

УДК 629.735

П.В. Королев

ПРИМЕНЕНИЕ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИЕЙ ПАРКОВ ОДНОТИПНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК ВОЗДУШНЫХ СУДОВ*

Предложен подход к организации управления эксплуатацией парков однотипных силовых установок воздушных судов, базирующийся на применении индивидуальных математических моделей рабочего процесса авиационных двигателей. Рассмотрены процедуры формирования индивидуальных моделей и их использования для решения трех групп технических задач управления.

Эффективность деятельности авиакомпаний (АК) во многом зависит от умения летных и технических служб использовать наличные функциональные возможности эксплуатируемых воздушных судов (ВС). Особенно важным является умение использовать функциональные возможности их силовых установок (СУ), основу которых составляют авиационные двигатели (АД).

Существуют следующие аспекты эффективности деятельности АК, зависящие только или в значительной мере (первые три) от результатов управления эксплуатацией наличных парков СУ ВС: безопасность полетов; регулярность полетов; осуществимость полетов особого назначения; экологичность полетов; расходы на топливо для выполнения полетов; расходы на приобретение АД и других элементов СУ; расходы на приобретение запасных модулей и деталей АД и других элементов СУ; расходы на техническое обслуживание СУ; расходы на ликвидацию последствий отказов СУ. Анализ приведенного перечня, а также учет того, что стоимость СУ составляет обычно 30...60 % стоимости ВС и что более половины авиационных происшествий по техническим причинам происходит в настоящее время вследствие отказов СУ, позволяют утверждать, что целевая функция управления деятельностью авиакомпании оказывается весьма близкой целевой функции управления эксплуатацией имеющихся в ее распоряжении парков однотипных СУ ВС.

Система управления эксплуатацией парка однотипных СУ ВС включает в себя (рис.1) два контура: контур управления состоянием отдельных экземпляров парка и контур управления их использованием.

Контур управления состоянием обеспечивает поддержание исправного состояния СУ путем реализации в отношении них управляющих воздействий (УВ) 1-го рода: специальная обработка поврежденных участков деталей; перенастройка системы управления; замена неисправных деталей и модулей;.... Необходимость реализации определенных наборов УВ 1-го рода устанавливается классификацией текущих технических состояний (далее - состояний) экземпляров парка, производимой в результате решения 1-й и 2-й групп технических задач управления: задач диагностирования СУ и задач косвенного контроля выработки их ресурса.

Решением задач диагностирования производится первый этап классификации состояний СУ: в результате обработки по специальным алгоритмам данных статического и функционального контроля установок в процессе их производства и во время эксплуатации принимаются решения об отнесении текущего состояния каждого из экземпляров парка к одному из установленных классов состояний. Распознаваемые при диагностировании классы со-

* Статья опубликована с сохранением авторского стиля, орфографии, пунктуации.

стояний различаются показателями, в общем случае, и эффективности, и надежности функционирования установок, при этом под надежностью функционирования понимается способность установок не иметь в эксплуатации функциональных (параметрических) и физических (прочностных) отказов.

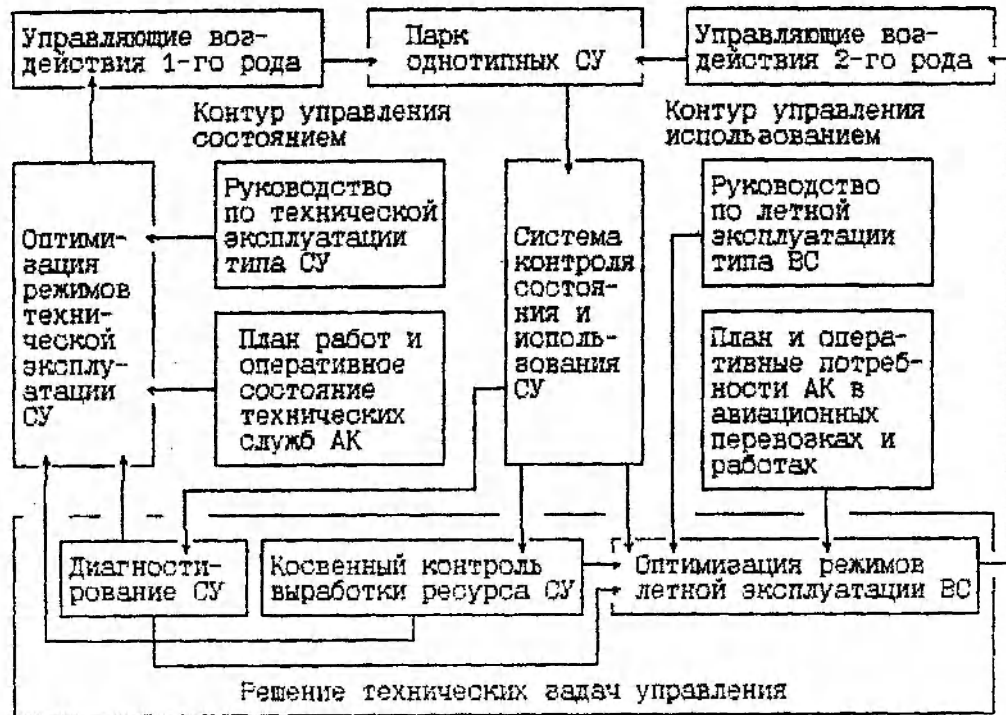


Рис. 1. Схема управления эксплуатацией парка однотипных СУ ВС

Второй этап классификации текущих состояний СУ производится в результате косвенного контроля выработки их ресурса. Такой контроль является дополнением к диагностированию, одной из функций которого является прямой мониторинг выработки ресурса установок по данным методов неразрушающего контроля их наиболее нагруженных деталей (оптического, ультразвукового,...). Потребность в косвенном контроле выработки ресурса бывает вызвана недоступностью для прямого контроля зон вероятного разрушения ряда деталей и его низкой точностью в отношении некоторых механизмов разрушения конструктивных материалов. В своем простейшем варианте косвенный контроль выработки ресурса авиационной СУ основывается на учете ее наработок: во времени и в рабочих циклах; общие и относящихся к диапазонам режимов работы, наиболее нагружающих конструктивные элементы. Повышение точности косвенного контроля связано с обработкой данных контроля использования установок о циклограммах их работы, применением математических моделей нагружения их деталей и математических моделей действующих механизмов разрушения материалов этих деталей.

Решения о применении в отношении конкретных экземпляров парка СУ определенными наборами УВ 1-го рода принимаются на основании произведенной классификации их текущих состояний с учетом требований руководства по технической эксплуатации рассматриваемого типа СУ, а также наличных ресурсов управления, зависящих от плана работ и оперативного состояния технических служб АК.

Контур управления использованием парка авиационных СУ (рис.1) предназначен для оптимизации процесса летной эксплуатации оснащенных ими ВС. Управление обеспечивается реализацией УВ 2-го рода, к числу которых относятся следующие: выбор экземпляров ВС для выполнения полетных заданий; выбор сроков выполнения полетных заданий; выбор коммерческих загрузок ВС; выбор профилей полетов и циклограмм работы СУ ВС во время

их выполнения. Определение целесообразных УВ 2-го рода осуществляется решением 3-й группы технических задач управления эксплуатацией парка СУ: задач оптимизации режимов летной эксплуатации ВС. В отличие от задач первых двух групп, относящихся к классу задач распознавания, задачи 3-й группы принадлежат классу оптимизационных и сводятся к поиску значений векторов управляемых переменных, отвечающих экстремальным значениям некоторых скалярных функций цели.

Имеется большое разнообразие постановок задач оптимизации режимов летной эксплуатации ВС, что обусловлено разнообразием их типов, а также видов выполняемых авиакомпаниями перевозок и работ и имеющихся в их распоряжении ресурсов управления летной эксплуатацией. Каждая из постановок бывает вызвана необходимостью определить оптимальное значение одного или группы УВ 2-го рода в отношении одного или группы полетных заданий, выполняемых одним или группой ВС. При этом в качестве функции цели выступают обычно экономические показатели, характеризующие комплексно существующие аспекты эффективности деятельности авиакомпании.

К числу наиболее практикуемых в настоящее время постановок задач оптимизации режимов летной эксплуатации ВС относятся следующие: определение профиля полета и циклограммы работы СУ ВС во время его выполнения, обеспечивающих минимальный суммарный расход топлива при заданных значениях координат аэродромов вылета и назначения и взлетной массы ВС; определение нижней границы диапазона режимов СУ ВС, обеспечивающих безопасный взлет при заданных значениях взлетной массы ВС, параметров взлетно-посадочной полосы (ВПП) и атмосферного воздуха; определение условий выполнения полетного задания в части предельных значений взлетной массы ВС и параметров атмосферного воздуха при заданных значениях координат аэродромов вылета и назначения и параметров ВПП аэродрома вылета.

УВ 2-го рода применяются в отношении конкретных экземпляров ВС на основании результатов решения 3-й группы технических задач управления эксплуатацией парка авиационных СУ с учетом требований руководства по летной эксплуатации рассматриваемого типа ВС и наличных ресурсов управления, зависящих от плана и оперативных потребностей АК в авиационных перевозках и работах. Кроме этого при определении целесообразных УВ 2-го рода принимаются во внимание результаты классификации текущих состояний силовых установок парка ВС.

Укажем основные из недостатков применяемых в настоящее время методов управления эксплуатацией парков однотипных СУ ВС:

1. В отличие от большинства немеханических и многих механических систем воздушных судов, обладающих дискретными функциональными характеристиками, их СУ относятся к классу непрерывных технических объектов: в области работоспособных состояний функциональные характеристики авиационных СУ зависят непрерывно от значений компонент некоторого гипотетического бесконечномерного вектора параметров состояния их элементов (геометрические параметры, определяющие формы поверхностей деталей проточной части (ПЧ) двигателей, воздушных винтов,...). Поэтому из-за воздействия на элементы однотипных СУ ВС многочисленных детерминированных и случайных производственно-технологических и эксплуатационных факторов парк таких установок оказывается существенно неоднородным по функциональным характеристикам составляющих его экземпляров. Главная причина указанной неоднородности состоит при этом в индивидуальности характеристик составляющих основу СУ авиадвигателей. Применяемые методы управления эксплуатацией авиационных СУ почти не реализуют имеющиеся возможности учета индивидуальности их функциональных характеристик, заключающиеся в использовании данных их производственного и эксплуатационного контроля.

2. В используемых при управлении эксплуатацией СУ ВС методах их диагностирования отсутствует, как правило, комплексный подход к распознаванию классов состояний, основанный на анализе текущих положений и кинематики объектов в едином многомерном пространстве критериев состояния. Проектирование систем эксплуатационного контроля ВС производится часто до разработки алгоритмов их диагностирования, без должного учета потребностей этих алгоритмов.

3. Применяемые методы косвенного контроля выработки ресурса СУ ВС не используются в достаточной степени имеющиеся достижения механики разрушения конструкционных материалов: не учитываются многие важные закономерности действующих механизмов разрушения материалов деталей СУ, а некоторые из этих механизмов не принимаются во внимание совсем. Основная причина указанного недостатка заключается в отсутствии должного информационного обеспечения косвенного контроля выработки ресурса: отсутствие результатов базовых экспериментов по исследованию воздействия различных механизмов разрушения на применяемые материалы; отсутствие систем контроля использования авиационных СУ, обладающих удовлетворительными по составу измеряемых параметров функционирования, быстродействию и точности характеристиками.

4. При оптимизации режимов летной эксплуатации ВС, как правило, не учитываются одновременно два таких важнейших и соизмеримых по значимости экономических аспектов эффективности деятельности авиакомпании, какими являются цены расходуемых в полете топлива и ресурса СУ.

5. При оптимизации режимов летной эксплуатации ВС не производится должный учет результатов классификации текущих состояний их СУ, что является более важным, чем учет индивидуальности их аэродинамических характеристик.

Существующие недостатки методов управления эксплуатацией парков СУ ВС обусловлены, прежде всего, отсутствием достаточного внимания к обеспечению их высокой эффективности. Парки однотипных СУ ВС, объемы которых исчисляются, во многих случаях, сотнями экземпляров, а стоимости - сотнями миллионов и даже миллиардами долларов, потребляют за время своих жизненных циклов миллионы тонн топлива и отказы при функционировании которых могут приводить к очень тяжелым экономическим и социальным последствиям, заслуживают того, чтобы методы управления их эксплуатацией разрабатывались с полным учетом последних достижений науки и опирались при своей реализации на наиболее совершенные средства измерительной и вычислительной техники.

Целесообразен общий подход к организации управления эксплуатацией парков СУ ВС базирующийся на применении индивидуальных математических моделей рабочего процесса (ММРП) составляющих основу установок авиационных двигателей для решения охарактеризованных выше 3-х групп технических задач управления. Его основные положения состоят в следующем (рис.2):

1. На основе данных проектирования и доводки создаются типовые ММРП: ММРП среднестатистического АД рассматриваемого типа. Они отражают типовые особенности конструкции его проточной части и организации его рабочего процесса (РП). Типовые ММРП отличаются друг от друга полнотой охвата моделируемого РП и описания его свойств.

2. На основе данных контроля конкретных экземпляров АД во время их изготовления и ремонта осуществляется 1-й этап формирования их индивидуальных ММРП: путем парной идентификации каждой из типовых ММРП создаются соответствующие им семейства индивидуальных базовых ММРП. Данные контроля двигателя включают в себя следующие результаты измерений геометрических параметров его ПЧ и испытаний ее отдельных элементов, а также приемосдаточных испытаний двигателя в целом.

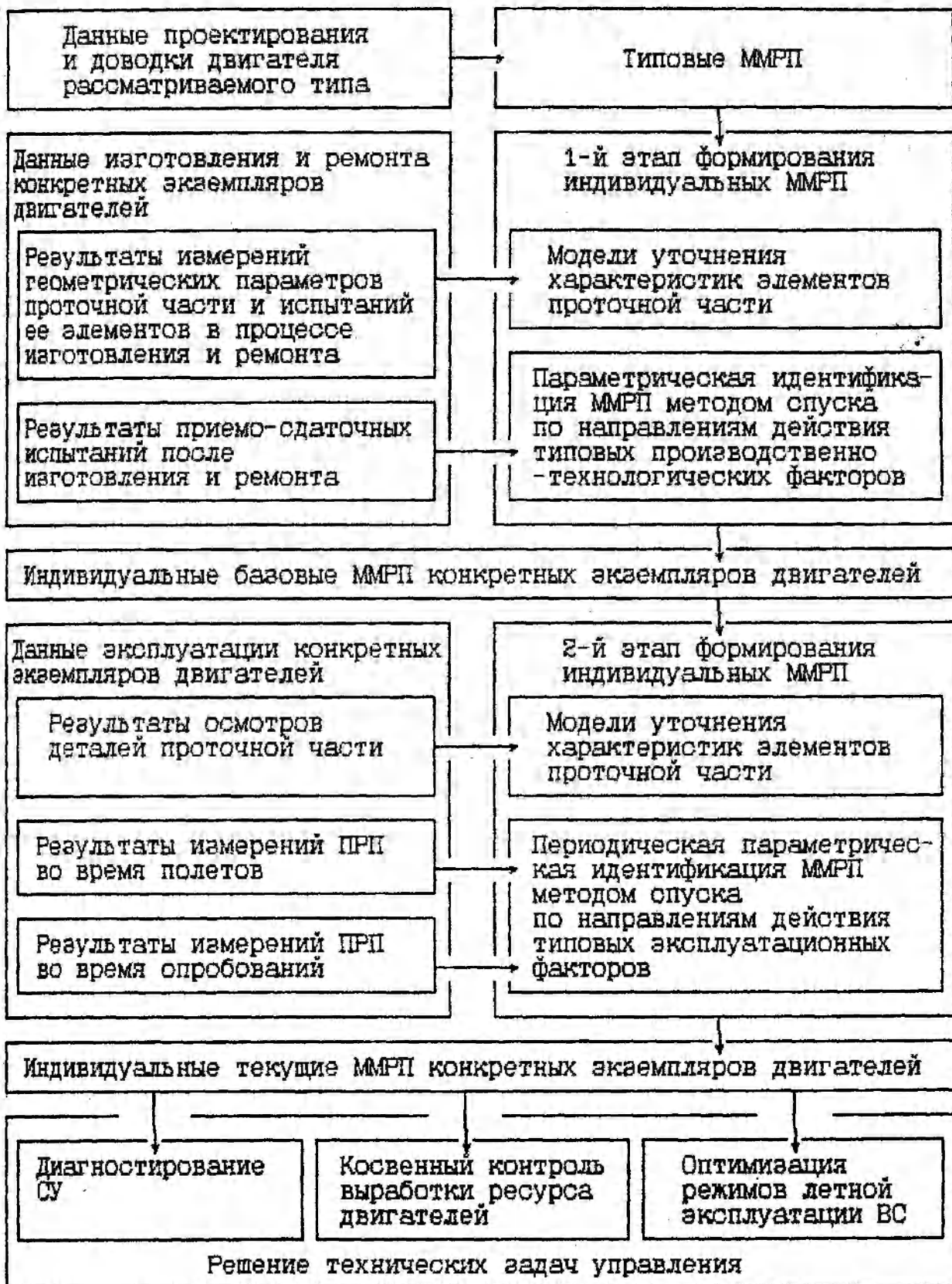


Рис. 2. Схема применения индивидуальных ММРП авиационных двигателей для управления эксплуатацией парка однотипных СУ ВС

3. На основе данных эксплуатационного контроля конкретных экземпляров АД осуществляется 2-й, заключительный этап формирования их индивидуальных ММРП: путем периодической уточняющей параметрической идентификации каждого из семейств индивидуальных базовых ММРП создаются и поддерживаются в актуальном состоянии соответствующие им семейства индивидуальных текущих ММРП. Данные контроля двигателя включают в себя здесь результаты осмотров деталей его ПЧ, а также измерений его параметров РП (ПРП) во время полетов и опробований.

4. Индивидуальные текущие ММРП конкретных экземпляров АД используются в алгоритмах решения технических задач управления эксплуатацией парка однотипных СУ ВС.

5. Подобно тому, как протекание РП каждого из конкретных экземпляров АД однозначно определяется, с одной стороны, текущим состоянием его проточной части и, с другой стороны, режимом его работы, каждая из i -го семейства индивидуальных ММРП (базовых или текущих) представляет вектор \vec{c}_{mj}^i модельных ПРП (j - номер двигателя в парке) детерминированной типовой модельной функцией f_m^i вектора \vec{a}_{mj}^i модельных параметров состояния ПЧ и вектора \vec{b}_m^i модельных режимных параметров:

$$\vec{c}_{mj}^i = f_m^i(\vec{a}_{mj}^i, \vec{b}_m^i). \quad (1)$$

Каждая из типовых модельных функций f_m^i является попыткой зафиксировать наиболее важные для практики свойства реальной общей типовой зависимости

$$\vec{c} = f(\vec{a}, \vec{b}) \quad (2)$$

вектора \vec{c} параметров функционирования АД рассматриваемого типа от вектора \vec{a} параметров состояния его ПЧ и вектора \vec{b} его режимных параметров.

Дадим некоторые пояснения к последнему положению.

Величины \vec{a} и \vec{c} зависимости (2) представляют собой некоторые гипотетические бесконечномерные векторы, характеризующие столь сложные объекты, которыми являются соответственно поверхности деталей ПЧ двигателя и поля параметров потока в ней. Величины \vec{a}_m^i и \vec{c}_m^i зависимостей (1) являются конечномерными аналогами \vec{a} и \vec{c} .

Компоненты вектора \vec{a}_m^i для каждой типовой и соответствующих ей семейств индивидуальных моделей (i - idem) выбираются так, чтобы каждый из них имел достаточно ясный "физический" смысл, характеризуя определенное свойство определенного элемента проточной части, и мог быть прямо или косвенно измерен и чтобы в совокупности своей они характеризовали достаточно полно для типовой функции f_m^i состояние ПЧ двигателя в целом. Предполагается существование детерминированных функций $\vec{a}_m^i = \varphi^i(\vec{a})$, устанавливающих модельные параметры состояния для различных типовых ММРП.

Векторы \vec{c}_m^i составляются из наиболее важных для практики эксплуатации СУ ВС компонент \vec{c} . Предполагается существование детерминированных функций $\vec{c}_m^i = \chi^i(\vec{c})$, устанавливающих модельные ПРП для различных типовых ММРП.

Можно полагать, что, в отличие от \vec{a} и \vec{c} , гипотетический вектор \vec{b} зависимости (2) имеет некоторое конечное число компонент r , так как практически стационарный РП авиадвигателя любого типа обладает конечным числом степеней свободы r_c ($O(r_c) = 10^1$), а не стационарные режимы его работы возникают вследствие реализации достаточно простых законов изменения во времени небольшого ($< r_c$) числа управляющих факторов, и наличие та

режимов может быть учтено увеличением размерности пространства режимных параметров на $r - r_c$. Совокупность компонент \bar{b} может быть различной, но должна быть необходимой и достаточной для однозначного задания любого допустимого в эксплуатации РП рассматриваемого типа с любым допустимым фиксированным состоянием ПЧ. Ее удобно представлять состоящей из непересекающихся множеств внешних и внутренних режимных параметров, образующих векторы соответственно \bar{b}_1 размерности r_1 и \bar{b}_2 размерности $r - r_1$ так, что пространство режимных параметров $L(\bar{b}) = L(\bar{b}_1) \oplus L(\bar{b}_2)$. Внешними являются r_{1c} параметров состояния атмосферного воздуха и топлива и функционирования сопряженных с двигателем объектов (потребляющих его энергию, обеспечивающих работу,...), а также $r_1 - r_{1c}$ характеристик законов изменения этих параметров во времени. Внутренними режимными являются $r_{2c} = r_c - r_{1c}$ параметров функционирования собственно двигателя и $r_2 - r_{2c}$ характеристик законов изменения их во времени (величина r_{2c} равна фактору автоматического управления двигателем).

Векторы \bar{b}_m^i модельных режимных параметров являются аналогами \bar{b} и имеют размерности $r_m^i \leq r$. Можно считать, что совокупность компонент каждого из них формируется из одного из возможных вариантов совокупности компонент \bar{b} , исходя из требования ее необходимости и достаточности для однозначного определения любого из модельных РП, описываемых соответствующими зависимостями (1). Следовательно, аналогично тому, как совокупность компонент \bar{b} может быть представлена состоящей из множеств внешних и внутренних режимных параметров, так и совокупность компонент каждого из \bar{b}_m^i может быть представлена состоящей из множеств внешних и внутренних модельных режимных параметров, образующих векторы соответственно \bar{b}_{1m}^i размерности $r_{1m}^i \leq r_1$ и \bar{b}_{2m}^i размерности $r_m^i - r_{1m}^i \leq r_2$. При этом $L(\bar{b}_m^i) = L(\bar{b}_{1m}^i) \oplus L(\bar{b}_{2m}^i)$, $L(\bar{b}_{1m}^i) \subseteq L(\bar{b}_1)$, $L(\bar{b}_{2m}^i) \subseteq L(\bar{b}_2)$. Можно полагать, что существуют детерминированные функции $\bar{b}_m^i = \bar{b}_{1m}^i + \bar{b}_{2m}^i = \psi^i(\bar{b})$, $\bar{b}_{1m}^i = \psi_1^i(\bar{b}_1)$, $\bar{b}_{2m}^i = \psi_2^i(\bar{b}_2)$, устанавливающие модельные режимные параметры для различных типовых ММРП.

Форма (1) индивидуальных ММРП АД предполагает, что на 1-м и 2-м этапах их формирования определяются последовательные приращения соответственно $\Delta \bar{a}_{mbj}^i$ и $\Delta \bar{a}_{mtj}^i$ к значениям \bar{a}_{m0}^i векторов модельных параметров состояния, отвечающим среднестатистическому двигателю. При этом типовые модели имеют вид

$$\bar{c}_{m0}^i = f_m^i(\bar{a}_{m0}^i, \bar{b}_m^i), \quad (3)$$

индивидуальные базовые -

$$\bar{c}_{mbj}^i = f_m^i(\bar{a}_{mbj}^i, \bar{b}_m^i), \quad (4)$$

индивидуальные текущие -

$$\bar{c}_{mtj}^i = f_m^i(\bar{a}_{mtj}^i, \bar{b}_m^i); \quad (5)$$

здесь $\bar{a}_{mtj}^i = \bar{a}_{mbj}^i + \Delta \bar{a}_{mtj}^i = \bar{a}_{m0}^i + \Delta \bar{a}_{mbj}^i + \Delta \bar{a}_{mtj}^i$.

Мерой адекватности моделей видов (3)-(5) являются ошибки модельных оценок значений \bar{c}_m^i : $\bar{\Delta}_{cm}^i = f_m^i(\bar{a}, \psi^i(\bar{b})) - \chi^i(f(\bar{a}, \bar{b}))$. Можно выделить 5 источников этих ошибок: несо-

вершенство типовых модельных функций f_m^i ; невозможность давать полные характеристики индивидуального состояния ПЧ двигателя значениями конечномерных векторов \bar{a}_m^i ; несовершенство применяемых методов параметрической идентификации моделей; погрешности данных, используемых в качестве основы идентификации моделей; невозможность давать полные характеристики режима работы двигателя значениями векторов \bar{b}_m^i . Степени адекватности моделей видов (3)-(5) могут быть существенно различными в различных областях пространства допустимых значений b .

Следует отметить наличие тесной связи между процедурой формирования индивидуальных текущих ММРП конкретных экземпляров АД, сводящейся к определению значений \bar{a}_{MTj}^i , и следующей за ней (рис.2) процедурой решения 1-й группы технических задач управления эксплуатацией парка авиационных СУ - задач диагностирования этих установок. Указанная связь обусловлена тем, что величины \bar{a}_{MTj}^i могут рассматриваться в качестве критериев состояния ПЧ двигателей и использоваться наряду с другими критериями состояния СУ ВС в алгоритмах распознавания их классов состояний.

Высокая потенциальная эффективность предлагаемого подхода к организации управления эксплуатацией парков однотипных СУ ВС вытекает из возможности учета при решении технических задач управления основных особенностей функциональных характеристик отдельных экземпляров, формирующихся первоначально во время производства авиадвигателей под воздействием типовых производственно-технологических факторов и изменяющихся во время эксплуатации авиадвигателей под воздействием типовых эксплуатационных факторов. При этом актуальность практической реализации подхода обусловлена не только его высокой потенциальной эффективностью, но и наличием предпосылок этого. Основными из предпосылок являются следующие:

1. Достижения теории тепловых двигателей и поддерживающих ее технических наук, в частности разделов газовой динамики, способных описывать течения рабочего тела в элементах ПЧ таких двигателей, теории горения.

2. Достижения численных методов решения систем нелинейных уравнений, задач оптимизации и краевых задач для систем дифференциальных уравнений, в том числе краевых задач газовой динамики.

3. Наличие быстродействующих ЭВМ с емкими машинными носителями информации, пригодных для объединения в сети ЭВМ и для включения в состав автоматизированных систем управления (АСУ) путем соединения с системами измерения параметров управляемых объектов.

Эти первые три предпосылки определяют возможность создания, включая реализацию на ЭВМ, достаточно быстродействующих математических моделей функционирования различных типов авиадвигателей в форме (1) и процедур их параметрической идентификации, обеспечивающих получение достаточно адекватных индивидуальных ММРП видов (3) и (4).

4. Достижения теории распознавания образов и ее технических приложений, определяющие возможность создания достаточно эффективных процедур диагностирования авиационных СУ.

5. Достижения теории теплообмена, механики деформируемого твердого тела и механики разрушения конструкционных материалов, определяющие возможность создания достаточно эффективных процедур косвенного контроля выработки ресурса деталей авиадвигателей.

6. Достижения динамики полета воздушных судов, определяющие возможность создания достаточно эффективных процедур оптимизации режимов их летной эксплуатации.

7. Наличие в составе систем производственного и эксплуатационного контроля современных авиационных СУ достаточно большого количества измерителей параметров их состояния и функционирования, обладающих достаточно высокими точностью и быстродействием, а также достаточно емких оперативных накопителей данных этих измерителей. Достижения измерительной техники, позволяющие усовершенствовать при необходимости системы контроля СУ ВС.

Указанные предпосылки представляют собой, по существу, научно-техническую основу реализации предлагаемого подхода к организации управления эксплуатацией авиационных СУ. Наиболее эффективной формой этой реализации являются, по-видимому, АСУ эксплуатацией парками однотипных СУ ВС, обеспечивающие объединение в рамках единой информационной технологии контуров управления состоянием и использованием установок.

Стаття надійшла до редакції 20 квітня 1998 року.

Петро Васильович Корольов (1951) закінчив Брянський інститут транспортного машинобудування в 1973 році. Кандидат технічних наук, старший науковий співробітник лабораторії експлуатаційної надійності авіаційних двигунів Київського міжнародного університету цивільної авіації. Автор понад 80 наукових праць в галузі математичного моделювання та експериментальних досліджень робочих процесів газотурбінних двигунів, а також в галузі створіння систем управління експлуатацією авіаційних силових установок.

Peter V. Korolyov (b.1951) graduated from Bryansk Institute of Transport Engineering (1973). PhD (Eng), senior research associate of aviation engines' maintenance reliability laboratory of Kyiv International University of Civil Aviation. Author of more than 80 scientific publications in the field of mathematical modeling and experimental research of working processes of gas turbine engines and in the field of creation of control systems for maintenance of aviation powerplants.