*УДК 629.7.05*

# МОДЕЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СОСТОЯНИЕМ ОБЪЕКТОВ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

© 2008 А. Н. Коптев[1], Д. С. Ергалиев[2], К. Ж. Саханов[2]

[1]Самарский государственный аэрокосмический университет
[2]Военный институт Сил воздушной обороны министерства обороны Республики Казахстан

Рассматривается модель формирования набора измеряемого множества параметров для оценки технического состояния бортового комплекса оборудования (БКО) воздушного судна в рамках диагностической системы управления, представляемой сетью, в которую введены образующие как базовые образы. Предложены набор аксиом для формирования на базе вектора признаков оценки состояния образующих, представляющих диагностируемую систему БКО, и архитектура системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания в виде сети, функционирование которой связано с введённой системой аксиом.

*Модель, диагностируемый объект, множество, образующая, образ, конфигурация, сеть, система, диагностическое управление, вектор, признак, пространство, техническое обслуживание*

Рассмотрим подход к моделированию систем диагностического управления состоянием сложных систем бортового комплекса на базе методов теории распознавания образов [1].

Пусть задана некоторая конфигурация образующих $G^a$ из множества образующих *G:*

$$C=(g_1;g_2;...;g_m), c\in b(\Re), \quad (1)$$

регулярная в смысле $b(\Re)$. Тогда, чтобы произвести оценку её состояния, необходимо измерять параметры образующих в среде БКО, т. е. информацию, характеризующую конфигурацию для $p\in P$.

Необходимо произвести предварительную обработку этой информации, а затем передать её в сеть $N$ - диагностическую систему управления (процессор отображения), которая в состоянии изменять сама себя для того, чтобы сравнивать базовые образы, принятые в среде БКО, с полученными в результате взаимодействия конфигураций среды БКО. Это достигается при помощи изменения коэффициентов связи $N$, т. е. модификации процессора изображений, который представляет собой $N$. Осуществляемый в результате вывода образ относится к индуктивному типу. С помощью наблюдения, происходящего в среде, сеть $N$ будет в состоянии всё в большей и большей степени понимать окружающую структуру образов [2].

Рассмотрим конфигурацию, в которой $c=\{g\}$ состоит из единственной образующей $g$. Вектор её признаков состоит из подвекторов $a(g)$. Вектор $a(g)$ представлен в виде сенсорного вектора $u(t)$, элементы которого принадлежат сенсорному пространству $U$.

В носителе информации применено импульсное кодирование с частотной модуляцией. Будем считать, что действительная частота повторения импульсов отличается от $u_{sp}$ самопроизвольной частоты повторения импульсов на положительную или отрицательную величину в зависимости от истинностных значений в векторе признаков. Форма импульса будет фиксирована и точно задана на временной шкале ожидаемых междуимпульсных интервалов.

Для признака каждого типа $v$ на $A_v$ будет задана некоторая алгебра множества $a^v$, индуцирующая на $A$ алгебру-произведение:

$$a=a^1\times a^2\times a^3\times ... \quad (2)$$

Алгебра множеств имеет следующую интерпретацию: она показывает, насколько подробна информация, содержащаяся в сенсорном входном сигнале. Если смысл очень информативен, т. е. $P$ располагает мощной аппаратурой, то алгебра множеств является точной в техническом смысле слова, и наоборот.

Среди множеств, принадлежащих алгебре $a_v$, выделим непустые множества, не содержащие собственных подмножеств. Естественно, что число подобных множеств конечно: $j_1^v, j_2^v, j_3^v \ldots$.

Множество $A^v$ в целом представляет собой объединение всех множеств $j_j^v$, поскольку в противном случае

$$k = A^v \ \mathbf{I}\ (j_1^v \ \mathbf{U}\, j_2^v \ \mathbf{U}\, j_3^v \ldots) \neq \varnothing, \tag{3}$$

где $A^v$ - измеримое множество $k$ не может, однако, не допускать разбиения на меньшие $a^v$ - измеримые множества, так как в этом случае оно оказалось бы равным некоторому множеству $j_i^v$, что противоречит (3). С другой стороны, его нельзя представить в виде объединения $j_{i_1}^v \ \mathbf{U}\, j_{i_2}^v \ \mathbf{U}$, поскольку в этом случае

$$k = j_{i_1}^v \ \mathbf{U}\, j_{i_2}^v \ \mathbf{U} \ldots (\mathbf{I}(j_1^v)^c \ \mathbf{I}\ (j_2^v)^c \ldots) \neq \varnothing. \tag{4}$$

Следовательно, $k = j$ , и поэтому

$$A^v = j_1^v \ \mathbf{U}\, j_2^v \ \mathbf{U}\, j_3^v \ldots \tag{5}$$

Тогда для любого $a^v$ - измеримого множества $F$, принадлежащего $A^v$, получаем

$$F = (A^v \ \mathbf{I}\ F) = (F \ \mathbf{I}\ j_1^v) \ \mathbf{I}\ (F \ \mathbf{I}\ j_2^v) \ \mathbf{I} \ldots \tag{6}$$

В правой части выражения (6) имеет место либо $j_i^v \subseteq F$, либо $j_i^v \ \mathbf{I}\ F = j$ , поскольку множества $j_i^v$ не поддаются разбиению. Это означает, что члены, входящие в объединение, либо равны некоторому множеству $j_i^v$, либо представляют собой пустые множества.

Первая аксиома о диагностируемых объектах сформулирована в виде условия измеримости относительно алгебр множеств $a^v$.

**Аксиома 1.** Сенсорное пространство $U$ представляет собой прямое произведение признаковых сенсорных подпространств $U_1$, $U_2$, … :

$$U = U_1 \times U_2 \times U_3 \times \ldots, \tag{7}$$

и компоненты вектора $u(g)$ в подпространстве $U^v$ определяются следующим образом:

$$u_i^v(g) = u_0 \cdot \# \left\{ f_i^v(g) = \text{ÈÑÒÈÍÀ} \right\}$$
$$\text{при } f_i^v \in j_j^v \Big\}, \tag{8}$$

где $u_0$ - случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $V$; для всех $v$ величина $u_0$ одна и та же. Носителем $u_0$ является вся ось действительных чисел, и в нуле дискретной вероятности не имеется.

Всё это относится к отдельной образующей. Обратимся к некоторой регулярной конфигурации

$$C = (g_1; g_2; \ldots; g_n) \in b_n(\mathfrak{R}).$$

Описанная кодировка $u = u(g)$ даёт некоторый сенсорный вектор $u$, воздействующий на сеть $N$ в течение определенного периода времени. Сначала $g_1$ представляется в виде $u(g_1)$ и подаётся в течение некоторого времени на сеть $N$, затем $g_2$ представляется в виде $u(g_2)$ и подаётся на $N$ и т. д. В дополнение к подобному кодированию будем допускать быстрое сканирование конфигурации, когда $P$ пытается изучать конфигурацию как единое целое. Это означает, что конфигурация, у которой $n > 1$, предстаёт перед специалистом как последовательность параметров $P$. Вектор $u$ как функция времени будет в таком случае некоторой периодической функцией, например с периодом. Поэтому

$$\begin{aligned} &u = u\,(g_1) \text{ в течение времени } Dt_1, \\ &u = u\,(g_2) \text{ в течение времени } Dt_2, \\ &\ldots \\ &u = u\,(g_n) \text{ в течение времени } Dt_n, \\ &t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \ldots + \Delta t_n, \end{aligned} \tag{9}$$

а затем следуют периодические повторения. Скорость сканирования по конфигурации с ограничена лишь инерционностью приборов, которыми располагает $P\colon Dt_1\rangle t_{scan}$. Максимальная длина кадра не ограничена. Во всех представлениях $u(g_1)$, $u(g_2)$ будет использоваться одно значение $u_0$, т. е. для конфигурации в целом кодирование когерентно. Отношения $Dt_r / Dt$ характеризуют внимание, уделяемое $P$ образующим, из которых состоит наблюдаемая конфигурация объектов. Они представляют собой неотрицательные числа, прибавляемые к 1.

**Аксиома 2.** 1) Конфигурация, принадлежащая $b(\Re)$, представляется некоторой периодической кусочно-постоянной функцией времени, принимающей значения $u(g_1)$, $u(g_2)$ и т. д., причём кодирование когерентно.

2) Различные конфигурации представляются указанным способом, но с использованием статистически независимых значений $u_0$.

**Аксиома 3.** 1) Под диагностируемым объектом будем понимать линейный оператор $L$, получаемый как некоторая линейная функция проекционных операторов $P_j^v$:

$$L = \sum_{vj} l_j^v P_j^v\,, \tag{10}$$

где $l_j^v$ - действительные постоянные; $P_j^v$ - оператор проекции, который в $U$ проектирует на $j$-е измерение $j_j^v$ $v$-го сенсорного подпространства. Аналогично $P^v$ должен проецировать на $v$-е сенсорное подпространство.

2) Под диагностическим высказыванием будем понимать диагностируемый объект, представляющий собой некоторую проекцию.

Рассмотрим некоторую конфигурацию $c$=$\{g\}$ с одной образующей, переведённую в представление $u(g)$ за время, в течение которого $c$ наблюдалась. Повторим это наблюдение, воспроизведя конфигурацию несколько раз, т. е. воспользовавшись различными независимыми значениями $u_0$ (аксиома 1).

В частном случае, когда оператор $L$ обращается в некоторую проекцию $P_j^v$, эта величина принимает следующий вид:

$$V\left[\#\left\{f_i^v(g) = ÈÑÒÈÍÀ\ ,\ f_i^v \in j_j^v\right\}\right]^2, \tag{11}$$

так что известные значения математического ожидания будут определять значения в квадратных скобках в (11), поскольку $V$ - это известная постоянная. Следовательно, две образующие $g$ и $g$` можно различить (теоретически), если

$$\#\left\{f_i^v(g) = ÈÑÒÈÍÀ\,,\ f_i^v \in j_j^v\right\} \neq \#\left\{f_i^v(g') = ÈÑÒÈÍÀ\,,\ f_i^v \in j_j^v\right\} \tag{12}$$

по крайней мере, для некоторых пар ($v$, $j$).

Отображение

$$g \to (E\left\| P_j^v u(g)\right\|^2;\ j = 1,2,...) \tag{13}$$

представляет $G$ в виде векторов, компонентами которых являются целые неотрицательные кратные $V$ значения. В случае, когда $a$ состоит из всех подмножеств $A$, значение этого отображения определяет значение истинности каждого бинарного признака, так что образующая $g$ определяется однозначно. Если $a$ более ограничена, что соответствует менее мощному приборному оснащению $\Omega$, то отдельные образующие не всегда можно отличить друг от друга.

Выше была введена статическая среда, в которой действует $\Omega$, и тем самым на сенсорном пространстве $U$ было задано некоторое распределение вероятностей. Рассмотрим однообразующие конфигурации. Из (13) следует, что математическое ожидание сенсорного вектора равно нулю:

$$E[u(g)] = \int_G u(g) Q_1(dg) = 0\,. \tag{14}$$

Введём ковариации

$$\tilde{A} = E\left[u(g)u^T(g)\right] = \int_G u(g)u^T(g)Q_1(dg). \tag{15}$$

В частном случае счётной среды, когда в $\exp(P)$ могут входить лишь определённые объекты $g_1$, $g_2$, ..., характеризующиеся вероятностями $Q_1(g_1)$, $Q_2$ $(g_2)$, ..., получаем

$$\tilde{A} = \sum_m u(g_m)u^T(g_m)Q_1(g_m)\,. \tag{16}$$

Ковариации включают большую часть, но не все существенные факты о exp($P$). Величину $\Gamma$ будем называть оператором опыта.

Важное следствие предложения (16) заключается в том, что можно ожидать взаимной (почти) ортогональности $u(g)$. Таким образом, собственные векторы оператора опыта представляют собой (почти) сенсорные векторы существенно разных объектов. Их собственные значения равны

$$Q_1(g_m)\left\|u(g_m)\right\|^2 = Q_1(g_m) \text{ энергия } \left[u(g_m)\right]. \quad (17)$$

Введём ядро в сенсорном пространстве $U$ оператора опыта $\Gamma$

$$A(\tilde{A}) = \left\{u \middle| \tilde{A}u = 0\right\} \subset U \ , \quad (18)$$

которым будет удобно пользоваться при описании характеристик обучения.

Ядро $A$ ($\Gamma$) для счётной среды с одноатомными конфигурациями представляет собой ортогональное дополнение линейного замыкания $Lin\{u$(exp ($\Omega$)$\}$.

<u>Доказательство</u>. Произвольный сенсорный вектор $u$ можно записать как

$$u = \sum_{g_\aleph \in \exp(W)} e_\aleph u(g_\aleph) + u'' = u' + u''; u'' \perp Lin\{u(\exp(W))\}. \quad (19)$$

Поскольку оператор $\Gamma$, определяемый выражением (19), обладает тем свойством, что $\Gamma u''$=0, то для того, чтобы обеспечить и $u \perp A(\Gamma)$, $\Gamma u$ =0, необходимо и достаточно выполнения условий: $\Gamma u' = 0$. Оператор $\Gamma$, однако, является симметрическим, и его сужение на линейное замыкание $Lin$ несингулярно. Действительно, если $u$ - линейное замыкание $u$(exp($\Omega$)) и $\Gamma u$=0, то из (17), (18) следует, что

$$u^T \tilde{A} u = \sum_m \left(u^T u(g_m)\right)^2 Q_1(g_m) = 0 \,. \quad (20)$$

Поэтому $u \perp u(g_m)$ для всех $\mu$, поскольку $Q_1(g_m) \rangle 0$ для всех $\mu$, так как ограничились носителем exp($\Omega$) от $Q_1$. Следовательно, $u \in A(\tilde{A})$ тогда и только тогда, когда $u' = 0$, и поэтому $u''$ принадлежит ортогональному дополнению линейного замыкания.

Отображение $u$ отображает exp($P$), но не всегда на $Lin$. Отметим, что множество $u$(exp($P$)) можно сделать линейно замкнутым, введя в exp($P$) следующие фиктивные объекты, обладающие неисправностями различных видов, т. е. деформированные объекты. Если $g_1$ и $g_2 \in$ exp($P$), то, естественно,

$$u = c_1 u(g_1) + c_2 u(g_2) \in Lin \,,$$

но при этом не должно быть объекта $g$ такого, что $u = u(g)$. Подбирая соответствующие значения $u_0$, можно добиться того, чтобы u был суммой, которая соответствует образующим, когда числа, входящие в правую часть (20), являются натуральными числами. Следовательно, признак определяется на $a$ и задан новый «объект».

Считается, что эти фиктивные объекты оказывают существенное влияние на характеристики обучения $\Omega$. Отметим, что при построении фиктивных объектов используются различные значения $u_0$, т. е. действует условие некогерентности.

Аддитивный шум, налагаемый на вектор $y$, не вызывает сколько-нибудь существенных изменений. Поэтому вводится специальная аксиома.

**Аксиома 4.** Кодированное представление переменной входной величины определяется как

$$u(t) = \int_{-\infty}^{t} w(t-s) u_s(s) ds \,, \quad (21)$$

где $u_c(s)$ представляет величину, определяемую выражением (21) в любой момент времени s; $w$-весовая функция.

Временное суммирование в (21), представляющее периферийную обработку, выражается с помощью временной весовой функции $w$, соответствующей постоянной времени $t_c$. Её необходимо учитывать только в тех случаях, когда предъявляемые образующие быстро сменяют друг друга. Единственное допущение, необходимое для $w(t)$, заключается в том, что $w(t) = O(t^2)$, $t$ >1.

Кодирование, определяемое (21), не обладает мощностью, достаточной для передачи всей информации, необходимой $P$ для изучения env($P$). Отказавшись на время от $u_0$ в (21), положив $u_0 = 1$, решаем данную проблему при помощи уплотнения (мультиплексирования) сенсорного вектора и введения входного поля у сети. Для этого потребуется следующая аксиома.

**Аксиома 5.** Для заданного сенсорного вектора $u = u(g)$ сформируем уплотнённый вариант (порядок уплотнения, или кратность $m$)

$$u = u \otimes u \otimes \ldots \otimes u \quad (m \text{ раз}), \tag{22}$$

где $y$ принимает значения в пространстве входных сигналов

$$Y = U \otimes U \otimes \ldots \otimes U\,. \tag{23}$$

Вновь вводим коэффициент когерентности $u_0$. Для этого $y$ заменяется на $u_0 y$. В данном случае $u_0$ обладает теми же, что и прежде, свойствами.

Оператор уплотнения $\otimes$ имеет следующий смысл. Если задан некоторый вектор $u = (u_i)$, то его уплотнённым с кратностью $m$ вариантом является $m$-мерный массив с элементами $u_{i_1}, u_{i_2}, \ldots, u_i$ - результат перемножения компонент. Кратность $m$ отнюдь не столь велика, как исходные размерности $U$ и $U^v$.

Для простоты будем предполагать, что во всей системе порядок уплотнения один и тот же. В качестве обобщения этого случая можно рассмотреть ситуацию, когда кратность изменяется в системе от 1 до некоторого максимума. Если, в частности, информационный носитель системы обладает высокой избыточностью, то целесообразно уплотнять лишь некоторую часть каждого сенсорного подпространства.

Рисунок 1 даёт представление о типе архитектуры системы диагностического управления состоянием объекта технического обслуживания специалистами ($p \in P$), включающей аппаратуру и программно-аппаратное обеспечение.

Диагностируемый при обслуживании объект в соответствии с аксиомой 1 может быть представлен как некоторая среда признаков, характеризующих этот объект, и представляющий собой прямое произведение пространств признаков $A^v$. Для признака типа $v$ на каждый признак $A^v$, как указывалось выше, задана алгебра множеств $a^v$, которая показывает полноту информации, содержащуюся в сенсором входном сигнале $Y$. При этом каждый полученный вектор о состоянии конфигурации уплотняется для специалиста $P$ на основе $a^v$-измеримого множества и полученных подвекторов для каждой образующей $U=U(g_i)$ в течение времени $t = \sum_{i=1}^{n} Dt_i$. Будем полагать, что уплотнение физически происходит в пределах основного процессора. Можно считать, что $N$ - это основной процессор, включающий аппаратуру и программно-аппаратное обеспечение; система микропрограммирования последнего может модифицировать $N$. Тогда можно говорить об уплотнении в результате вычислений в $N$, а не за счёт каких-либо специализированных устройств.

При этом необходимо вводить частичное уплотнение порядка $m$. Это означает, что формируются не все возможные произведения компонент вектора $u$, а лишь часть из них.

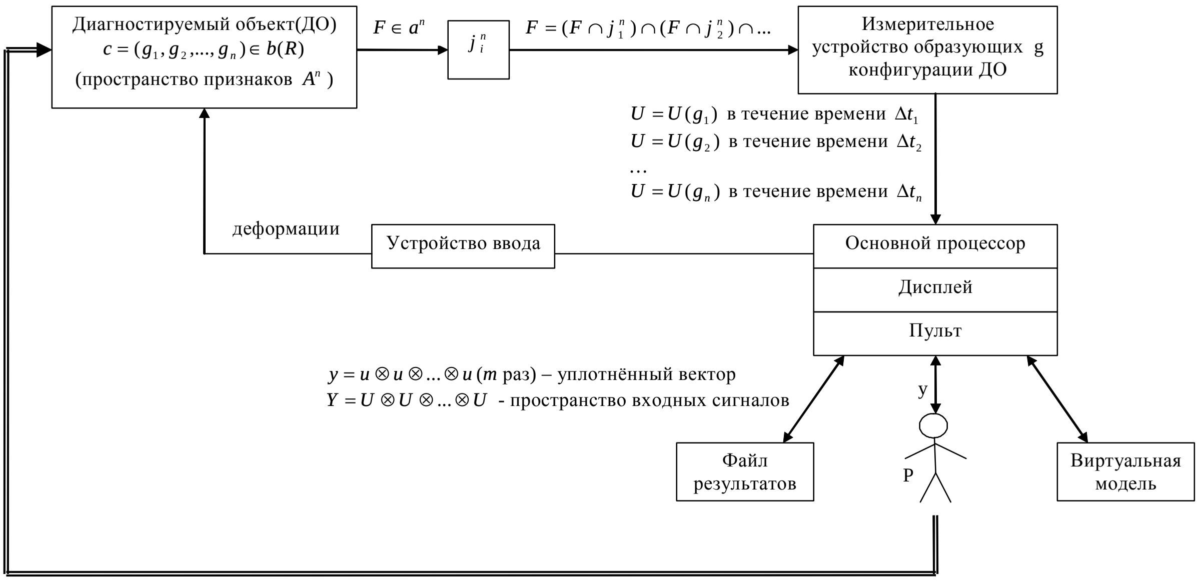
В соответствии с вышеизложенным, $P$ может самое большее идентифицировать объекты в той степени, в какой это допускает алгебра множества. Поэтому будем считать, что высказывания могут быть представлены в виде булевой функции от комбинированных признаков $j_i^v$.

В рамках сети формулируется некоторое исчисление высказываний о диагностируемых объектах, которое связывает соответствующие высказывания с $P$ в пространстве входных сигналов $Y$. Простое высказывание, содержащее признаки только типа $v$, можно записать в виде

$$C = \vee_E j_j^v\,, \tag{24}$$

где дизъюнкция берётся по некоторому множеству $E$ пар $(n, j)$, $E$ Î $a^n$.

На базе этих высказываний формируются управляющие воздействия, т. е. некоторый оператор $O(c)$, приводящие к изменению состояния (деформации) объекта диагностики. Оператор, построенный для высказыва-




*Ðèñ. 1. Ñåòü ñèñòåìû äèàãíîñòè÷åñêîãî óïðàâëåíèÿ ñîñòîÿíèåì îáúåêòà òåõíè÷åñêîãî îáñëóæèâàíèÿ*

ния $C$, активируется некоторым сенсорным вектором $u = u(g)$ тогда и только тогда, когда $C(g)$ = ИСТИНА.

Следуя предложенной методике, можно построить исчисление высказываний для управления состоянием диагностируемого объекта.

**Библиографический список**

1. Лекции по теории образов У. Гренандер [Текст]. В 3т. Т.1. Синтез образов. – М.: Мир, 1979. – 382 с.

2. Лекции по теории образов У. Гренандер [Текст]. В 3т. Т.2. Анализ образов. – М.: Мир, 1981. – 448 с.

**References**

1. Lectures on image theory W. Grenander. Three volumes. Vol. 1. Image synthesis. – Moscow: Mir, 1979 – 382 p.

2. Lectures on image theory W. Grenander. Three volumes. Vol. 2. Image analysis. – Moscow: Mir, 1981 – 448 p.

## MODELLING THE ARCHITECTURE OF A SYSTEM CONTROLLING THE CONDITION OF MAINTENANCE OBJECTS

© 2008 A. N. Koptev[1], D. S. Yergaliyev[2], K. Zh. Sakhanov[2]

[1]Samara State Aerospace University
[2]Military Institute of Air Defence Forces of Kazakhstan Republic Defence Ministry

The paper present a model of forming a set of a measurable multitude of parameters for assessing the technical condition of an airborne equipment complex (AEC) of aircraft in the context of a diagnostic control system represented by a network which incorporates generatices as basic images. A set of axioms is proposed for forming the assessment of generatrix condition on the basis of indication vector, the generatrices presenting the AEC system being diagnosed. The architecture of a system of diagnostic control of the maintenance object condition in the form of a network whose functioning is connected with the system of axioms introduced is also proposed.

*Model, diagnosed object, multitude, generatrix, image, configuration, network, system, diagnostic control, vector, indication, space, maintenance*

**Информация об авторах**

**Коптев Анатолий Никитович**, заведующий кафедрой эксплуатации авиационной техники, доктор технических наук, профессор, СГАУ. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

**Ергалиев Дастан Сырымович**, начальник кафедры конструкции и эксплуатации авиационных двигателей Военного института Сил воздушной обороны МО республики Казахстан, кандидат технических наук, доцент. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

**Саханов Канат Жаксылымович,** заместитель начальника кафедры конструкции и эксплуатации авиационных двигателей Военного института Сил воздушной обороны МО республики Казахстан. Техническая диагностика и оценка состояния систем бортовых комплексов оборудования для формирования упреждающих технологий обслуживания.

**Koptev, Anatoly Nikitovitch**, head of aircraft maintenance department, doctor of technical science, professor, SSAU. Technical diagnostics and assessment of airborne equipment systems for the forming of lead maintenance technologies.

**Yergaliyev, Dastan Syrymovitch**, head of aircraft engine design and maintenance department, Military Institute of Air Forces, Ministry of Defence of the republic of Kazakhstan, candidate of technical Science, associate professor. Technical diagnostics and assessment of airborne equipment systems for the forming of lead maintenance technologies.

**Sakhanov, Kanat Zhaksylymovitch**, deputy head of aircraft engine design and maintenance department, Military Institute of Air Forces, Ministry of Defence of the republic of Kazakhstan. Technical diagnostics and assessment of airborne equipment systems for the forming of lead maintenance technologies.