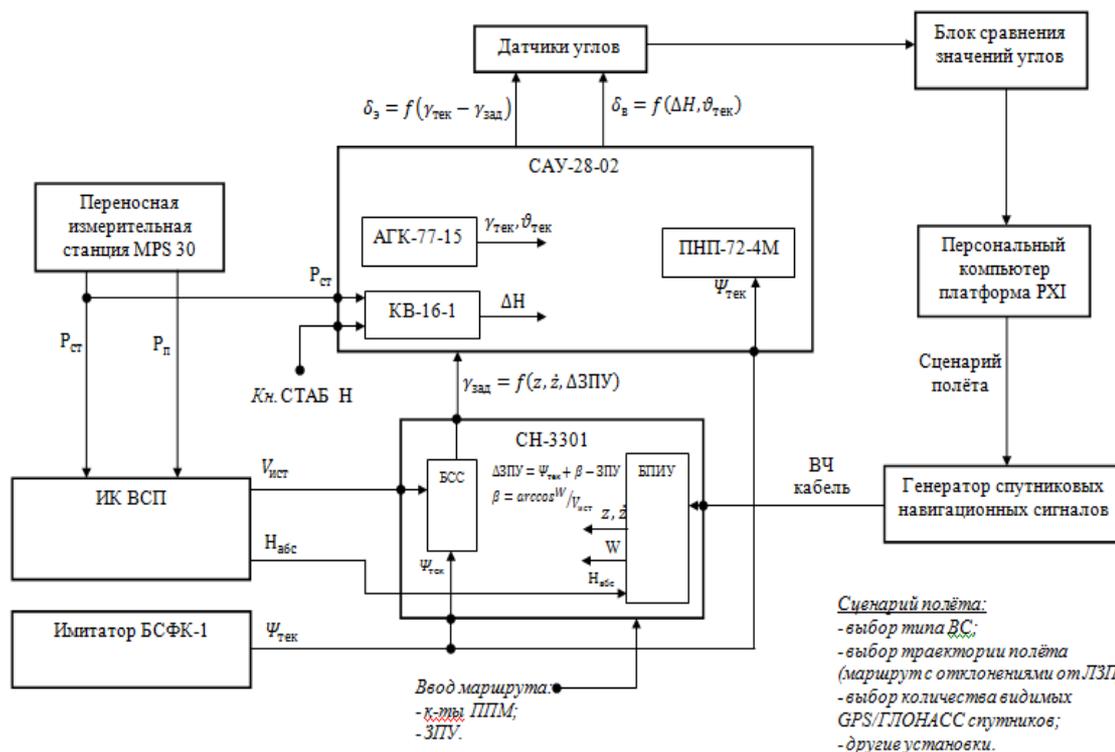


Рис. 4. Схема имитации полёта для ПНК самолёта АН-140

В качестве имитатора изменяющейся воздушной среды используется переносная измерительная станция MPS 30, которая в соответствии с программой диагностики осуществляет подачу воздуха статического и динамического давлений на входы приёмников давления комплекса высотно-скоростных параметров (ИК ВСП).

Сценарий полёта для аппаратуры спутниковой навигации обеспечивает имитатор спутниковой навигационной информации, генерируя сигналы GPS/ГЛОНАСС спутника, характерные для движения самолёта по заданному маршруту. При этом в сценарий полёта могут входить и вынужденные отклонения от линии заданного пути с целью анализа реакций автопилота.

Поскольку самолёт в реальности неподвижен, то на программу работы генератора GPS/ГЛОНАСС сигналов накладывается обратная связь от углов отклонения управляющих поверхностей (элеронов, руля высоты, руля направления) через программно-аппаратный комплекс на базе платформы РХИ, содержащий мо-

дель алгоритма диагностики и выполняющий оценку параметров работы ПНК.

Таким образом, можно организовать имитацию полёта самолёта в наземных условиях и задавать полётные условия согласно составленным конфигурациям. Причём используемый комплекс проверочного оборудования является универсальным и может быть применён под разные типы самолётов.

Библиографический список

1. Лещинер, Д.В. Самолет Ил-96-300 [Текст]: учеб. пособие для вузов гражд. авиации / Д. В. Лещинер, Р. В. Сакач, В. И. Васильев [и др.]; Под ред. В. Г. Воробьева, Д. В. Лещинера. – М.: МИИГА, 1989. – 182 с.
2. Скрипец, А. В. Техническая эксплуатация пилотажно-навигационных комплексов [Текст]: учеб. пособие для вузов / А. В. Скрипец, В. Г. Денисов, В. В. Козарук, В. С. Новиков, Н. М. Савченко; Под ред. А. В. Скрипца. – М.: Транспорт, 1992. – 296 с.
3. Воробьев, В. Г. Основы теории технической эксплуатации пилотажно-

- навигационного оборудования [Текст] / В. Г. Воробьев, В. П. Зыль, С. В. Кузнецов – М.: Транспорт, 1999. – 335 с.
4. Гренандер, У. Лекции по теории образов [Текст]: [пер. с англ.]. В 3-х т. Т.1
- Синтез образов / У. Гренандер. – М.: Мир, 1979. – 383 с.
5. Крон, Г. Тензорный анализ сетей [Текст]: [пер. с англ.] / Г. Крон – М.: Советское радио, 1978. – 720 с.

FLIGHT - NAVIGATION COMPLEX DIAGNOSTICS AT THE AIRCRAFT MANUFACTURE STAGE

© 2011 A. N. Koptev, A. V. Kirillov

Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov
(National Research University)

The paper deals with the problem of diagnosing flight navigation complexes at the stage of aircraft manufacture. Methods of introducing the complex structure and its systems on the basis of tensor methodology have been proposed. They make it possible to simplify the algorithm of forming the set of diagnosable parameters considerably and to apply new approaches to the diagnostics of flight navigation complexes. The flight navigation complex of AN-140 aircraft is taken as an example.

Flight-navigation complex, diagnostics, dynamic checkout, aircraft manufacture, mathematical modeling, pattern theory, tensor analysis of networks.

Информация об авторах

Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: теория представлений, моделирование, контроль и диагностика бортовых комплексов оборудования в производстве и эксплуатации летательных аппаратов. E-mail: eat@ssau.ru.

Кириллов Алексей Владимирович, ассистент кафедры эксплуатации авиационной техники. Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: технология контроля и диагностики, разработка систем динамического контроля и диагностики пилотажно-навигационных комплексов в производстве и эксплуатации. E-mail: aL63-2010@mail.ru.

Koptev Anatoly Nikitovitch, doctor of technical sciences, professor, head of the aircraft maintenance department. Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: eat@ssau.ru. Area of research: representational theory, modeling, technical diagnostics and assessment in the process of airborne equipment production and technical maintenance.

Kirillov Alexei Vladimirovitch, assistant of the aircraft maintenance department, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: aL63-2010@mail.ru. Area of research: technical diagnostics and assessment technologies, development of flight-navigation complex dynamic diagnostic systems in the process of production and technical maintenance.