

УДК 27.5.14.4

## ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА АНАЛИЗА, СИНТЕЗА И РЕАЛИЗАЦИИ ПРОГРАММ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИРОВАНИЯ БЛОКА РЕГУЛИРОВАНИЯ, ЗАЩИТЫ И УПРАВЛЕНИЯ БРЗУ-115 СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

© 2010 А.Н. Коптев, Н.А. Яковенко

Самарский государственный аэрокосмический университет

Поступила в редакцию 14.05.2010

В статье рассматриваются задачи повышения эффективности технического обслуживания и ремонта (ТОиР) систем электроснабжения за счет использования современных средств и методов контроля и диагностики. Проблемы повышения эффективности мероприятий ТОиР определяются решением задач анализа структуры электротехнического оборудования ЛА и синтеза тестовой информации для целей контроля и диагностирования. В работе предлагается общий подход для решения этой задачи с использованием топологических представлений.

Ключевые слова: техническое обслуживание и ремонт, контроль, диагностика, топологические представления.

Развитие авиационной техники требует новых подходов к задачам обеспечения эффективности и надежности при ее эксплуатации.

Жесткая конкуренция с зарубежными аналогами, обладающими высокой степенью интеграции систем контроля и диагностирования и бортовых систем летательных аппаратов создает предпосылки для создания более совершенных средств проверки работоспособности авиационных систем с использованием современных вычислительных комплексов. Основной задачей технической диагностики является распознавание состояния технической системы в условиях ограниченной информации.

Алгоритмы распознавания в технической диагностике частично основываются на диагностических моделях, устанавливающих связь между состояниями технической системы и их отображениями в пространстве диагностических сигналов. Важной частью проблемы распознавания являются правила принятия решений (решающие правила).

В основу построения математической модели системы электроснабжения (СЭС) ЛА для целей контроля и диагностики в представленной работе положены следующие принципы.

Во-первых, СЭС ЛА разбивается на ряд объектов или модулей, называемых образующими.

В зависимости от детализации и типа модели используются различные образующие: точечные образующие, образующие-множества, образующие-соответствия, образующие-признаки, образующие-функции, операторы, которые объе-

диняются в более сложные объекты – конфигурации – путем соединения отдельных модулей на основе введенных правил [1].

Для разработки модели СЭС ЛА и ее компонентов введем множество образующих  $A$ . Множество  $A$  состоит из единичных образующих, которые обозначим  $a$ .

В целом множество всех модулей  $A$  состоит из непересекающихся классов модулей  $A^\alpha$ ,  $A^\alpha \subset A$ , где  $\alpha$  – индекс класса образующих.

$$A = \bigcup A^\alpha, \quad A^\alpha - \text{непересекающиеся классы образующих} \quad (1)$$

Смысл этого разбиения состоит в том, что образующие, сходные качественно, будут относиться к одному классу, а их свойства выражаются через признаки и связи. При этом образующей ставится в соответствие признак  $m = m(a)$ , причем в качестве признака могут выступать целые, действительные числа, векторы и т.д.

Каждому модулю соответствует определенное число связей – неотрицательное число, равное сумме входных и выходных связей.

Образующие будем определять в некоторой среде – носителе информации. В этом случае образующая имеет конкретную интерпретацию.

Примем, что  $A$  – совокупность попарно непересекающихся множеств, т.е. компонентами  $A$  являются множества, не имеющие общих элементов. Чтобы эффективно работать с этими множествами, нам нужна удобная система обозначения этих множеств. Поэтому введем множество  $T$  меток или индексов для этих множеств. Для каждого индекса  $\tau \in T$  имеется множество  $A_\tau$ , принадлежащих совокупности компонент конкретного объекта или системы, и каждый член совокупности  $A$  помечен таким об-

*Коптев Анатолий Никитович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники. E-mail: eat@ssau.ru.*

*Яковенко Николай Александрович, аспирант*

разом, чтобы мы представили  $A$  как совокупность всех этих  $A_\tau$ :

$$A = \{A_\tau; \tau \in T\}. \quad (2)$$

Тот факт, что члены  $A$  попарно не пересекаются, выражается следующим условием: для любых двух различных индексов:

$$A_i \cap A_j = \emptyset \quad (3)$$

Наглядная интерпретация теоретико-множественной структуры объекта или системы представлена на рис. 1.

Множества  $A_i$  насажены на элементы индексного множества  $T$ .

Если определим множество  $A$  как объединение всех  $A_i$ , то возникает очевидное отображение  $f: A \rightarrow T$ .

Если  $x \in A$ , то поскольку множества  $A_i$  не пересекаются, существует ровно одно множество  $A_i$ , такое, что  $x \in A_i$ . Положим  $f(x) = i$ . В этом случае все элементы из  $A_i$  отображаются в  $i$ , все элементы из  $A_j - b_j$ , т.е. каждому элементу из сопоставляется однозначно определенный элемент множества  $\{i\}$ , а элементам из  $A_j - \{j\}$  и т.д., которые являются образами элементов из  $A_j$  или  $A_i$ .

Тогда восстановление  $A_j$  или  $A_i$  и т.д. есть прообраз при отображении  $f$  множества  $\{i\}$  или  $\{j\}$  и т.д.

Действительно  $f^{-1}(\{i\}) = \{x: f(x) = i\} = A_i$ .

Множество  $A_i$  называется слоем над  $i$ , элементы из  $A_i$  называются ростками в  $i$ , а вся структура - расслоением множеств над базовым пространством (базой)  $T$ .

Эта теоретико-множественная конструкция является основой в теории монтажа, контроля и испытаний объектов и систем ЭТО для получения тензоров  $\delta_{ij}$  и  $\delta_{\alpha\beta}$ . При этом с расслоением ассоциировано отображение  $f$  из пространства-структуры объекта или системы в его базу. Если  $f: A \rightarrow T$  - произвольная функция из некоторо-

го множества  $A$ , то можно определить  $A_i$  и  $A$  равенствами:

$$A_i = f^{-1}(\{i\}), i \in T,$$

$$A = \{f^{-1}(\{i\}): i \in T\} = \{A_i: i \in T\}. \quad (4)$$

Тогда  $A$  будет расслоением множеств над  $T$ , исходное множество  $A$  - пространством-структурой, а исходная функция  $f$  индуцированным отображением этого расслоения. Так как ни на каком  $x$  функция  $f$  не может принимать двух различных значений, то слои не пересекаются.

В соответствии с геометрическими фактами любая компонента объекта или собственно объект могут быть представлены либо цилиндрическим объемом, либо объемом многогранника, тогда цилиндрический объем расслаивается на круг (база) и слои - прямые линии, перпендикулярные базе (основанию), которым соответствуют точки на базе. На рис. 2 представлено расслоенное пространство цилиндрического объема объекта.

База - круг радиуса  $r$ . Над базой находится цилиндрический объем, ось которого проходит через центр базового круга, перпендикулярно плоскости, в которой он расположен. В данном случае слоями являются прямые, расположенные внутри цилиндра, перпендикулярно основанию и соединяют узлы контактирования объекта системы с их проекцией на базу.

Возникает вопрос: как математически в рамках теории ТООР объектов и систем ЭТО ЛА определить расслоения, о которых шла речь в общетеоретическом плане, т.е. как определить, в первую очередь, взаимно однозначные соответствия между подмножествами (опорные точки компонент) множества  $M$  (пространства операций ТООР) и проблеме выделения. Для математического обсуждения этих проблем введем фун-

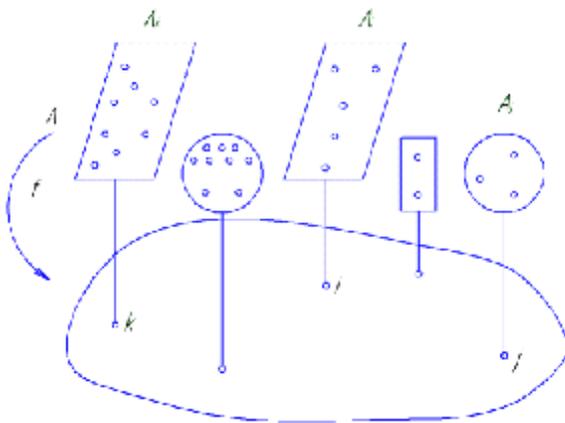


Рис.1. Теоретико-множественная структура объекта

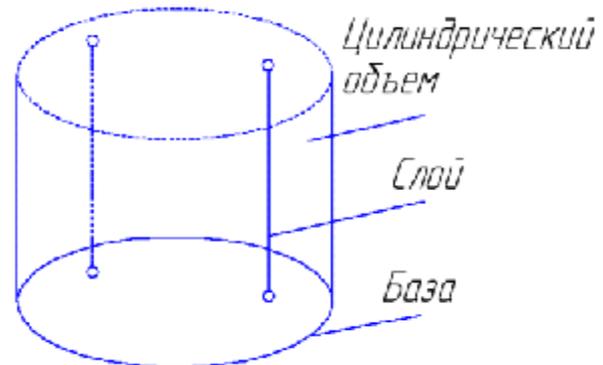


Рис. 2. Расслоенное пространство цилиндрического объема объекта

кцию  $M \rightarrow 2$ , где  $2 = \{0,1\}$ . Основанием для введения функции  $2 = \{0,1\}$ , характеризующей подмножества множества  $A$  пространства  $M$  объекта или системы, является наличие взаимно однозначного соответствия между этими подмножествами  $A$  множества  $M$  и функциями  $M \rightarrow 2$ , т.е. – изоморфизма. Этот изоморфизм устанавливается следующим образом. Для данного множества  $A \subseteq M$  определим функцию  $X_A : M \rightarrow 2$ , называемую характеристической функцией множества  $A$ .

При этом для элементов из  $M$ , принадлежащих  $A$  значение этой функции равно 1, а для элементов не принадлежащих  $A$  значение этой функции равно 0, т.е.:

$$X_A = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in A \\ 0, & \text{если } x \notin A \end{cases} \quad (5)$$

Отображение, ставящее в соответствие множеству точек компоненты  $A$  функцию  $X_A$ , является инъективным, т.е. если  $X_A = X_B$ ,  $A = B$  и сюръективным, если  $f \in 2^M$ , то  $f = X_A$

Это соответствие между подмножествами и характеристическими функциями может быть выражено через тензорное, геометрическое представление различных компонент с помощью определенного выше для них расслоенного пространства, систем координат в нем и понятия единичного тензора  $\delta_{\alpha\beta}$ , т.е. полученное описание позволяет определить свойства компонент или объектов в подпространстве-структуре.

В теории ТОиР, как указывалось выше, изучаются различные объекты и системы ЭТО ЛА, получаемые из компонент или объектов путем их соединения. Сначала эти компоненты или объекты рассматриваются как свободные, не связанные друг с другом, такие компоненты и объекты будем называть базовыми для данного объекта или системы. Единичный тензор для базовых компоненты или объекта  $n$  будем обозначать  $(\delta_{\alpha\beta})_n$

Рассматривая отображения некоторого множества  $A$  (системы ТОиР) в себя можно получить соответствующую ему матрицу соединений  $C_\alpha^\alpha$ .

Для системы базовых компонент или объектов можно записать:

$$\left. \begin{aligned} C_{\alpha^1}^\alpha &= (C_{\alpha^1}^\alpha)_1 \\ C_{\alpha^2}^\alpha &= (C_{\alpha^2}^\alpha)_2 \\ \dots\dots\dots \\ C_{\alpha^n}^\alpha &= (C_{\alpha^n}^\alpha)_n \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Функциональный модуль или компоненту можно представить в виде оператора с  $n$  (переменными) входами  $x_1, x_2, \dots, x_n$  и  $m$  (переменными) выходами  $y_1, y_2, \dots, y_m$ . Область значений всякого  $x_i$  есть некоторое пространство  $X_i$ , область значений всякого  $y_i$  есть некоторое пространство  $Y_i$ .

Конфигурации образующих и модели конкретных систем, которые определяются составом образующих и структурой их соединений, представляющих множество связей  $\sigma$ . Структура конфигураций представляет собой множество соединений связей входящих в эту структуру образующих, которую можно задать посредством матрицы, состоящей из нулей и единиц, указывающих на наличие или отсутствие соответствующего соединения.

При построении модели системы необходимо ввести набор правил и ограничений, которые обозначим через  $P$ .

При этом множество конфигураций, определяемых системой ограничений  $P$ , обозначим  $C(P)$ .

Таким образом множество регулярных конфигураций запишется в виде следующего набора из четырех элементов:

$$C(P) = (A, K, \Sigma, \rho), \quad (7)$$

где  $A$  – множество образующих;  $K$  – множество отображений в модулях;  $\Sigma$  – множество всех допустимых множеств соединений, существующих между связями образующих;  $\rho$  – отношение согласования или отношение связи.

Структура функциональных модулей объекта и его пространства, которое ими заполнено, а также структура связей в теории ТОиР определяются из самосогласованных решений уравнений, на базе описания конкретного объекта или системы с помощью системы уравнений фундаментального объекта или системы [2].

Таким образом, структура модели СЭС ЛА представляет собой множество  $\sigma$  соединений между всеми или некоторыми связями образующих в соответствие которым поставлены модули и блоки, входящие в ее состав.

Для представления конкретных соединений предусмотренной  $\sigma$  или соответствующей матрицей инцидентности, в работе предложен набор матриц соединений, множество которых образует тензор преобразования  $C_\alpha^\alpha$ . Сетевой подход к анализу СЭС ЛА базируется на основе тензора преобразования, физическая интерпретация которого отличается от интерпретации всех других тензоров, встречающихся при анализе физических систем. Тензор преобразования описывает операции изменения состояния системы, представляет собой двумерную матрицу, множество которых образует отдельный класс, называемый группой. Благодаря тому, что матрицы преобра-

зования  $C_\alpha^\alpha$  принадлежат группе, они обладают некоторыми свойствами, которые не имеет другое множество матриц [3] и которые позволяют решать задачи оценки технического состояния.

Для решения задач оценки технического состояния систем ЛА необходимо введение целого комплекса воздействий и реакции на них, т.е. изменение ее допустимых состояний, описываемых тензором преобразования  $C_\alpha^\alpha$ .

Введем в рассмотрение абстрактные действия над объектами и системами, которым дадим определенную физическую и геометрическую интерпретацию.

В инженерных и технических задачах производства объектов и систем ЛА изменения их структуры разделены на последовательные этапы, которые выполняются отдельно.

Введем для каждого из составляющих этапов изменений структуры объекта или системы матриц преобразований  $C_1, C_2, \dots, C_n$  и матрицу преобразования  $C$ , которая является результирующей.

Известно [3], что все матрицы  $C_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , преобразующие в нашем случае обобщенный объект или систему в конкретную, образуют группу матриц преобразования. Эти матрицы  $C_i$  будем называть тензором соединений.

Введем формулу получения результирующей матрицы преобразования  $C = C_\alpha^\alpha$ :

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n, \quad C_\alpha^\alpha = C_\alpha^{\alpha'} + C_\alpha^{\alpha''} + C_\alpha^{\alpha'''} + \dots + C_\alpha^n, \quad (8)$$

Разделение матрицы преобразования на ряд последовательных матриц дает эффективный способ уменьшения размерности инженерных задач технологического анализа и синтеза. При этом каждый этап анализа может быть осуществлен независимо от других, а затем, используя свойства действия сложения (ассоциативность, коммутативность, действия с нейтральным элементом и с обратным элементом) на элементах группы синтезировать технологический процесс как заданную последовательность преобразований.

Для формализации детальных решений задач синтеза программы контроля СЭС ЛА дифференцируем понятие компоненты и введем две фундаментальные компоненты:

простую компоненту элемента объекта;

особую компоненту сети объекта — электрическую связь.

Простые компоненты элементов объекта являются либо базовыми элементами электротехнических схем, либо составными частями сложных реальных объектов, таких как реле, контакторы и т.д. Эти компоненты образуют структуру

(монтажное пространство-тензор преобразования-элементы) составляющую электротехнический объект.

Для удобства выполнения операций над матрицами разной размерности каждой строке, столбцу и слою припишем определенные для каждого конкретного множества индексы.

Для представления  $n$  — матриц используем индексное обозначение, в котором  $n$  — матрица обозначается символом из больших букв латинского алфавита — базовой буквой, а к ней приписываются индексы, указывающие направления, расположены компоненты матрицы. Ниже будут использованы индексы двух классов: фиксированные и скользящие

Простые компоненты элементов объекта и электрические связи образуют все главные структуры СЭС ЛА: модули, электрические жгуты, распределительные устройства и т.д.

Целью введения матриц преобразования  $C$ ,  $n$  — матриц, а также операций или действий с ними при формализации описания объектов СЭС ЛА является с одной стороны сокращение числа уравнений и числа символов, используемых при анализе и синтезе объектов и преобразований, с другой — облегчение организации, математических преобразований и решения инженерных задач.

Введенное выше понятие тензора преобразования  $C_\alpha^\alpha$  позволяет разделить любую из числа схожих физических систем на две аналитические части: примитивную систему и тензор преобразования  $C_\alpha^\alpha$ , идентичные для всех систем и различные в каждой частной системе.

Определение множества матриц преобразования для каждой частной системы необходимо для идентификации уравнения поведения системы.

Обобщая вышесказанное можно определить следующие этапы построения программы контроля и диагностирования СЭС ЛА.

1. Разбиение системы на несколько независимых, простых модулей, каждый из которых имеет свой алгоритм поведения. Разбиение позволяет уменьшить размерность задачи, т.е. введенное понятие группы матриц преобразования дает возможность аналитического разделения сложной задачи на последовательность относительно простых задач.

2. Определение матрицы преобразований  $C$  для каждой образующей.

3. Анализ функционального модуля.

4. Моделирование внешних связей модуля и определение характера воздействия на них.

5. Определение тензора соединений для отдельных компонентов системы.

6. Определение матрицы соединений  $C$  от-

дельных компонентов, связывающей элементарную сеть с реальной.

7. Формула преобразования вектора приложенного напряжения при переходе от элементарной к реальной сети объекта имеет вид:  $e' = C_i \cdot e$ , где  $e$  – напряжение, приложенное к компонентам элементарной сети объекта;  $e'$  – напряжение, приложенное к компонентам реальной сети объекта;  $C_i$  – транспонированная матрица соединений компонентов.

8. Формула преобразования токов  $i$  при переходе от элементарной к реальной сети объекта имеет вид:  $i' = C_i \cdot i$ .

Таким образом уравнение поведения объекта или его модулей производится на базе следующих физических величин –  $e, i, r$ . Преобразование компонентов физических величин элементарной сети в компоненты реальной сети осуществляется с помощью матрицы соединений объекта на базе формул преобразований [4].

Описанная выше методика использовалась при формировании программы контроля блока регулирования, защиты и управления БРЗУ-115 в составе СЭС самолета ТУ-204.

Для контроля параметров блока БРЗУ-115 необходимо применение специализированных средств измерения с возможностью снятия цифровых аналогов этих параметров и одновременной обработки информации. Применение аппаратных и программных средств фирмы National Instruments позволяет осуществлять сбор информации посредством измерительных устройств и одновременную их обработку в соответствии с поставленной задачей. Обобщенная схема системы распознавания состояния объекта

контроля представлена на рис. 3.

В качестве реализации алгоритма оценки технического состояния системы СЭС предложена функциональная схема стенда проверки блока БРЗУ-115, представленная на рис. 4.

В состав стенда входят два источника питания, предназначенные для имитации работы генератора ГТ-40ПЧ6б. Предполагается использовать источники питания 315ASX, представленные компанией Pacific Source Power. Данные источники питания позволяют регулировать параметры электрической сети (величины напряжения, частоты, тока) в широком диапазоне, что позволяет проследить динамику поведения исследуемого объекта. Измерение выходных параметров блока БРЗУ-115 осуществляется посредством платы сбора данных PXI 6259, в соответствии с программой испытаний. Измерение, обработка и индикация параметров объекта контроля ведется на персональном компьютере в соответствии с программой, написанной в среде LabVIEW.

Таким образом разработанный метод представления компонент СЭС, в частности блока БРЗУ-115 обладает высокой степенью универсальности и позволяет описывать различные этапы жизненного цикла в рамках теории образов тензорного анализа.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гренандер У. Лекции по теории образов [Текст]. В 3 т. Т.1. Синтез образов / У. Гренандер. М.: Мир, 1979. 382 с.
2. Монтаж, контроль и испытания электротехнического оборудования ЛА/ Коптев, А. Н., Миненков А.А., Марь-

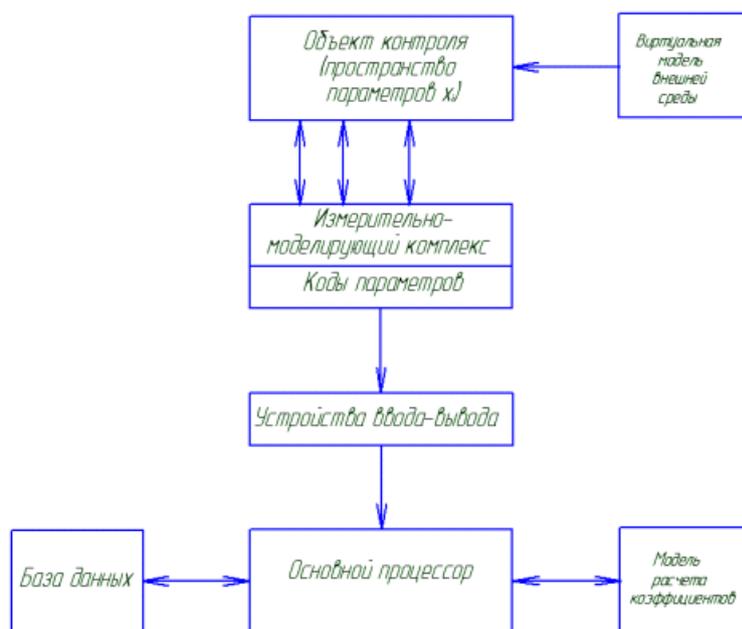


Рис. 3. Структурная схема стенда контроля БРЗУ 115/200

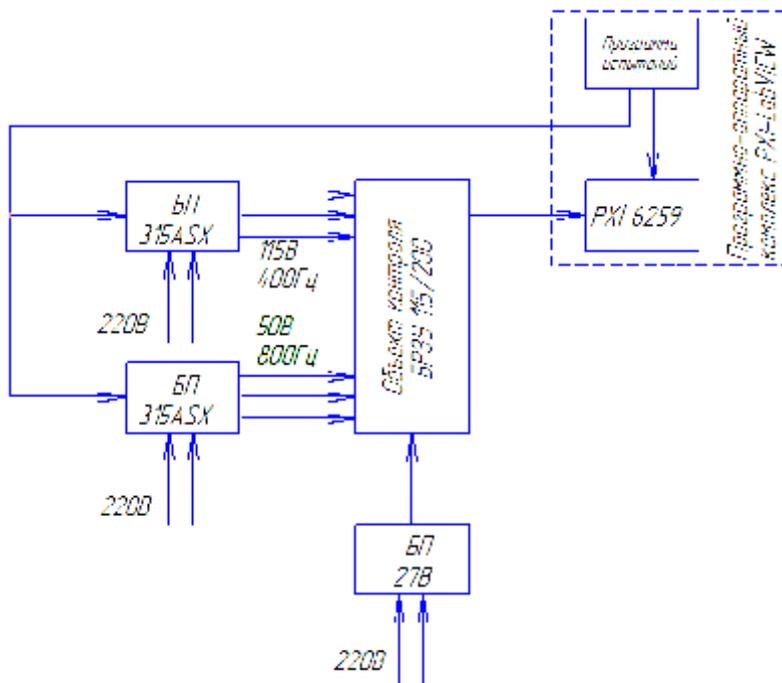


Рис. 4. Функциональная схема стенда проверки блока БРЗУ-115

ин Б.Н., Иванов Ю.Л. М.: Машиностроение, 1998. 296 с. 4. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем. М.: Радио и связь 1985 . 151 с.  
 3. Крон Г. Тензорный анализ сетей. М.: Сов. Радио 1978. 720 с.

**THE THEORY AND PRACTICE OF THE ANALYSIS, SYNTHESIS AND REALIZATION OF THE CONTROL AND DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS GENERATOR CONTROL UNIT GCU-115**

© 2010 A.N. Koptev, N.A. Yakovenko

Samara State Aerospace University

In article problems of increase of maintenance service efficiency of electrical supply systems at the expense using modern means and a quality monitoring and diagnostics are considered. Problems of increase of maintenance actions efficiency are defined by the decision of following problems:

Problems of increase of efficiency of maintenance actions are defined by the decision of problems of the analysis of structure of electric equipment ЛА and synthesis of the test information for the control and diagnosing. In work the general approach for the decision of this problem with use of topological representations is offered.

Key words: maintenance service, monitoring, diagnostics, topological representations.

Anatoly Koptev, Doctor of Technics, Professor, Head at the Operating Aircraft Department. E-mail: eat@ssau.ru  
 Nikolay Yakovenko, Graduate Student