

© Кукушкин С.С., Потюпкин А.Ю., Галаев С.А.
Kukushkin S., Potjupkin A., Galaev S.

МЕТОДЫ РЕГУЛЯРИЗАЦИИ ЗАДАЧИ КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ СЕМАНТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

METHODS REGULARIZATION OF PROBLEMS OF THE CONTROL OF A CONDITION OF DIFFICULT TECHNICAL OBJECTS BY USE OF THE ADDITIONAL SEMANTIC INFORMATION

Аннотация. Предложена методика регуляризации задачи контроля технического состояния сложных технических объектов в нестандартных ситуациях путем привлечения дополнительной семантической информации.

Annotation. The technique regularization of problems of the control of a technical condition of difficult technical objects in supernumerary situations by attraction of the additional semantic information is offered.

Ключевые слова. Ракетно-космическая техника, бортовая информационно-телеметрическая система, задача контроля, контроль технического состояния, система контроля, нестандартная ситуация, регуляризация задачи контроля, программное обеспечение, семантическая информация, признаки контроля.

Key words. The space-rocket technics, onboard information-telemetry system, control problem, the control of a technical condition, the monitoring system, supernumerary situation, regularization control problems, the software, the semantic information, control signs.

Введение

Контроль технического состояния (ТС) является неотъемлемой частью процесса эксплуатации и испытаний сложных технических объектов (СТО) [1]. Особую актуальность это направление исследований приобретает в современных условиях в связи с большой изношенностью систем и агрегатов СТО.

Целью контроля является определение технического состояния объекта с заданными требованиями по достоверности и оперативности. Для этого формируется система контроля, в которой реализуются последовательно следующие этапы: определение множества ТС и контролируемых параметров, производство необходимых измерений, оценка контролируемых параметров, принятие решения о техническом состоянии объекта. При этом состав измеряемых и контролируемых параметров, требование по допускам, конкретные виды ТС,

другие особенности оговариваются в технической документации на объект. Ситуация, при которой по результатам контроля определяется вид ТС, который оговорен в эксплуатационно-технической документации (ЭТД), называется штатной, в противном случае, если текущее ТС не оговорено в ЭТД или же появляется неопределенность при принятии решения о виде ТС, то возникает нештатная ситуация (НШС). В этом случае система контроля по имеющемуся набору контролируемых параметров может определить не одно, а несколько состояний объекта или одно, не описанное в ЭТД. Такие ситуации требуют решения обратной некорректной задачи, где определяющее значение имеет требование однозначности определения причин по известным следствиям или требование корректности решения задачи. Анализ существующих систем контроля СТО показал, что они в настоящее время не удовлетворяют постоянно возрастаю-

Кукушкин Сергей Сергеевич – ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ Минобороны России, доктор технических наук, профессор, заслуженный изобретатель РФ, тел.+7(495) 515-19-82;

Потюпкин Александр Юрьевич – доктор технических наук, профессор, начальник кафедры Военной академии РВСН имени Петра Великого, тел. 8-495-698-44-18;

Галаев Сергей Алексеевич – адъюнкт кафедры Военной академии РВСН имени Петра Великого, тел. 8 (926) 546 27 47.

Kukushkin Sergey – the main scientific employee 4 Central Scientific Research Institute Ministry of Defence of Russia, doctor of the technical sciences, professor. Ph. +7(495) 515-19-82;

Potjupkin Aleksander – Dr. Sci. Tech., the senior lecturer, the chief of chair VA RVSN of a name Peter the Great, tel. 8-495-698-44-18;

Galaev Sergey – the senior scientist employee of chair VA RVSN of a name Peter the Great, tel. 8 (926) 546 27 47.

щим требованиям к качеству контроля и зачастую бес- сильны в нештатных ситуациях. При возникновении по- добного рода ситуаций задача определения ТС решается, как правило, на основе метода регуляризации, заключа- ющегося в привлечении дополнительной информации, то есть доопределения задачи путем учета тех или иных априорных сведений о свойствах искомого решения, что позволяет уменьшить или устранить исходную неопре- деленность и получить однозначное решение.

Нештатные ситуации являются существенным пре- пятствием на пути автоматизации процесса контроля. Известные методы контроля в настоящее время не по- зволяют обеспечить устойчивое решение задачи оцен- ки ТС при НШС и частично (или полностью) исключить специалиста-анализатора из процесса контроля. Поэтому разработка методического аппарата, позволяющего авто- матизировать процесс контроля и обеспечить устойчи- вость результатов даже при возникновении НШС, пред- ставляется крайне актуальной. Источники возникновения НШС, как правило, имеют различную природу, поэтому и меры, направленные на их устранение или смягчения не- гативных последствий, также должны иметь отличия.

На принятие решений также негативно сказыва- ются: недостаток измерительной информации, сбои и недостаточная отлаженность программного обеспе- чения, недоработки технической документации. Все они в той или иной мере связаны с ограниченностью ресур- сов – измерительных, программных, ограниченностью априорной статистики для выявления всех возможных отказов состояний и т.д. На практике задача регуляри- зации при возникновении НШС решается путем про- ведения дополнительных измерений и привлечением экспертов-специалистов. Все это в значительной мере снижает оперативность контроля.

В настоящей статье предлагается при возникно- вении НШС извлекать дополнительную информацию из уже полученных измерений (при условии их наличия) путем поиска скрытых закономерностей в их поведении и формирования дополнительных признаков контроля. При этом для оценок таких закономерностей перво- начально могут привлекаться и эксперты, которые на основе своего опыта выдвигают подходящие гипотезы. В дальнейшем по мере накопления опыта их функции передаются соответствующему программному обеспе- чению (ПО). Следует учесть, что в общем случае допол- нительные признаки контроля должны рассматриваться как качественные, выраженные на естественном языке. Поэтому для решения задачи автоматизации процесса анализа необходима разработка методов совместной об-

работки традиционной количественной (или синтакси- ческой) и качественной (семантической) информации.

Рассмотрим возможные различные подходы к решению обратной некорректной задачи (рис. 1). В качестве первого варианта может быть предложен переход в другое пространство признаков контроля. Отличи- тельная особенность второго подхода заключается в расширении пространства (добавление) признаков контроля. Общая цель вариантов – максимально «растя- нуть» друг от друга классы ТС A_i для однозначного опре- деления каждого из них.

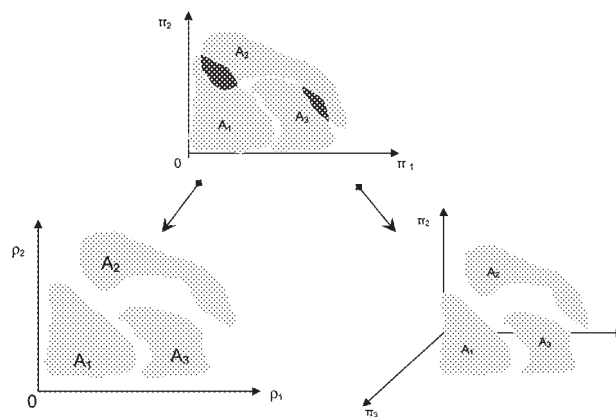


Рис. 1. Возможные подходы к решению обратной некорректной задачи

В обоих случаях возможно привлечение как ко- личественных, так и качественных признаков контроля. Так, например, ρ , π , (рис. 1) могут быть как количествен- ными, так и качественными признаками контроля.

Методы решения задачи контроля ТС в условиях неопределенности достаточно подробно описаны в ли- тературе. Например, метод контроля технического со- стояния летательных аппаратов с использованием не- четкой меры рассмотрен в работе [2]. Основой для его работы является наличие количественной измеритель- ной информации. Однако метод имеет ряд недостатков: не предусматривает привлечения дополнительной ин- формации, не позволяет учитывать качественную изме- рительную информацию, выраженную на естественном языке, а также неэффективен при нештатных ситуациях.

Известен способ регуляризации некорректной задачи, заключающийся в формировании насыщенно- го носителя информации об объекте контроля [2,3]. Суть формирования насыщенного носителя информации за- ключается в объединении всей имеющейся измеритель- ной информации об объекте (в том числе и дополни- тельной качественной) и приведения ее к единой шка- ле сравнения. При этом для формализации предложено использовать теорию нечетких множеств как основу, по-

зволюющую математически оперировать с качественной информацией, выраженной на естественном языке.

Рассмотрим возможности совместной обработки количественной и качественной информации при использовании аппарата теории нечетких множеств. Общая схема ее представлена на рис. 2. Там же схематически представлены и следующие пути решения задачи.

из существующих методов, получение конкретного четкого ТС и принятие решения.

На рис.1 пунктирными прямоугольниками также представлено основное отличие метода, который базируется на раздельной обработке четкой и нечеткой информации и формировании насыщенного носителя на этапе дефазсификации. Однако данный метод обладает низ-

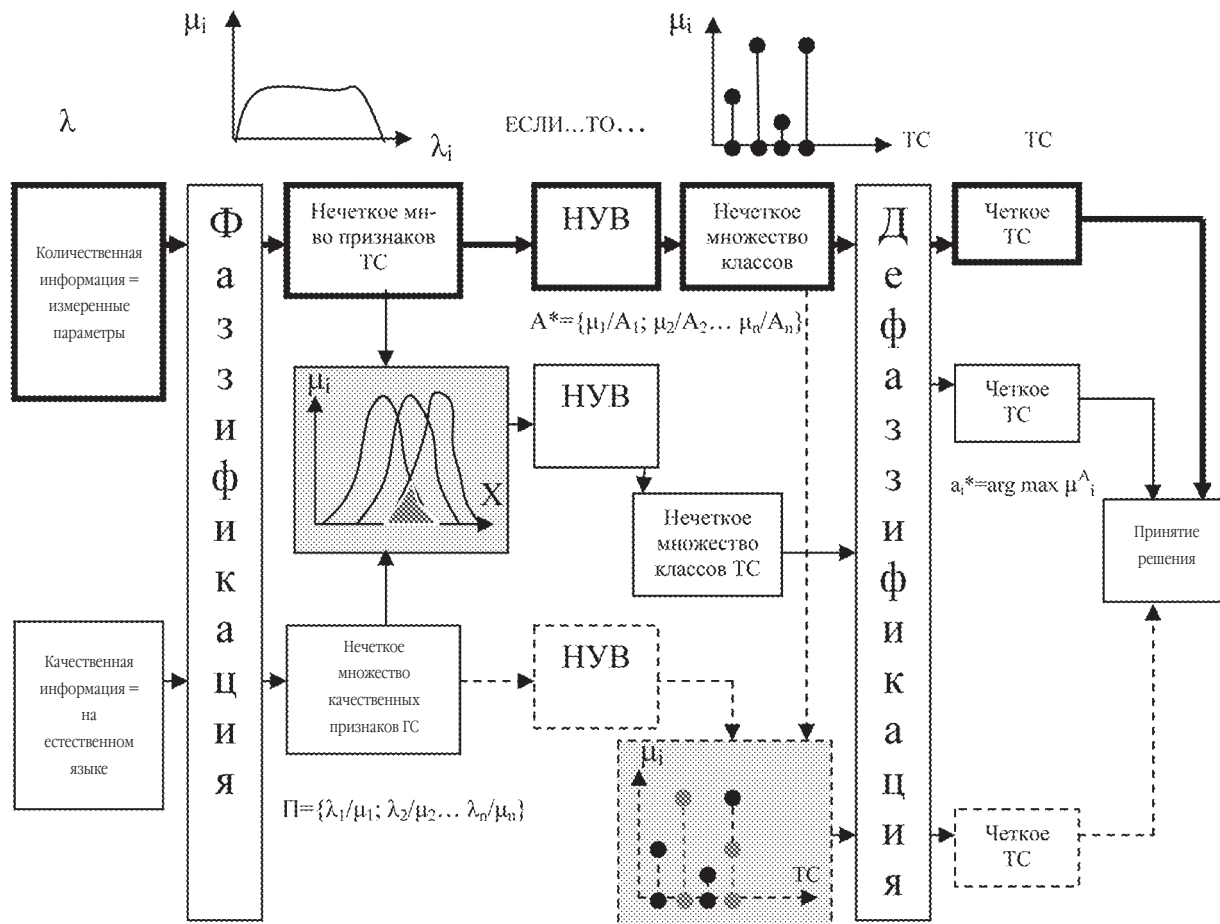


Рис. 2. Общая схема совместной обработки измерительной информации на количественном и качественном уровнях

Прежде всего, выделенными прямоугольниками показан метод решения задачи контроля ТС объектов с использованием нечеткой меры, рассмотренный в работе [1]. Далее, обычными прямоугольниками представлен метод, основанный на формировании обобщенного насыщенного носителя измерительной информации, включая качественную, на этапе фазсификации. Здесь насыщенный носитель представляет собой результирующее нечеткое множество признаков ТС, образованное в результате обработки количественной и качественной информации. В последующем осуществляется нечеткий условный вывод с помощью продукционных правил «ЕСЛИ...ТО...» и получение нечеткого множества классов ТС. Затем происходит процесс дефазсификации одним

кими показателями оперативности и поэтому в дальнейшем изложении не рассматривается.

Задача извлечения дополнительной количественной информации на основе предварительно полученной качественной предполагает разработку в общем случае методики уточнения качественной информации с помощью методов поиска скрытых закономерностей. Потенциальные резервы скрытых закономерностей огромны. В числе и нетрадиционное представление данных измерений образами-остатками [1], и расширение множества инвариантов, и формирование системы косвенных измерений. В рассматриваемом случае в качестве такого резерва предлагается рассмотреть косвенные измерения, на основе которых обеспечивается создание требуемой

избыточности среди контролируемых параметров. Одно из решений этой задачи предполагает необходимость привлечения дополнительных измерительных приборов. На сегодняшний день большие возможности для решения таких задач предоставляют различные среды измерительного программирования, позволяющие в программном виде с помощью графического языка оперативно разрабатывать необходимые дополнительные измерительные приборы.

Таким образом, получив дополнительную качественную информацию от эксперта, представив её в виде соответствующего нечёткого множества, уточнив её с помощью дополнительных измерительных приборов, разработанных в одной из сред измерительного графического программирования, и обработав результаты измерения, возможно определение нового ТС объекта.

Общая постановка задачи оценки ТС объектов контроля с использованием совместной обработки количественной и качественной информации может быть сформулирована следующим образом.

Дано:

1. Множество классов технических состояний объекта контроля A :

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\},$$

где a_i – i -й класс технического состояния объекта контроля.

2. Множество признаков контроля технических состояний:

$$\{P\} = \{P_{\text{колич}}\} + \{P_{\text{кач}}\};$$

где $P_{\text{колич}}$ – количественные признаки контроля;

$P_{\text{кач}}$ – качественные признаки контроля.

3. Множество измерительных параметров:

$$\{\lambda\} = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} + \xi,$$

где ξ – помехи, действующие на измерение параметров.

4. Соответствие между классами технических состояний и признаками контроля в виде совокупности диагностических признаков каждого класса технического состояния:

$$a_i = [\pi_{i1}, \pi_{i2}, \dots, \pi_{in}]^T,$$

где π_{im} – признаки i -го класса технического состояния, являющиеся в общем случае нелинейными функциями от наблюдаемых параметров:

$$\pi_i = f(\lambda).$$

5. Показатели качества и критерии в виде:

$$\Psi\{g_j\} \geq \Psi_{\text{треб}}\{g_j\},$$

где Ψ – некоторый функционал;

$\{g_j\}$ – показатели качества решения задачи анализа.

Требуется: по результатам проведенных измерений выходных параметров $\lambda(t)$ и привлеченной допол-

нительной качественной измерительной информации определить в соответствии с заданным критерием к какому из классов технических состояний a_i относится текущее техническое состояние объекта контроля.

В качестве показателей качества решения задачи определения технического состояния объекта примем *оперативность* и *достоверность*. Тогда критерий решения задачи контроля может быть сформулирован следующим образом: решение задачи контроля должно обеспечивать достоверность и оперативность не хуже заданных значений.

Решение задачи. Задача контроля в общем случае предполагает определение вида ТС объекта контроля. Контроль выходных параметров осуществляется с целью отнесения наблюдаемого текущего состояния объекта контроля (число которых может быть бесконечным) к одному из конечного числа априорно заданных классов ТС. Оно может быть выполнено либо однозначно в случае идеальной измерительной системы, или с определенной достоверностью, что имеет место на практике.

Процесс определения ТС СТО можно представить в виде алгоритма (рис. 3), включающего следующие этапы: формализацию априорной информации об объекте контроля, включающую задание классов ТС, выбор словаря признаков контроля, описание классов ТС на языке словаря признаков контроля, разработку правил принятия решения; получение контрольно-диагностической информации, включающее измерение параметров состояния и проведение первичной и вторичной обработки в целях получения оценок признаков контроля; применение алгоритма принятия решения о ТС объекта контроля.

Формализация априорной информации, прежде всего, включает в себя такую процедуру, как определение множества ТС объекта контроля, зависящее от целей контроля и объёма знаний об объекте. Совокупность классов состояний образует алфавит классов:

$$A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}.$$

Формирование алфавита классов ТС объекта контроля имеет целью обеспечение наблюдаемости всех возможных состояний объекта, включая как состояния исправности (работоспособности, правильного функционирования), так и возможных отказов. Данная задача решается на основе глубокого изучения физической природы процессов, наблюдаемых посредством измерительного комплекса, и тщательного статистического анализа причин отказов при условии указания степени детализации и при применении адаптивной процедуры распознавания, предполагающей разбиение всей совокупности ТС на классы.

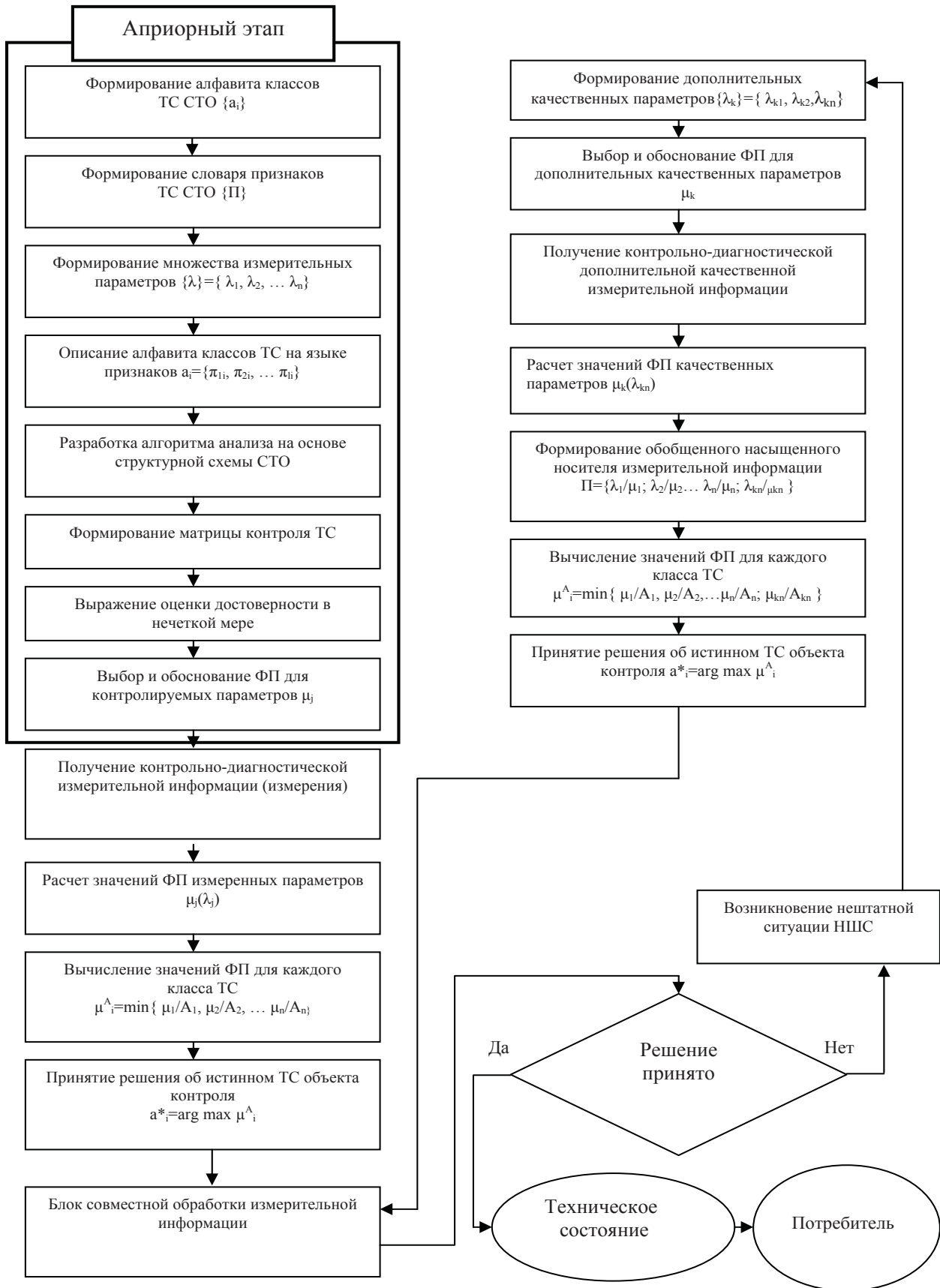


Рис. 3. Алгоритм определения технического состояния СТО

Характеристики исследуемого сигнала, содержащие информацию о техническом состоянии объекта, принято называть диагностическими признаками π_i , а их совокупность – словарем диагностических признаков (СПД):

$$П = \{\pi_i\}, i = 1, l.$$

Целью выбора оптимального СПД является поиск наименьшей совокупности диагностических признаков, обеспечивающей надёжное распознавание наибольшего числа классов состояний и наиболее простую аппаратную реализацию алгоритма распознавания.

Описание алфавита классов на языке словаря диагностических признаков составляет основу постановки задачи обучения системы диагностирования. Основная ее цель состоит в создании эталонных образов для всех классов состояний. В процессе диагностирования апостериорный образ технического состояния сравнивается с эталонными образами.

В качестве исходных данных для составления алгоритма необходимо использовать функциональную схему анализируемой системы. За основу алгоритма предлагается использовать модифицированный метод «деревьев» поиска состояний, так как в этом случае предоставляется возможность остановить пошаговый анализ при достижении определённой совокупности признаков, соответствующей конкретному техническому состоянию. Результат анализа технического состояния с использованием алгоритма "деревьев" поиска состояний можно интерпретировать как событие $\{A_i\}$, заключающееся в отождествлении текущего состояния системы контролируемого СТО к конкретному виду ТС a_i . При этом имеется в виду, что событие $\{A_i\}$ появляется тогда и только тогда, когда происходят k событий, которые являются результатами операций последовательного анализа с использованием соответствующей "ветви" алгоритма:

$$\{a_i^*\} = \{ \{\lambda_1 \leq |\lambda_{i1}|\} \cap \{\lambda_2 \leq |\lambda_{i2}|\} \cap \dots \cap \{\lambda_j > |\lambda_{ij}|\} \},$$

где $\{\lambda_i \leq |\lambda_{ij}|\}$ - событие, заключающееся в том, что значение параметра λ_i в "норме"; $\{\lambda_i > |\lambda_{ij}|\}$ - событие, заключающееся в том, что значение параметра λ_i не в "норме".

Для того чтобы записать определённую выше последовательность сравнений при анализе в удобном для вычислений виде необходимо составить матрицу контроля. В данном случае используется механизм метода анализа ТС систем на основе матриц состояний.

В настоящее время известно достаточно много рекомендаций, позволяющих осуществить выбор приемлемого для практики варианта. Например, вид функции принадлежности выбирается по результатам обработки заключений экспертов – специалистов в данной обла-

сти. При этом увеличение объема информации о решаемой задаче позволяет уменьшить степень субъективизма и предложить ряд рекомендаций по выбору функций принадлежности.

Следующим этапом является получение контрольно-диагностической измерительной информации, основанной на измерениях.

На основе выбранного вида и параметров функций принадлежности и полученных оценок измеренных параметров производится расчет значений функций принадлежности.

Значения функций принадлежности для каждого класса ТС определяются выражением

$$\mu_i^A\{A_i\} = \min[\max(\mu_1\{\lambda_1 \leq |\lambda_{i1}|\}; \mu_1'\{\lambda_1 > |\lambda_{i1}|\}), \max(\mu_2\{\lambda_2 \leq |\lambda_{i2}|\}; \mu_2'\{\lambda_2 > |\lambda_{i2}|\}), \dots, \max(\mu_j\{\lambda_j \leq |\lambda_{ij}|\}; \mu_j'\{\lambda_j > |\lambda_{ij}|\})].$$

В результате вычислений получим значения функций принадлежности всех классов технических состояний $\mu_i^A\{A_i\}$, характеризующие степень истинности высказывания "текущее ТС СТО относится к a_i классу ТС".

Окончательное решение формируется в виде

$$a_i^* = \arg \max \mu_i^A.$$

В дальнейшем, если решение о техническом состоянии принято не будет, происходит формирование дополнительных качественных параметров в следующем виде:

$$\{\lambda_k\} = \{\lambda_{k1}, \lambda_{k2}, \dots, \lambda_{kn}\}.$$

Затем производится выбор и обоснование функций принадлежности, которые наилучшим образом подходят для наблюдаемого случая. Следующая операция связана с получением дополнительной качественной контрольно-диагностической измерительной информации. Потом производится расчет значений ФП качественных параметров μ_k и формирование обобщенного насыщенного носителя измерительной информации, представляющего собой нечеткое множество, включающее как количественные, так и качественные признаки контроля

$$П = \{\lambda_1/\mu_1; \lambda_2/\mu_2; \dots; \lambda_n/\mu_n; \lambda_{kn}/\mu_{kn}\}.$$

Последующее продолжение контроля состоит в том, что в блоке совместной обработки осуществляется совместная обработка всей имеющейся измерительной информации и принимается решение о текущем ТС объекта в соответствии со следующим правилом:

$$\mu_i^A\{A_i\} = \min[\max(\mu_1\{\lambda_1 \leq |\lambda_{i1}|\}; \mu_1'\{\lambda_1 > |\lambda_{i1}|\}), \max(\mu_2\{\lambda_2 \leq |\lambda_{i2}|\}; \mu_2'\{\lambda_2 > |\lambda_{i2}|\}), \dots, \max(\mu_j\{\lambda_j \leq |\lambda_{ij}|\}; \mu_j'\{\lambda_j > |\lambda_{ij}|\}), \dots, \max(\mu_k\{\lambda_k \leq |\lambda_{ik}|\}; \mu_k'\{\lambda_k > |\lambda_{ik}|\})],$$

где $\{\lambda_k \leq |\lambda_{ik}|\}$ – событие, заключающееся в том, что значение качественного параметра λ_k находится в "норме", в

то время, как $\{\lambda_k > |\lambda_{k_0}|\}$ – это событие, состоящее в том, что значение параметра λ_k не отвечает этому требованию (находится не в "норме").

В результате вычислений получают значения функций принадлежности всех классов технических состояний $\mu_i^A\{A_j\}$ в том числе и вновь идентифицированного. Это позволяет подтвердить степень истинности следующего высказывания: "текущее ТС СТО относится к a_1 классу".

Заключение

В статье проведен анализ методов решения обратных задач анализа ТС при возникновении НШС и предложен конкретный метод их регуляризации. Его суть заключается в привлечении дополнительной информации, повышающей уровень доопределения некорректной за-

дачи путем учета тех или иных априорных сведений о свойствах искомого решения, что позволяет уменьшить или устранить исходную неопределенность и получить решение, заслуживающее большего доверия. На основе метода разработан алгоритм определения ТС СТО при возникновении НШС, позволяющий обеспечить устойчивое решение задачи оценки ТС при НШС и частично (или полностью) исключить специалиста-анализатора из процесса контроля.

Предлагаемый метод регуляризации некорректных задач мониторинга ТС не только дополняет другие известные методы, но и способствует их объединению в единый комплекс научно-методического обеспечения контроля сложных процессов по данным разнотипных измерений. Это позволит перейти к разработке новых интеллектуальных технологий мониторинга ТС СТО.

Литература

1. Кукушкин С.С., Гладков И.А., Чаплинский В.С. Методы и информационные технологии контроля состояния динамических систем. – М.: МО РФ, 2008. - 325с.
2. Хиль С.Ш., Потюткин А.Ю. Метод решения задачи контроля технического состояния летательных аппаратов с использованием нечеткой меры. – М.: Измерительная техника, №12, 2002г.
3. Чечкин А.В. Синергетический подход к интеллектуальным системам.// Математические методы решения инженерных задач: Науч. – тех. материалы/ Под ред. В.В. Блаженкова, А.В.Чечкина. – М.: МО РФ, 1999.
4. В. В. Васильев, А.Ю. Потюткин Особенности оценивания состояния сложных систем. – М.: МО, 2004.
5. В.И. Мороз, Е.К. Ромашенко, А.Ю. Потюткин Решение задач математической обработки результатов телеизмерений. – МО РФ, 2001.
6. Потюткин А.Ю. Научно – методические основы решения задач анализа состояния объектов РКТ в условиях неопределенности. – М.: ВА РВСН им. Петра Великого, 2003г.

Материал поступил в редакцию 26. 06. 2010 г.