

шує завдання λ -методом Полларда так, як ніби розв'язання задачі дискретного логарифму лежить на i -му відрізку. Коли розв'язок знайдено одним з обчислювальних вузлів, інші свою роботу зупиняють. Результати обчислень представлені в табл. 3.

Таблиця 3. Залежність середнього прискорення паралельних обчислень від кількості обчислювальних вузлів r

Кількість обчислювальних вузлів r	1	2	3	4
Середнє прискорення обчислень	1	1,06	1,15	1,21

ВИСНОВКИ

Використання паралельних обчислень у криптоаналізі для прискорення методів ρ - і λ -Полларда знижує час виконання розрахунків. Але розглянуті методи розпаралелювання не дозволяють отримати значного прискорення обчислень, і не збільшують небезпеку злому при прийнятних величинах порядку базової точки. Надалі планується модернізація системи для дослідження інших методів розв'язання задачі дискретного логарифмування і порівняльного аналізу їх практичної складності обчислення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Молдовян, Н. А. Введение в криптосистемы с открытым ключом [Текст] / Н. А. Молдовян, А. А. Молдовян // С. Пб. : BHV, 2005. – 288 с.
2. Василенко, О. Н. Теоретико-числовые алгоритмы в криптографии [Текст] / О. Н. Василенко. – М. : МЦНМО, 2003. – 328 с.
3. Андрущенко, Д. М. Практическая оценка стойкости асимметричных криптосистем [Текст] / Д. М. Андрущенко, Г. Л. Козина, Д. М. Пиза // Проблемы информационной безопасности. – 2008. – № 1. – С. 57–62.
4. Сمارт, Н. Криптография [Текст] / Н. Смарт. – М. : Техносфера, 2005. – 528 с.
5. Андрущенко, Д. М. О распараллеливании методов Полларда решения задачи дискретного логарифмирования [Текст] / Д. М. Андрущенко, Г. Л. Козина // VII Всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів та молодих вчених «Теоретичні і прикладні проблеми фізики, математики та інформатики»: збірка тез доповідей учасників. Частина 1. – К., 2009. – С. 10–11.

Стаття надійшла до редакції 18.05.2011.

Андрущенко Д. М., Варава М. Ю., Неласая А. В.

РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЕ ρ - И λ -МЕТОДОВ ПОЛЛАРДА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДИСКРЕТНОГО ЛОГАРИФМИРОВАНИЯ.

Проведен анализ эффективности распараллеливания ρ - и λ -методов Полларда при решении задачи дискретного логарифмирования. Приводится теоретическая оценка времени выполнения задачи на параллельной системе. Проведено сравнение результатов практических и теоретических расчетов. Сделаны замеры времени выполнения распараллеленных методов.

Ключевые слова: методы Полларда, дискретный логарифм, распараллеливание, сложность криптоалгоритма, оценка сложности.

Andrushchenko D. M., Varava M. U., Nelasa G. V.

PARALLELIZATION OF ρ - AND λ - POLLARD'S METHODS FOR SOLVING THE DISCRETE LOGARITHM

The parallelization efficiency of ρ - and λ -methods of Pollard in solving the discrete logarithm is analyzed. The theoretical estimate of the time of the task on a parallel system is given. Comparison of the practical and theoretical calculations carried out. Timing performance threaded methods are made.

Key words: methods of Pollard's, discrete logarithm, paralleling, the complexity of the cryptographic algorithm, estimation of complexity.

УДК:681.5

Кулик А. С.¹, Лученко О. О.², Фирсов С. Н.³

¹Д-р техн. наук, заведующий кафедрой Национального аэрокосмического университета им. М. Е. Жуковского «ХАИ»

²Генеральный директор-Главный конструктор Харитон-Планта,

³Канд. техн. наук, доцент Национального аэрокосмического университета им. М. Е. Жуковского «ХАИ»

КОНЦЕПЦИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЖИВУЧЕСТИ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИЕЙ И СТАБИЛИЗАЦИЕЙ

Сформулированы основные положения обеспечения живучести спутниковых систем ориентации и стабилизации, базирующиеся на принципе самоорганизации посредством глубокого диагностирования аварийного функционального состояния и гибкого восстановления работоспособности объекта.

Ключевые слова: живучесть, диагностирование, нештатная ситуация, самоорганизация.

ВВЕДЕНИЕ

Расширение круга функциональных задач, решаемых современными космическими аппаратами, и увеличе-

ние сроков их активного существования возможно путем обеспечения эффективного и качественного функционирования их бортовых систем как в номинальных

условиях работы, так и при возникновении разнообразных нештатных ситуаций. Обеспечить выполнение целевых функций космического аппарата при возникновении неопределенных нештатных ситуаций возможно путем обеспечения живучести бортовых систем спутника, к которым относится система управления ориентацией и стабилизацией спутника (СУОСС).

В научной литературе традиционно процесс обеспечения живучести СУОСС связывается с повышением надежности работы бортовых систем спутника (безотказностью). Такой подход оправдывает себя, если при рассмотрении СУОСС исключается из рассмотрения сам объект управления, а рассматриваются только информационно-преобразовательные элементы, что само по себе является некорректным, так как объект управления (спутник) представляет собой неотъемлемый элемент контура управления. Понятие живучести значительно шире понятия надежности, так как предусматривает работу СУОСС при наличии нештатных ситуаций, вызванных как внутренними, так и внешними аномальными явлениями. Кроме того, выдвигая предположение о неопределенности отказа и его характеристик, представляющее собой самую «жесткую» гипотезу среди известных, модели и методы, применяемые в теории надежности, становятся не применимы для обеспечения живучести СУОСС, что требует разработки концептуально нового подхода к обеспечению живучести СУОСС.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Из анализа проблемы обеспечения требуемого времени активного существования спутника на орбите следует, что предпочтительным вариантом для ее решения является подход, связанный с обеспечением живучести СУОСС. СУОСС, обладающие свойством живучести, – это класс адаптивных систем управления с развитыми функциями диагностирования и парирования нештатных ситуаций. Развитая функция диагностирования заключается в глубоком выявлении функциональных причинно-следственных связей возникновения нештатной ситуации с заданной глубиной, другими словами, в поиске устранимых причин отказа СУОСС. В свою очередь развитая функция парирования заключается в гибком управлении избыточными ресурсами, обеспечивающими предотвращение дальнейшего развития нештатной ситуации или такую компенсацию ее последствий, что восстанавливаются измененные или утраченные функциональные свойства системы.

Для решения задач диагностирования и парирования нештатных ситуаций на каждом этапе жизненного цикла СУОСС необходимо формировать множество избыточных ресурсов, обеспечивающих покрытие множества диагностируемых устранимых и неустранимых причин отказов, а также разработать гибкие процедуры диагностирования причин отказа и использования ресурсов для парирования причин отказов, вызвавших нештатную ситуацию.

РАЗРАБОТКА РАЗВИТОЙ ФУНКЦИИ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СУОСС

Способность СУОСС со свойствами живучести самоорганизовываться в нештатных ситуациях базируется на получении достоверной информации о причинах, т. е. на диагнозе. Для получения адекватного диагноза нештатной ситуации требуется разработка «Комплекса взаимосвязанных правил, методов, алгоритмов и средств, необходимых для осуществления диагностирования на всех этапах жизненного цикла объекта» [1], другими словами, диагностического обеспечения. Разработка диагностического обеспечения базируется на формализованном представлении объекта диагностирования, отражающем связь причины нештатной ситуации с ее доступными наблюдениям и измерениям последствиями. Поэтому качество диагностического обеспечения существенно зависит от используемых диагностических моделей. Традиционно в практике разработки и эксплуатации спутниковых систем используют диагностические модели в графической и табличной формах, отражающих только качественную связь между причиной отказа и ее доступным измерению следствием [2–4]. Для количественного отражения причинно-следственных связей предложен новый класс диагностических моделей: диагностические функциональные модели (ДФМ) [5], позволившие формировать принципиально новое диагностическое обеспечение, обладающее следующими характерными особенностями.

Использование ДФМ, отражающих влияние признаков отказа на качество функционирования объекта диагностирования, позволяет описывать нештатные ситуации как в переходных, так и в установившихся режимах функционирования, т. е. в динамических, что позволяет получить существенно большие объемы качественной диагностической информации. ДФМ позволяют отразить изменения качества функционирования, в котором и оценивается техническое состояние объекта диагностирования и выполняемое им функциональное назначение. Применение ДФМ позволяет существенно увеличить глубину диагностирования до устранимой причины отказа с помощью более эффективных избыточных ресурсов. А именно, до конкретного физического вида отказа, что не позволяют сделать известные в теории и используемые на практике диагностические модели. Внедрение диагностического обеспечения на основе ДФМ позволяет найти и сформировать целесообразный с точки зрения современных подходов компромисс (баланс) между эффективностями диагностического и реабилитационного обеспечения спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией, что способствует существенному продлению сроков активного функционирования спутниковых систем.

Диагностическое обеспечение разрабатывается для трехуровневой иерархии (рис. 1). Первый нижний уровень – блоковый. Здесь формируется диагностическое обеспечение (ДО) для блоков датчиков (ДОБД), приводов (ДОБП), вычислителей (ДОБВ) не автономно, а исходя из условий их функционирования в замкнутом контуре.

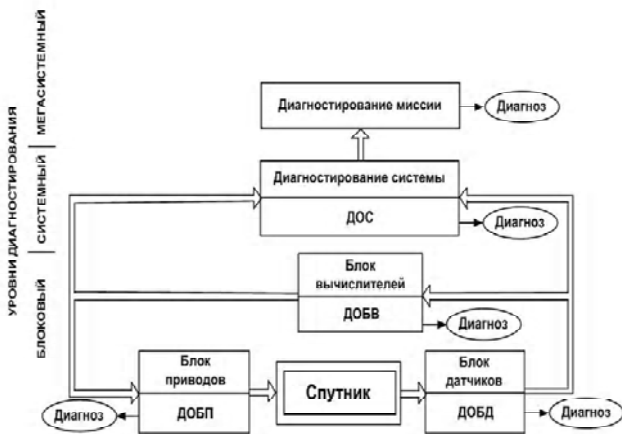


Рис. 1. Функциональная схема иерархического диагностического обеспечения

Второй уровень – системный. Диагностическое обеспечение разрабатывается для всей замкнутой системы управления ориентацией и стабилизацией. Диагностируется выполнение системой ее функций в условиях космического полета. Третий уровень иерархии – мегасистемный. На этом уровне формируется диагностическое обеспечение выполнения космической миссии в целом.

На каждом уровне иерархии при разработке ДО формируются свои специфические для этого уровня подмножества возможных нештатных ситуаций, исходя из целей и задач проекта, опыта разработки, производства и эксплуатации подобных проектов, качества используемых приборов и других факторов, влияющих на качество выполнения космической миссии.

Назначение ДО: оперативная оценка качества функционирования объектов диагностирования в реальном масштабе времени. Качество функционирования объектов диагностирования: блоков, системы в целом, спутника + наземный комплекс сопровождения и управления полетом – определяется требованиями технического задания. На каждом уровне иерархии задача ДО сформировать оперативный диагноз адекватный возникшей нештатной ситуации для последующего эффективного ее парирования с целью обеспечения выполнения поставленных задач каждого этапа жизненного цикла спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией.

Диагностическое обеспечение формируется с использованием трех типов диагностических функциональных моделей: ДФМ для обнаружения отказов, ДФМ для поиска места отказа, ДФМ для определения класса отказа. Эти диагностические модели разрабатываются для решения таких связанных задач диагностирования: обнаружения отказов, поиск места отказа, определение отказа. Последовательное решение таких задач позволяет реализовать принцип последовательного снятия неопределенности. Для каждой задачи формируются множество прямых признаков отказа и множество косвенных. Далее с использованием математических моделей номинального режима функционирования объекта диагностирования строятся математические конструкции,

отражающие связь прямых признаков отказа с косвенными в форме ДФМ. Для ДФМ принципиальным является отражение в полученной структуре имеющихся связей между признаками, а также возможность по доступным измерениям косвенным признакам оценить факт или величину косвенного признака. Для выявления таких свойств ДФМ используются специально разработанные критерии диагностируемости. Структурные свойства ДФМ оцениваются с помощью критериев структурной диагностируемости, а сигнальные свойства ДФМ – с помощью критериев сигнальной диагностируемости. Полная структурная и сигнальная диагностируемость ДФМ гарантирует возможность с помощью этих диагностических моделей получить однозначную информацию для формирования диагноза.

При разработке алгоритмических средств глубокого диагностирования применяются диагностические логические модели (ДЛМ), отражающие бинарную качественную связь между прямыми и косвенными диагностическими признаками объекта. ДЛМ строятся на основании ДФМ с использованием предикатных уравнений по определенным правилам. Применение ДЛМ позволяет ставить и решать задачи минимизации количества косвенных признаков по различным технико-экономическим критериям. Полученные в результате минимизации ДЛМ в табличной форме позволяют перейти к структурам предикатных баз знаний в форме дихотомических деревьев, в узлах которых находятся двузначные предикатные функции, полученные из соответствующих фрагменту дерева ДФМ. Такое дихотомическое дерево с предикатными функциями от дискретных значений косвенных признаков отказов в узлах представляет собой алгоритмическое обеспечение процесса получения полного диагноза функционального состояния объекта диагностирования. Укрупненно получение полного диагноза можно представить с помощью функциональной схемы, отражающей совокупность описанных средств диагностического обеспечения (рис. 2).

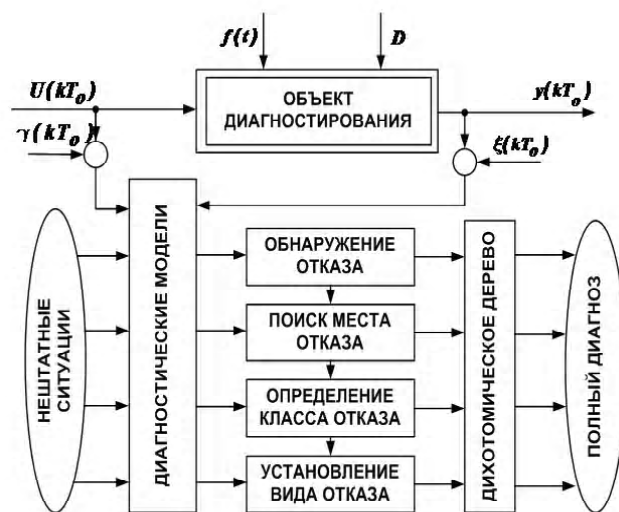


Рис. 2. Функциональная схема средств диагностического обеспечения

РАЗРАБОТКА РАЗВИТОЙ ФУНКЦИИ ПАРИРОВАНИЯ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ СУОСС

Адаптация СУОСС базируется как на получении полного диагноза о функциональном состоянии, вызвавшем нештатную ситуацию, так и на гибком использовании избыточных ресурсов, позволяющих нейтрализовать последствия выявленного вида отказа. Таким образом, для качественного парирования нештатных ситуаций требуется: полный диагноз функционального состояния объекта диагностирования (блока, системы, миссии), отражающий время появления отказа, его места, класса отказа и конкретный физический вид его проявления; наличие избыточных ресурсов, покрывающих множество устранимых видов отказов; процедуры выбора избыточного ресурса, учитывающие предыдущие нештатные ситуации, исходя из текущей ситуации и задач миссии; процедуры эффективного восстановления работоспособности отказавшего объекта диагностирования; средство диагностирования восстановленного объекта диагностирования.

Перспективным подходом к парированию нештатных ситуаций представляется подход с использованием принципа адаптации к особенностям СУОСС, возможным нештатным ситуациям и задачам космической миссии. Особенности такого подхода заключаются в следующем. Парирование нештатных ситуаций производится после обстоятельного, глубокого и качественного диагностирования функционального состояния объектов диагностирования. Другими словами, требуется диагностировать качество выполнения объектом его функционального назначения в режиме выполнения функциональных задач по ориентации и стабилизации спутников. Тестовые режимы диагностирования наиболее распространены в практике диагностирования. В тестовых режимах входные воздействия на объект – это заранее сформированные воздействия, не в полной мере отражающие как характер, так и диагнозы рабочих воздействий. Это обстоятельство приводит к тому, что результаты диагностирования в тестовом режиме, т. е. диагноз, в большей степени отражает способность объекта преобразовывать тестовое воздействие, а не его способность функционировать в замкнутом контуре по выполнению задачи ориентации и стабилизации спутника. Тестовые режимы не позволяют в полной мере учесть влияние связей между блоками, возмущающих воздействий как на связи, так и на блоки, отказы других блоков и подсистем и многое другое, не попадающее в сферу тестового диагностирования и приводящее к частичному, неполному диагнозу.

Вторым необходимым атрибутом качественного парирования нештатных ситуаций в спутниковых системах ориентации и стабилизации является наличие средств восстановления работоспособности. Парирование осуществляется посредством выбора избыточных средств, в наибольшей степени соответствующих сложившейся ситуации в космической миссии, а затем посредством процедур восстановления работоспособности отказав-

шего объекта. Окончательная (завершающая) стадия парирования осуществляется посредством восстановления работоспособности блоков на блоковом уровне, системы в целом на системном уровне, всей миссии на мега-системном уровне. Средства восстановления работоспособности – это различные виды избыточности: функциональной, временной, сигнальной, параметрической, алгоритмической, аппаратной и ряд других. Формирование обоснованного множества избыточных средств – это новая научно-техническая задача. При постановке этой задачи нужно установить связи (установить баланс) между глубиной диагностирования – до устранимого (парируемого) вида отказа – и избыточными ресурсами парирования. Между множеством парируемых видов отказов V и множеством ресурсов парирования R в результате такого исследования должно быть установлено соответствие

$$P : V \rightarrow R . \quad (1)$$

Парирование любого вида отказа из множества возможных – это не тривиальная процедура замены отказавшего фрагмента исправным, а достаточно сложное динамическое восстановление углового положения спутника относительно его центра масс в соответствии с полетным заданием. Каждый вид отказа необходимо рассматривать как специфическое возмущающее воздействие на спутниковую систему ориентации и стабилизации, приводящее к нарушению как требуемых режимов углового состояния спутника, так и технического состояния его системы управления угловым положением. В связи с этим обстоятельством парирование нештатной ситуации, вызванное выявленным в процессе диагностирования конкретным видом отказа, должно производиться в следующей последовательности: вначале выбирается средство для реабилитации ухудшенного технического состояния отказавшего фрагмента, затем с помощью выбранного средства производится восстановление технического состояния, а следовательно, и работоспособности аварийного фрагмента системы. После восстановления работоспособности требуется с помощью соответствующих процедур подстройки восстановить функциональное состояние системы управления до требуемых в данный момент времени характеристик и показателей. Таким образом, ресурсы парирования каждой конкретной нештатной ситуации, вызванной соответствующим конкретным видом отказа, включает: средства реабилитации технического состояния места отказа; процедуры реабилитации; средства компенсации возмущенного углового движения спутника, вызванное видом отказа; процедуры восстановления требуемого, соответствующего полетному заданию функционального состояния спутниковой системы управления угловым положением.

Блоковый уровень включает: блок датчиков, блок приводов и блок вычислителей. На рис. 3 представлена структурная проблема гибкого парирования видов отказов в аварийных блоках. Исходным для разрешения про-

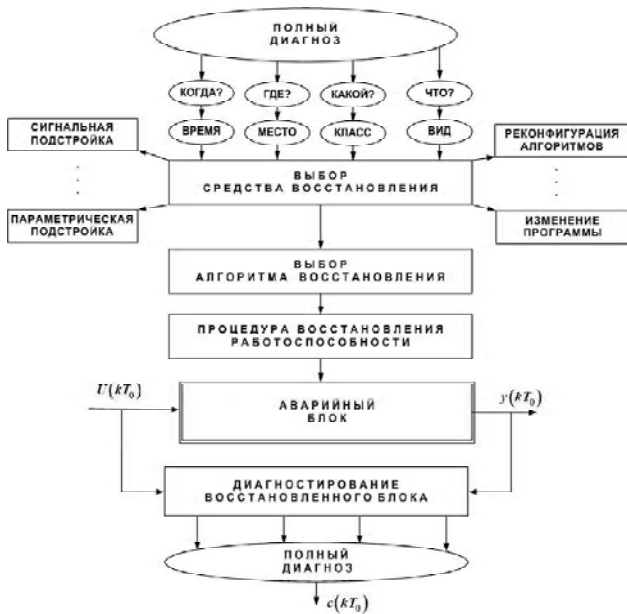


Рис. 3. Структуризация проблемы гибкого парирования видов отказов

блемы есть результат диагностирования функционального состояния блока – полный диагноз. На основании этой информации ставится задача формирования множества ресурсов R парирования множества V – видов отказов конкретного блока. В зависимости от конструкции блока, принципа его действия, множества V подбираются избыточные ресурсы – средства восстановления от различных возможных подстроек до приемлемых средств реконфигурации. Выбор средств восстановления производится на основании предыстории функционирования системы управления, текущего вида отказа, оставшихся избыточных ресурсов и предстоящих задач космической миссии. Выбранное средство восстановления нужно ввести в действие и для этого требуется определенная последовательность действий – алгоритм, который выбирается из множества возможных для текущей ситуации. Затем алгоритм восстановления вводится в действие с помощью соответствующей процедуры, обеспечивающей восстановление работоспособности аварийного блока в пределах (условиях) допустимых полетным заданиям.

После восстановления аварийного блока производится диагностирование его функционального состояния. При этом возможны два исхода. Первый – восстановлена полностью работоспособность блока и его можно использовать в системе управления по назначению. Второй – работоспособность блока не восстановлена и выявлен другой вид отказа, поэтому для парирования этого вида отказа требуется повторить описанный ранее цикл до полного восстановления функциональных свойств аварийного блока. После полного восстановления аварийного блока передается сигнал $c(kT_0)$ на системный уровень, на котором производится парирование системных последствий отказов в блоках с целью последующего выполнения полетного задания.

Отказы в блоках приводят к тому, что спутниковая система управления ориентацией и стабилизацией отклоняется от выполнения своих штатных функций, приводящих к существенному изменению углового положения спутника относительно центра масс по сравнению с заданным программным. Поэтому после выполнения процедур гибкого парирования видов отказов в аварийных блоках системы по сигналам $c(kT_0)$ требуется восстановить программное угловое положение спутника. Причиной нештатных ситуаций на системном уровне являются отказы в межблоковых линиях связи, а также отказы в самой конструкции спутника и существенные внешние возмущающие воздействия. На рис. 4 представлена функциональная схема средств гибкого парирования нештатных ситуаций на системном уровне.

Глубокое диагностирование качества функционирования замкнутой спутниковой системы управления позволяет получить информацию о времени появления отказа, его месте, классе и конкретном физическом проявлении. Анализ возможных системных нештатных ситуаций позволяет сформировать множество видов отказов V системного уровня. Множество избыточных ресурсов для этого уровня R формируется, исходя из необходимости парировать последствия видов отказов множества V . Выбор средств восстановления работоспособности спутниковой системы управления должен производиться с учетом предыдущих системных нештатных ситуаций, оставшихся избыточных ресурсов парирования и предстоящих задач космической миссии.

Выбор средств восстановления работоспособности влечет за собой необходимость выбора алгоритмических средств, т.е. структуры и параметров формализованного действия по парированию текущей нештатной ситуации. После восстановления работоспособности сис-

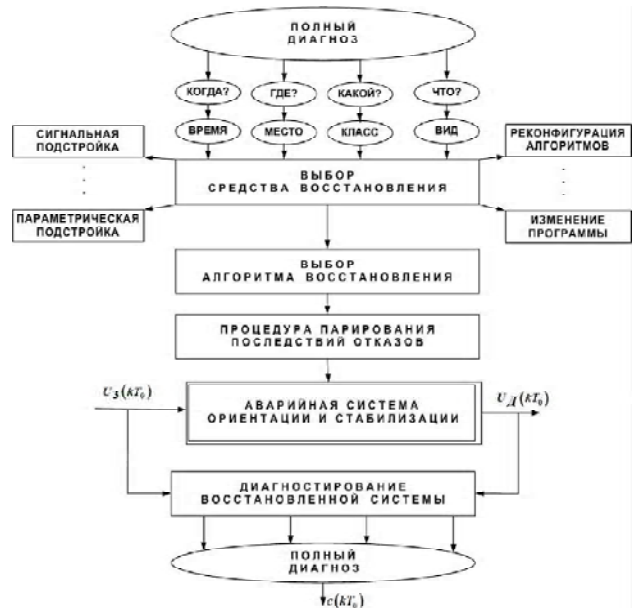


Рис. 4. Функциональная схема средств гибкого парирования системных нештатных ситуаций

темы управления и парирования последствий отказов требуется удостовериться в функциональных свойствах восстановленной системы и качестве выполнения полетного задания. С этой целью производится диагностирование восстановленной спутниковой системы управления ориентацией и стабилизацией. Полный диагноз $c(kT_0)$ позволит принимать решение или о продолжении парирования последствий отказов или о дальнейшем выполнении миссии или о необходимости парирования на мегасистемном уровне.

Отказы на блоковом и системном уровне могут породить такие нештатные ситуации, которые не смогут быть парированы на этих уровнях из-за недостатка избыточных ресурсов, алгоритмических и программных средств, позволяющих парировать возникшую ситуацию и ряда других причин. Мегасистемный уровень парирования нештатных ситуаций – это третий заключительный уровень, на котором обеспечивается выполнения космической миссии в целом. В данном исследовании рассматриваются лишь задачи обеспечения парирования нештатных ситуаций только одной компоненты сложного комплекса, обеспечивающего выполнение космической миссии, а именно, спутниковой системы управления ориентацией и стабилизацией, а не всего комплекса. На рис. 5 представлена совокупность средств, требуемых для парирования нештатных ситуаций на уровне выполнения космической миссии.

После выбора стратегии осуществляется выбор средств ее реализации, исходя из обобщенных критериев всей космической миссии. Использование выбранных средств производится с помощью соответствующей процедуры реализации стратегии через наземный комплекс управления и центр управления полетом по измененному полетному заданию спутника. После оконча-

ния цикла парирования нештатной ситуации в космической миссии производится ее диагностирование с целью оценки текущего состояния посредством полного диагноза. Полный диагноз представляет объективную и обстоятельную информацию о качестве функционирования спутниковой системы управления ориентацией и стабилизацией, необходимую для принятия обоснованного решения о перспективах космической миссии.

Общим, как следует из предыдущего изложения, для каждого уровня парирования является необходимость диагностирования с глубиной до парируемого вида отказа, а также восстановления работоспособности отказавшего объекта. Вместе с тем, появление видов отказов в блоках и системе в целом приводит к накоплению угловых отклонений от полетного задания. Величины этих угловых отклонений существенно зависят не только от периода диагностирования, но и от длительности процедур по восстановлению работоспособности. Накопленные отклонения не позволяют продолжить качественно выполнять полетное задание. Это возмущающие воздействия, дестабилизирующие функционирование спутниковой системы ориентации и стабилизации. Поэтому после процедуры восстановления работоспособности требуется процедура компенсации накопившихся угловых отклонений.

Как следует из приведенных исследований, весь период парирования нештатной ситуации, вызванной каким-либо видом отказа, будет определяться таким выражением

$$T_{\Pi} = \tau_{д} + \tau_{в} + \tau_{к}. \tag{2}$$

Нештатная ситуация – это дестабилизирующее событие для космической миссии, поэтому чем меньше T_{Π} , тем меньше отрицательное влияние такого события на эффективность всего проекта. Вместе с тем, существуют технико-экономические ограничения для каждого проекта, обуславливающие интервальное ограничение для T_{Π} :

$$T_{\Pi\min} \leq T_{\Pi} \leq T_{\Pi\max}, \tag{3}$$

где $T_{\Pi\min}$ – минимально возможный период парирования, а $T_{\Pi\max}$ – максимально возможный период парирования нештатных ситуаций. Очевидно, для того, чтобы вложиться в установленные ограничения для T_{Π} требуется найти рациональное разложение на составляющие $\tau_{д}$, $\tau_{в}$, $\tau_{к}$ с учетом их интервального характера. Такое разложение целесообразно свести к оптимизационной задаче.

Итак, предлагаемый подход к разработке реабилитационного обеспечения спутниковых систем управления ориентацией и стабилизацией требует значительных усилий по комплексной формализации процедур восстановления работоспособности блоков, связей и систем, связывающей известные фрагменты аналитического реше-

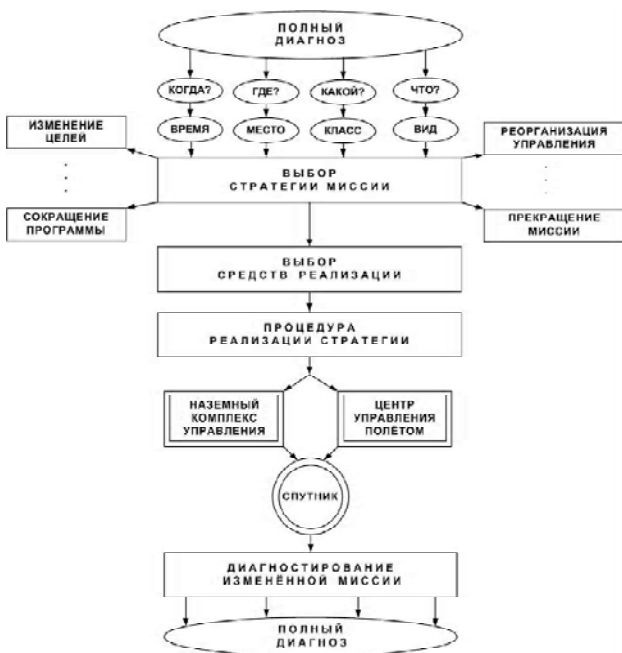


Рис. 5. Функциональная схема средств гибкого парирования отказов миссии

ния отдельных задач в совокупность моделей, методов и средств проектирования. Описанный подход позволяет формализовать разработку реабилитационного обеспечения на платформе гибкого управления избыточными ресурсами.

ВЫВОДЫ

Представленные результаты исследования внедряются в практику создания и эксплуатации живучих спутниковых СУОС на предприятиях, занимающихся разработкой подобных систем, к числу которых относится корпорация «ХАРТРОН». Примерами, демонстрирующими эффективность рассмотренного подхода, являются эксплуатируемые сегодня системы, наделенные свойством живучести на элементном уровне и вновь создаваемые, реализующие системные и мегасистемные уровни живучести космических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахметов, Р. Н.* Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Р. Н. Ахметов. – Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. Академика С. П. Королева. – 2008. – №2. – С. 194–210.
2. Космические летательные аппараты. Введение в ракетно-космическую технику: Учеб.пособ. // Ю. Ф. Даниев, А. В. Демченко, В. С. Зевако, А. М. Кулабухов, В. В. Хуторный; под общ. ред. д-ра техн. наук, проф. А. Н. Петренко. – Днепропетровск, 2007. – 521 с.
3. Теоретические основы проектирования информационно-управляющих систем космических аппаратов / В. В. Кульба, Е. А. Микрина, Б. В. Павлов, В. Н. Платонов; под ред. Е. А. Микрина. Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова РАН. – М. : Наука, 2006. – 579 с.
4. Бортовые системы управления космическими аппаратами: Учебные пособия / Бровкин А. Г., Бурдычов Б. Г., Гордийко С. В. и др. Под ред. А. С. Сырова. – М. : Изд-во МАИ- ПРИНТ, 2010. – 340 с.
5. *Лученко О. А.* Определение параметров установки двигателей-маховиков системы ориентации и стабилизации несимметричного малогабаритного космического аппарата / О. А. Лученко, А. Н. Таран, С. Н. Фирсов, В. Н. Постников // Авиационно-космическая техника и технология. – 2011. – №1 (78). – С. 63–68.

Стаття надійшла до редакції 23.05.2011.

Кулік А. С., Лученко О. О., Фірсов С. М.

КОНЦЕПЦІЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЖИВУЧІСТЮ СУПУТНИКОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ОРІЄНТАЦІЄЮ ТА СТАБІЛІЗАЦІЄЮ

Сформульовано основні положення забезпечення живучості супутникових систем орієнтації і стабілізації, що базуються на принципі самоорганізації за допомогою глибокого діагностування аварійного функціонального стану і гнучкого відновлення працездатності об'єкта.

Ключові слова: живучість, діагностування, нештатна ситуація, самоорганізація

Kulik A. S., Luchenko O. O., Firsov S. N.

THE CONCEPT OF SURVIVABILITY OF SATELLITE SYSTEMS, ATTITUDE CONTROL AND STABILIZATION

The fundamentals of position control and stabilization satellite system survivability assurance based on the principle of self-organization through deep diagnosis accident functional conditions and flexible restorative function are presented.

Key words: survivability, diagnosis, worst-case situation, self-organization.

УДК 519.816:004.942

Миронова Н. А.

Асистент Запорізького національного технічного університету

ИНТЕГРАЦИЯ МОДИФИКАЦИЙ МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ ДЛЯ СИСТЕМ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ ГРУППОВЫХ РЕШЕНИЙ

Проведена систематизация существующих модификаций классического метода анализа иерархий. Выполнена формализация обобщенного подхода анализа иерархий для задач принятия групповых решений.

Ключевые слова: метод анализа иерархий, задача принятия групповых решений, обобщенный подход анализа иерархий, система поддержки принятия групповых решений.

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях большинство важных технических, экономических, социальных, политических решений принимаются в процессе коллективного обсуждения. Групповое принятие решений предпочтительней индивидуального тем, что с увеличением сложности и объема задач один человек не может быть компетентным во всех вопросах и выполнить всей работы по выра-

ботке и реализации решения. Кроме того, отсутствие полной и точной информации, необходимой для принятия решения, приводит к тому, что выбор оптимального исхода происходит именно в результате группового обсуждения руководителями, специалистами, экспертами и консультантами.

Из множества известных методов и подходов к принятию решений наибольший интерес представляют те,

которые дают возможность учитывать многокритериальность и неопределенность, а также позволяют осуществлять выбор решений из множеств альтернатив различного типа при наличии критериев, имеющих разные типы шкал измерения [1]. Одним из таких методов, который учитывает специфику процесса обсуждения проблемной ситуации, является классический метод анализа иерархий (МАИ), предложенный Т. Л. Саати [2].

Целью работы является анализ направлений развития метода анализа иерархий, систематизация существующих модификаций метода, формализация обобщенной модели анализа иерархий для систем поддержки принятия групповых решений.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Подход, используемый в МАИ [2], предоставляет возможность группе людей взаимодействовать по интересующей их проблеме, модифицировать свои суждения и в результате объединять групповые суждения в соответствии с основным критерием: при проведении попарных сравнений объектов по отношению к некоторой характеристике, или характеристик относительно главной цели. Обратные связи обеспечивают ключ к объединению групповых суждений рациональным образом.

Данный метод позволяет выполнить исследование сложных систем взаимозависимых компонент (ресурсы, желаемые исходы или цели) путем декомпозиции их на отдельные составляющие. Для оценки компонентов систем используется метод последовательного попарного сравнения объектов.

Можно выделить следующие этапы МАИ: построение иерархии, формирование матрицы попарных сравнений (МПС), получение вектора приоритетов, оценка степени согласованности МПС, получение наилучшей альтернативы.

С момента появления МАИ были проведены разнообразные исследования и подробное изучение метода, его преимуществ и потенциальных недостатков, что привело к разработке множества модификаций метода, касающихся, в основном, изменения внутренних процедур (улучшения, усовершенствования определенного этапа) и направленных на исправление присущих классическому методу недостатков.

Для повышения эффективности систем поддержки принятия групповых решений необходимо выполнить:

- анализ развития классического МАИ в соответствии с его этапами;
- формализацию подхода анализа иерархии для задачи группового принятия решения.

АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ КЛАССИЧЕСКОГО МЕТОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИЙ

В настоящее время существует множество модификаций МАИ [1–46], которые можно классифицировать относительно следующих критериев:

- по способу измерения предпочтений экспертов (использование различных шкал измерения);
- по типу системы предпочтения экспертов;

- по типу иерархий;
- по методу формирования матриц попарных сравнений;
- по способу оценки и коррекции экспертных суждений;
- по методу синтеза итогового решения;
- в зависимости от структуры метода.

Рассмотрим классификации МАИ относительно вышеприведенных критериев.

1. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ ПО СПОСОБУ ИЗМЕРЕНИЯ ПРЕДПОЧТЕНИЙ ЭКСПЕРТОВ (ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ШКАЛ ИЗМЕРЕНИЯ)

Один из наиболее существенных недостатков классического МАИ [4] – возможность обработки лишь точечных экспертных оценок, что в большинстве случаев неприемлемо при решении задач технологического предвидения, которые характеризуются наличием концептуальной неопределенности и многофакторных рисков.

Неточность в оценках экспертов и связанные с ней риски можно выразить двумя способами: с помощью точечных оценок и функции распределения вероятностей; с помощью интервальных оценок без распределения вероятностей.

Первичное сравнение элементов с помощью словесной шкалы, затем перевод вербальной оценки с помощью различных шкал измерения предпочтений экспертов (точечные, вероятностное представление точечных оценок и функций распределения, интервальные и нечеткие оценки) приводит к появлению следующих классов метода:

- *на основе точечных экспертных оценок* (МАИ на основе первого и второго типа иерархий [1], метод анализа сетей [5–6], модификация метода парных сравнений А.А. Павлова [7], МАИ на основе методов парных сравнений относительно стандартов или копированием [1], сокращенная процедура формирования МПС [8–10], модификация метода парных сравнений для случаев с большим количеством оцениваемых параметров [11], способ улучшения согласованности экспертных оценок, заключающийся в изменении структуры иерархии [12], упрощенный вариант МАИ на основе нелинейной свертки критериев: модификация метода собственного вектора [10], идеальный, дистрибутивный и мультипликативный синтез МАИ, метод группового учета бинарных отношений предпочтений альтернатив с дистрибутивным синтезом [13–17], модификация А.П. Ротштейна [18], нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наихудшего случая [19]);

- *стохастический* (стохастический МАИ [20–27]);
- *на основе интервальных экспертных оценок* (создание модификаций МАИ на основе интервальных оценок [28–30]);

- *на основе нечетких экспертных оценок* (разработка модификаций МАИ на основе нечетких оценок [31–40], МАС на основе нечетких оценок [41–42]).

Различные способы представления неточности экспертных суждений приводят к необходимости примене-

ния и, следовательно, созданию модифицированных методов получения векторов приоритетов, способов оценки и коррекции экспертных суждений, методов синтеза итогового решения.

Большинство зарубежных и отечественных литературных источников [20–42] посвящено исследованию и разработке модифицированных методов получения вектора приоритетов:

– на основе точечных экспертных оценок: упрощенный вариант МАИ на основе нелинейной свертки критериев: модификация метода собственного вектора [10]; использование энтропии Шеннона для получения вектора приоритетов [41] и др.;

– стохастические [4, 20]: метод имитационного моделирования Монте-Карло, при этом используется лог-нормальное распределение экспертных оценок и метод собственного вектора [21] или взвешенная логит-модель [22–24] и пробит-модель [23], в которых предполагается мультиномиальное распределение весов объектов; регрессионный метод поиска весов и лог-нормальное распределение оценок экспертов [25–27];

– на основе интервальных оценок (интервальные методы получения векторов приоритетов [28–29], интервальный регрессионный анализ [30] и др.);

– на основе нечетких оценок (метод Чанга [37], способы дефаззификации [31, 33], нечеткие методы наименьших квадратов: традиционный [38], логарифмический [39] и модифицированный логарифмический [40], метод нечеткого программирования предпочтений и его модификация [36], метод получения вектора приоритетов на основе генетического алгоритма [33] и др.).

Выражение неточности в оценках экспертов в виде нечетких и интервальных чисел приводит к появлению вышперечисленных классов МАИ, позволяет адекватно представлять неопределенность в суждениях лиц, принимающих решение (ЛПР), и снять ограничения на применение метода.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ ПО ТИПУ СИСТЕМЫ ПРЕДПОЧТЕНИЯ ЭКСПЕРТОВ

Предпочтения могут формироваться одним лицом или коллективом, в зависимости от этого задачи принятия решений с использованием МАИ можно классифицировать на задачи:

- индивидуального принятия решений (классический метод);
- коллективного принятия решений (адаптация метода для задачи принятия групповых решений).

При использовании классического МАИ в процессе принятия групповых решений для нахождения единого группового мнения вычисляют среднегеометрическое оценок участников [1–2]:

$$g_{ij}^A = \sqrt[k]{a_{ij}^1 a_{ij}^2 \dots a_{ij}^k}, \quad (1)$$

где g_{ij}^A – агрегированная групповая оценка, принадлежащая i -й строке и j -му столбцу МПС; k – число МПС,

каждая из которых составлена одним экспертом.

Расчет агрегированной групповой оценки в случае привлечения p ЛПР, у которых различные уровни компетентности, выполняется по формуле:

$$g_{ij}^A = a_{ij}^{\alpha_1} a_{ij}^{\alpha_2} \dots a_{ij}^{\alpha_p}, \quad (2)$$

где $a_{ij}^{\alpha_k}$ – оценка элемента k -м участником с коэффициентом компетентности α_k , $k = \overline{1, p}$, где p – количество участников,

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_p = 1.$$

Агрегацию суждений участников можно осуществить также с помощью собственных векторов МПС. При этом результаты будут эквивалентны тем, которые получены на уровне элементов матриц, если однородность составленных матриц достаточна и удовлетворяет условию $CR \leq 0,10$ (CR – отношение согласованности).

В пункте 1 приведены модификации МАИ (классы МАИ), которые можно применить только для задач индивидуального принятия решений. Для того, чтобы применить существующие модификации МАИ для задач группового принятия решений необходимо выполнить адаптацию методов на этапе получения обобщенного мнения.

3. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ ПО ТИПУ ИЕРАРХИИ

По характеру связей между критериями и альтернативами выделяют следующие типы иерархий [1–2]:

- первый тип иерархий с одинаковыми числом и функциональным составом альтернатив под критериями (каждый критерий, имеющий связь с альтернативами, связан со всеми рассматриваемыми альтернативами);
- второй тип иерархий с различными числом и функциональным составом альтернатив под критериями (каждый критерий, имеющий связь с альтернативами, связан не со всеми рассматриваемыми альтернативами);
- третий тип иерархий с обратной связью.

Для первого типа иерархии разработан алгоритм иерархического синтеза [1], который используется для взвешивания собственных векторов МПС альтернатив весами критериев (элементов), имеющихся в иерархии, а также для вычисления суммы по всем соответствующим взвешенным компонентам собственных векторов нижележащего уровня иерархии. Данная модификация позволяет получить итоговое решение для более детализированной иерархии (например, когда в иерархии присутствуют критерии нижних уровней – подкритерии).

Для второго типа иерархии используется метод определения вектора приоритета альтернатив [1] для случая, когда иерархия имеет один уровень критериев, объединенных фокусом с учетом значимости критериев, и разное количество альтернатив у каждого критерия. Метод предполагает выполнение ряда процедур по структурированию информации и проведению вычислительных операций.

Для третьего типа иерархии разработан метод анализа сетей (МАС) [2, 5–6], который является обобщением МАИ в случае, когда взаимодействием компонентов иерархии и/или их элементов нельзя пренебречь. Многие проблемы принятия решений нельзя представить иерархическими структурами, потому что в них существуют зависимости и взаимодействия между элементами разных уровней иерархии. Часто возникают задачи, в которых важность критериев влияет не только на приоритеты альтернатив (как в иерархиях), но и на приоритеты критериев [5].

МАС основан на построении сетевой модели, описывающей влияние внешних факторов на рассматриваемую систему и взаимное влияние основных элементов системы друг на друга (относительно выбранной цели). Ключевым понятием в рамках данного метода является влияние, т.е. воздействие одного элемента на другой.

4. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ ПО МЕТОДУ ПОПАРНЫХ СРАВНЕНИЙ

Метод попарного сравнения, используемый в классическом МАИ, не всегда может быть эффективно применен в некоторых практических ситуациях [1]:

- оценки и сравнения более девяти объектов (критериев, альтернатив), в таком случае построение однородных МПС становится затруднительным. Это связано с физическими ограничениями интеллекта человека;

- возникновения явления реверса рангов, т.е. изменение порядка ранее прошедших сравнение альтернатив при добавлении новых альтернатив или удалении существующих. Реверс рангов нежелателен при решении ряда прикладных задач, связанных со значительными финансовыми, материальными и социальными затратами на корректировку последствий принимаемых решений или возможностью возникновения конфликтной ситуации между экспертами, готовящими и обосновывающими решения, и ЛПР, несущими ответственность за принятые решения и их последствия;

- сравнения объектов, которые могут поступать эксперту не одновременно, а через определенные промежутки времени; в данной ситуации не представляется возможным попарно сравнить объекты.

Для решения проблемы сравнения и оценки объектов в вышеперечисленных ситуациях наиболее целесообразен *метод сравнения объектов относительно стандартов* [1].

Метод копирования [1] аналогичен методу сравнения объектов относительно стандартов в том плане, что позволяет не нарушать порядок ранее проранжированных альтернатив при добавлении новых, являющихся копиями ранее проранжированных альтернатив. Кроме того, число анализируемых альтернатив при добавлении копий может превышать пороговое значение, равное девяти, установленное для метода попарного сравнения. Данный метод позволяет существенно сократить время экспертов на подготовку исходных данных для анализа

и уменьшить вероятность внесения в них как случайных, так и логических ошибок.

Сокращенная процедура формирования МПС [8–10] обеспечивает устранение следующего недостатка классического МАИ – резкое увеличение количества оценок с увеличением набора элементов; и, как следствие, уменьшение трудоемкости формирования матриц и повышение эффективности их обработки. Процедура позволяет автоматически формировать согласованную МПС («идеальную») на основании оценок эксперта, вынесенных только относительно первого объекта сравнения (в этом случае эксперт выносит $n-1$ суждение). Такую матрицу можно рассматривать как своего рода опорную матрицу при вынесении экспертных суждений.

Модификация метода парных сравнений для случаев с большим количеством оцениваемых параметров [11] основана на использовании сокращенной процедуры формирования МПС [8–10] и разделении результатов экспертиз случайным образом на группы, затем для каждой группы и выборки в целом рассчитывают вектор приоритетов на основании среднеарифметического, медианы и среднегеометрического оценок экспертов.

Модификация метода парных сравнений А. А. Павлова [7] используется в случае большого количества альтернатив (больше 9). Такая задача может возникнуть в двух случаях:

- наилучшая альтернатива не выбирается из набора реально существующих альтернатив, а альтернативы генерируются искусственно для выбора наилучшей, после чего в реализацию этой альтернативы вкладываются существенные ресурсы;

- искусственно генерируются альтернативы; с помощью МАИ находят их результирующие веса, по которым строится аналитическое описание глобальной цели.

5. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ ПО СПОСОБУ ОЦЕНКИ И КОРРЕКЦИИ ЭКСПЕРТНЫХ СУЖДЕНИЙ

Сравнение элементов иерархии осуществляется методом попарных сравнений: эксперты сравнивают альтернативы между собой и дают оценки предпочтения сравниваемых вариантов выбора, которые выражают в так называемой фундаментальной шкале отношений. Результат записывается в виде МПС. На основе полученных МПС формируется вектор приоритетов. Далее выполняется оценка степени согласованности МПС, определяемая таким показателем, как отношение согласованности, которое сравнивается с заданным ЛПР порогом. Если результат сравнения превышает данное число (порог), то это свидетельствует о существенном нарушении логической связности суждений, допущенном экспертом при заполнении матрицы, поэтому исследователю предлагается пересмотреть данные, использованные для построения матрицы, чтобы улучшить согласованность.

Существуют следующие способы оценки и коррекции экспертных суждений:

- 1) *в зависимости от структуры метода:*

– изменение структуры иерархии (способ улучшения согласованности экспертных оценок, заключающийся в изменении структуры иерархии – уменьшение числа элементов на одном уровне иерархии с помощью построения дополнительного, на котором предлагается разместить наиболее близкие между собой элементы рассматриваемого уровня; определение степени близости элементов не поддается формализации и зависит от специфики конкретной задачи [12]);

– пересмотр оценок в МПС (классический метод Саати [2,43], метод на основе графа [43], метод триплетов [44], улучшенный способ определения несогласованности экспертных суждений [9]);

2) *по типу оценок:*

– точечные (классический метод Саати [2, 43], метод на основе графа [43], метод триплетов [44], улучшенный способ определения несогласованности экспертных суждений [9]);

– нечеткие (способы оценки согласованности суждений на основе нечетких экспертных оценок [4, 35, 36]);

3) *по способу пересмотра:*

– единоличный пересмотр значений оценок самим ЛПР [2, 43];

– итеративные (классический метод Саати [2, 43], метод на основе графа [43], метод триплетов [44]).

Существующие способы оценки и коррекции экспертных суждений, в основном, позволяют выполнять коррекцию точечных оценок и не охватывают проверку согласованности нечетких и интервальных матриц попарных сравнений.

6. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ ПО МЕТОДУ СИНТЕЗА ИТОГОВОГО РЕШЕНИЯ

Наиболее простой прием решения многокритериальной задачи заключается в ее сведении к определенной скалярной (однокритериальной) задаче, целевая функция которой представляет собой некоторую комбинацию исходных критериев. При этом используется линейная, мультипликативная и другие формы (свертки) для образования указанной комбинации. Выбор той или иной свертки осуществляется на основе имеющейся информации о решаемой задаче и/или исходя из соображений простоты решения полученной скалярной задачи [45].

Применение МАИ к решению многокритериальной задачи [45] основано на ее скаляризации при помощи линейной свертки критериев. А именно, согласно МАИ наилучшим решением многокритериальной задачи объявляется то, которое доставляет наибольшее возможное значение линейной (аддитивной) свертке критериев.

Применение линейной свертки [10] при решении многокритериальных задач с конечным множеством возможных решений (условие выпуклости множества возможных решений и требование вогнутости критериев), по крайней мере, гипотетически дает возможность обнаружить любое решение, которое может оказаться выбранным, т.е. наилучшим. За пределами указанного

класса применение этой свертки рискованно или же вообще недопустимо, поскольку в результате ее максимизации (при всех возможных значениях неотрицательных коэффициентов) можно пропустить именно то решение, которое в данном случае следует выбрать.

Причина появления реверса рангов в МАИ заключается в использовании линейной свертки альтернатив относительно критериев принятия решений. Более универсальной с точки зрения области применимости является нелинейная свертка [10].

Следовательно, выделим классы МАИ по методу синтеза итогового решения:

1) *по способу свертки критериев:*

– линейная или аддитивная (идеальный и дистрибутивный синтез МАИ, метод группового учета бинарных отношений предпочтений альтернатив с дистрибутивным синтезом [13–14]);

– мультипликативная (мультипликативный МАИ [14–17]);

– нелинейная (упрощенный вариант МАИ на основе нелинейной свертки [10]).

2) *по типу модели:*

– иерархический синтез (получение итогового решения для модификации МАИ с учетом типов иерархий [1]);

– синтез для сетевой модели (метод анализа сетей [5–6]);

– специальные соотношения (нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наихудшего случая [18], модифицированный метод А. П. Ротштейна [19]);

3) *по типу оценок:*

– на основе точечных оценок (МАИ на основе первого и второго типа иерархий [1], МАС [5], МАИ на основе методов парных сравнений относительно стандартов или копированием [1], модификация метода парных сравнений А. А. Павлова [7], сокращенная процедура формирования МПС [8–10], модификация метода парных сравнений для случаев с большим количеством оцениваемых параметров [11], способ улучшения согласованности экспертных оценок, заключающийся в изменении структуры иерархии [12], упрощенный вариант МАИ на основе нелинейной свертки критериев: модификация метода собственного вектора [10], идеальный, дистрибутивный и мультипликативный синтез МАИ, метод группового учета бинарных отношений предпочтений альтернатив с дистрибутивным синтезом [13–17], модификация А. П. Ротштейна [18], нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наихудшего случая [19]);

– на основе нечетких оценок (модификации идеального, дистрибутивного и мультипликативного синтеза МАИ, метода группового учета бинарных отношений предпочтений альтернатив с дистрибутивным синтезом [46]).

Существующие классы МАИ по методу синтеза итогового решения позволяют получать наилучшую альтернативу для МАИ на основе точечных оценок. Для нечетких и интервальных МАИ необходимо выполнить разработку методов получения итогового решения на основе нелинейной свертки.

7. КЛАССИФИКАЦИЯ МАИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СТРУКТУРЫ МЕТОДА

В зависимости от структуры метода можно выделить следующие модификации:

– отсутствует этап формирования МПС (нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наихудшего случая [18] не требует трудоемких процедур, связанных с формированием и обработкой МПС; вместо этого используются специальные соотношения, основанные на сравнении с наихудшей альтернативой и наименее важным критерием);

– отсутствует этап получения вектора приоритета (модифицированный метод А.П.Ротштейна [19] не требует процедуры определения собственного вектора и проверки согласованности МПС);

– отсутствует этап оценки степени согласованности МПС (МАС [5–6], модифицированный метод А. П. Ротштейна [19]).

ФОРМАЛИЗАЦИЯ ПОДХОДА АНАЛИЗА ИЕРАРХИИ ДЛЯ ЗАДАЧИ ГРУППОВОГО ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

Исходя из вышеизложенного, задачу принятия группового решения с использованием модификаций МАИ можно представить в виде следующего кортежа:

$$\langle S_0, T, Q | TH(S, A, B, X), \theta, M(TH, \theta), WPO(\theta), \xi(\theta), OA(\theta), G, L, X^* \rangle,$$

где слева от «|» стоят известные переменные, а справа – неизвестные; S_0 – проблемная ситуация описывается количественными или/и качественными характеристиками; описываются условия, связанные с проблемой, причины их возникновения и развития; описание заканчивается кратким формулированием проблемы, которую необходимо решить; T – время, данное для принятия решения; Q – ресурсы, необходимые для принятия решения, не включая ресурсы на реализацию; $TH(S, A, B, X)$ – тип иерархий, представленный в виде графа и матрицы смежности; S – множество признаков или критериев $S = (s_1, s_2, \dots, s_m)$, доопределяющее проблемную ситуацию; A – множество целей $A = (a_1, a_2, \dots, a_k)$; B – множество ограничений $B = (b_1, b_2, \dots, b_n)$; X – множество альтернативных решений $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, из которых выбирается единственное оптимальное решение X^* ; с целью увеличения степени общности результатов необходимо выбирать любые оцениваемые альтернативные решения как универсальные объекты, характеризующиеся набором количественных или/и качественных показателей; θ – шкала измерения оценок экспертов; $M(TH, \theta)$ – множество МПС, зависящих от типа иерархий, количества объектов в иерархии (цели, критерии, подкритерии, альтернативы), способа формирования МПС; $WPO(\theta)$ – метод обработки МПС (метод получения вектора приоритетов) в зависимости от шкалы измерения оценок эксперта; $\xi(\theta)$ – способ оценки МПС, зависит от типа

оценок, способа пересмотра, структуры метода коррекции суждений экспертов; $OA(\theta)$ – метод синтеза итогового решения, зависит от типа модели, способа свертки критериев и шкалы измерения оценок эксперта; G – единое групповое предпочтение, определяется как функция от индивидуальных предпочтений: $G = f(\theta, X, L)$, где L – решающее правило (способ), позволяющее согласовать индивидуальные предпочтения в единое групповое предпочтение, $G = (g_1, g_2, \dots, g_p)$, p – количество ЛПП в группе.

ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная задача исследования направлений развития классического метода анализа иерархий, выполнена систематизация существующих модификаций данного метода, в результате которой были выделены классы МАИ относительно следующих критериев: способ измерения предпочтений экспертов (использование различных шкал измерения); тип системы предпочтения экспертов; тип иерархий; метод формирования матриц попарных сравнений; способ оценки и коррекции экспертных суждений; метод синтеза итогового решения; в зависимости от структуры метода.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые предложена формализация обобщенного подхода анализа иерархий, описывающая задачу принятия групповых решений с помощью модификаций МАИ, которая позволяет формировать этапы метода в зависимости от исходных данных.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Андрейчиков, А. В.* Анализ, синтез, планирование решений в экономике [Текст] / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Финансы и статистика, 2002. – 368 с.
2. *Саати, Т. Л.* Принятие решений. Метод анализа иерархий [Текст] / Т. Л. Саати. – М. : Радио и связь, 1993. – 320 с.
3. *Миронова, Н. А.* Обзор методов аналитической иерархии [Текст] / Н. А. Миронова, В. И. Дубровин // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: Материалы международной научной конференции. – Том 1. – Херсон : ХНТУ, 2009. – С. 192–194.
4. *Панкратова, Н. Д.* Методология обработки нечеткой экспертной информации в задачах предвидения. Ч. 1 [Текст] / Н. Д. Панкратова, Н. И. Недашковская // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 2. – С. 40–55.
5. *Андрейчиков, А. В.* Принятие решений при зависимостях и обратных связях: Аналитические сети [Текст] / А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. – М. : Издательство ЛКИ, 2008. – 360 с.
6. *Saaty, T. L.* Decision making with Dependence and Feedback. The Analytic Network Process. [Текст] / T. L. Saaty; PWS Publications. – Pittsburgh: 2001. – 386 p.
7. Модифікований метод аналізу ієрархій (версія 1, 2) [Текст] / О. А. Павлов, К. І. Ліщук, О. С. Штанькевич, Г. А. Іванова, О. П. Федотов // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Серія «Інформатика, управління та обчислювальна техніка». – 2009. – № 51. – С. 42–53.

8. Трофимец, В. Я. К вопросу разработки основных вычислительных процедур МАИ : [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/078.pdf>
9. Трофимец, В. Я. К вопросу разработки вспомогательных вычислительных процедур МАИ: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2004/079.pdf>
10. Ногин, В. Д. Упрощенный вариант МАИ на основе нелинейной свертки критериев [Текст] / В. Д. Ногин // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2004. – Т. 44. – № 7. – С. 1259–1268.
11. Сайко, В. В. Модификация метода парных сравнений для случаев с большим количеством оцениваемых параметров [Текст] / В. В. Сайко // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: Материалы международной научной конференции. – Том 1. – Херсон : ХНТУ, 2009. – С. 210–214.
12. Панкратова, Н. Д. Комплексне оцінювання чутливості рішення на основі методу аналізу ієрархій [Текст] / Н. Д. Панкратова, Н. І. Недашківська // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2006. – № 3. – С. 7–25.
13. Недашківська, Н. І. Оцінювання реверсу рангів у методі аналізу ієрархій [Текст] / Н.І. Недашківська // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2005. – № 4. – С. 120–130.
14. Triantaphyllou, E. Two new cases o rank reversals when AHP and some of its additive variants are used that do not occur with multiplicative AHP [Текст] / E.Triantaphyllou //Journal of multicriteria decision analysis. – 2001. –№ 10. – P. 11–25.
15. Lootsma, F. A. Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART [Текст] / F. A. Lootsma // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 1993. –№ 2. – P. 87–110.
16. Lootsma, F.A. The multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common contex [Текст] / F.A. Lootsma, H. Schuijt // Journal of Multi-Criteria Decision Analysis. – 1997. – vol 6. – № 4. – P. 185–196.
17. Ларичев, О. И. Теория и методы принятия решений [Текст] / О. И. Ларичев. – М. : Логос, 2002.– 392 с.
18. Ротштейн, А. П. Нечеткий многокритериальный выбор альтернатив: метод наилучшего случая [Текст] / А. П. Ротштейн, А. Н. Козачко // Автоматика-2008 : доклады XV международной конференции по автоматическому управлению, 23–26 сентября 2008 г. – Одесса : ОНМА. – С. 488–491.
19. Rotshtein, A. P. Modification of the Saaty Method for the Construction of Fuzzy Set Membership Functions [Текст] / A. P. Rotshtein // The International Conference on Fuzzy Logic and its Applications : Proc. Zichron, Israel, 1997. – P. 125–130.
20. Vanuelas, R. Modified analytic hierarchy process to incorporate uncertainty and managerial aspects [Текст] / R. Vanuelas, J. Antony // International Journal of Production Research. – 2004. – vol 42.– №18.– P. 3851–3872.
21. Vanuelas, R. Six sigma or design for six sigma [Текст] / R. Vanuelas, J. Antony // The TQM magazine. – 2004. – 16(4). – P.250–263.
22. Hahn, E. D. Decision making with uncertain judgments: a stochastic formulation of the analytic hierarchy process [Текст] / E. D. Hahn // Decision Sciences. – 2003. –№ 34(3). – P. 443–466.
23. Hahn, E. D. Link function selection in stochastic multicriteria decision making models [Текст] / E. D. Hahn // European Journal of Operational Research. – 2006. –№ 172(1). – P. 86–100.
24. Phillips-Wren, G. E. A multiple-criteria framework for evaluation of decision support systems [Текст] / G.E. Phillips-Wren, E.D. Hahn, G.A. Forgyionne // Omega. – 2004. – № 32(4). – P. 323–332.
25. Laininen, P. Analyzing AHP-matrices by regression [Текст] / P. Laininen, R. P. Hamalainen // European Journal of Operational Research.– 2003. –№ 148. – P. 514–524.
26. Crawford, G. A note on the analysis of subjective judgment matrices [Текст] / G. Crawford, C. Williams // Journal of Mathematical Psychology. – 1985. – № 29(4). – P. 387–405.
27. De Jong, P. A statistical approach to Saaty’s scaling method for priorities [Текст] / P. De Jong // Journal of Mathematical Psychology. – 1984. – № 28. – P. 467–478.
28. Kazutomi Sugihara Interval priorities in AHP by interval regression analysis [Текст] / Kazutomi Sugihara, Hiroaki Ishii and Hideo Tanaka // European Journal of Operational Research.– 2004. –№ 158(3). – P. 745–754.
29. MeiMei Xia Research on the Priority Method of Interval Fuzzy [Текст] / MeiMei Xia, HeFeng Jiang and CuiPing Wei // Applied Mathematical Sciences.– 2009. –№ 3(17). – P. 839–843.
30. Lipovetsky, S. Interval estimation of priorities in the AHP [Текст] / Stan Lipovetsky, Asher Tishler // European Journal of Operational Research .– 1999. –№ 114(1). – P. 153–164.
31. Ting-Yu Chen Importance-Assessing Method with Fuzzy Number-Valued Fuzzy Measures and Discussions on TFNs And TrFNs [Текст] / Ting-Yu Chen, Tai-Chun Ku // International Journal of Fuzzy Systems. – 2008. –vol.10. – № 2. – P. 104–111.
32. Ахрамейко, А. А. Обобщение метода анализа иерархий Саати для использования нечетко-интервальных экспертных данных: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: http://sedok.narod.ru /s_files/belorussia_2002.htm.
33. Миронова, Н. А. Метод получения вектора приоритетов из нечетких матриц попарных сравнений [Текст] / Н. А. Миронова, В. И. Дубровин // Искусственный интеллект. – 2009. – № 3. – С. 464–470.
34. Панкратова, Н. Д. Розробка модифікованого методу аналізу ієрархій з урахуванням нечіткої експертної інформації [Текст] / Н. Д. Панкратова, Н. І. Недашківська // Матеріали XIV міжнародної конференції з автоматичного управління (Автоматика-2007). – Ч. 2 – Севастополь : СКУАЄ та П. – 2007. – С. 56–58.
35. Панкратова, Н. Д. Методология обработки нечеткой экспертной информации в задачах предвидения. Ч. 2 [Текст] / Н. Д. Панкратова, Н. И. Недашковская // Проблемы управления и информатики. –2007. – № 3. – С. 49–63.
36. Mikhailov, L. Evaluation of services using a fuzzy Analytic Hierarchy Process [Текст] / L. Mikhailov, P. Tsvetinov // Applied Soft Computing. – 2004. –№ 5. – P. 23–33.
37. Chang, D.Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP [Текст] / D. Y. Chang // European Journal of Operational Research.– 1996. –vol 95.– №3.– P. 649–655.
38. Ruoning, Xu Fuzzy least-squares priority method in the analytic hierarchy process [Текст] / Ruoning Xu // Fuzzy Sets and Systems. – 2000. –№ 3(112). – P. 395–404.
39. Ruoning Xu Fuzzy logarithmic least squares ranking method in analytic hierarchy process [Текст] / Ruoning Xu, Zhai Xiaoyan // Fuzzy Sets and Systems. – 1996. –№ 2(77). – P. 175–190.
40. Ying-Ming, Wang A modified fuzzy logarithmic least squares method for fuzzy analytic hierarchy process [Текст] / Ying-Ming Wang, M.S. Taha Elhag, Zhongsheng Hua // Fuzzy Sets and Systems. – 2006. –№ 23(157). – P. 3055–3071.

41. *Prabjot, K.* A fuzzy ANP-based approach for selection ERP vendors [Текст] / K. Prabjot, N.C. Mahanti // International Journal of Soft Computing. – 2008. – № 3(1). – P. 24–32.
42. *Cheng, R. W.* A fuzzy ANP-based approach to Evaluate Medical Organizational Performance [Текст] / R. W. Cheng, Che-Wei Chang, Hung-Lung Lin // International and Management Sciences. – 2008. – vol. 19. – № 1. – P. 53–74.
43. *Кораблев, Н. М.* Согласование и коррекция экспертных оценок в системах поддержки принятия решений в условиях нечеткой исходной информации [Текст] / Н.М. Кораблев, С.Г. Удовенко, Альзин Фирас // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2005. – №2. – С. 116–120.
44. *Lamata, M. T.* A method for improving the consistency of judgements [Текст] / M. T. Lamata, J.I. Pelaez // International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems. – 2002. – Vol 10.– № 6.– P. 677–686.
45. *Ногин, В. Д.* Границы применимости распространенных методов скаляризации при решении задач многокритериального выбора [Текст] / В.Д. Ногин // Методы возмущений в гомологической алгебре и динамика систем: межвуз. сб. науч. тр. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2004. – С. 59–68.
46. *Миронова, Н. О.* Модифіковані методи отримання найкращої альтернативи для методу аналізу ієрархій на основі нечітких експертних оцінок [Текст] / Н.О. Миронова, В.І. Дубровін // Тези доповідей IV міжнародної наукової

конференції «Комп'ютерні науки та інженерія 2010 (CSE-2010)». – Львів : Львівська політехніка, 2010. – С. 246–247.

Стаття надійшла до редакції 12.01.2011.

Після доробки 23.05.2011.

Миронова Н. О.

ІНТЕГРАЦІЯ МОДИФІКАЦІЙ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ІЄРАРХІЙ ДЛЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ ГРУПОВИХ РІШЕНЬ

Проведена систематизація існуючих модифікацій класичного методу аналізу ієрархій. Виконана формалізація узагальненого підходу аналізу ієрархії для задач прийняття групових рішень.

Ключові слова: метод аналізу ієрархій, задача прийняття групових рішень, узагальнений підхід аналізу ієрархій, система підтримки прийняття групових рішень.

Mironova N. O.

INTEGRATION MODIFICATIONS OF THE ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS FOR GROUP DECISION MAKING SUPPORT SYSTEMS

The systematization of Analytic Hierarchy Process existent modification is developed. The formalization of Analytic Hierarchy Process generalized approach for group decision making problems is solved.

Key words: Analytic Hierarchy Process, group decision making problem, Analytic Hierarchy Process generalized approach, Group Decision Support Systems.

УДК 681.3

Кошевой Н. Д.¹, Михайлов А. Г.².

¹Д-р. техн. наук, заведуючий кафедрой Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

² Канд. техн. наук, доцент Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт»

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАБОТЫ ДАТЧИКОВ РАСХОДА ТОПЛИВА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ТОПЛИВНОЙ МАГИСТРАЛЬЮ

В статье рассмотрены принципы построения алгоритмов моделирования работы датчиков расхода топлива. Представлены динамические модели функционирования систем измерения параметров энергоносителей.

Ключевые слова: математические модели, алгоритмы моделирования, датчики, расход топлива.

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

Существующие системы проектирования измерительных преобразователей (ИП) расхода топлива преимущественно ориентированы на устранение погрешностей приборов, связанных с нелинейностью статических характеристик [1].

В то же время обзор статистических данных показал, что динамические параметры имеют широкую спектральную характеристику и, следовательно, приводят к возникновению динамических погрешностей при совпадении спектров частот проектируемых ИП и топливных магистралей (ТМ) [2].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При разработке и модернизации системы проектирования ИП расхода топлива возникает необходимость совершенствования методологии проектирования информационно-измерительных систем (ИИС), новых устройств контроля параметров энергоносителей, которые будут применяться в летательных аппаратах (ЛА) или наземных магистралях топливных энергокомплексов (ТЭК). Предлагается выполнить совершенствование в следующих направлениях:

– разработать математические модели функционирования ИИС контроля параметров энергоносителей, которые будут учитывать динамические параметры дат-

чиков и широкую спектральную характеристику ТМ, что позволит минимизировать динамические погрешности проектируемых ИП;

– разработать общие алгоритмы моделирования ИИС контроля параметров энергоносителей ЛА и ТЭК.

ПРЕДЛАГАЕМЫЕ РЕШЕНИЯ

Рассмотрим типовые характеристики (рис. 1) изменения давления p газовой ТМ для различных интервалов времени [2]. Как видно из рисунка, частотный спектр включает в себя как низкочастотную составляющую (помпаж), так и высокочастотную.

Для исследования динамических погрешностей проектируемых ИП и моделирования их работы необходимо сформировать некоторую модель частотных возмущений $M_{FrErr}\{V_{HF}, V_{LF}\}$. Входными переменными данной модели являются коэффициенты влияния высокочастотных и низкочастотных возмущений V_{HF} и V_{LF} соответственно.

С целью минимизации динамических погрешностей в частотной области функционирования датчика необходимо выделить резонансную характеристику проектируемого ИП [3] в области существования двумерного вектора состояния X

$$X = fres\{m, ku, H, v\}, \tag{1}$$

где m – масса чувствительного элемента; ku – коэффициент упругости пружинного элемента; H – обобщенный геометрический параметр, характеризующий отношение площадей сечения ТМ и чувствительного элемента; v – вязкость рабочего измерительного тела (газа).

Геометрический критерий Cn проектирования ИП будет основан на минимизации дисперсии D ошибок измерений магистрального давления p :

$$\min_D Cn\{l, k, p, W, D\}, \tag{2}$$

где l – набор расстояний между потребителями; k – число потребителей; p – давление на входе потребителя; W – мощность потребителя.

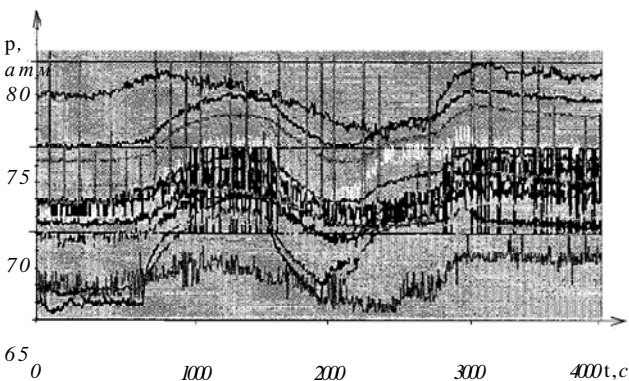


Рис. 1. Типовая характеристика перепадов давления газовой ТМ

В первом приближении будем полагать, что число измерителей и их местоположение совпадает с потребителями энергии (рис. 2).

Тогда общий критерий C проектирования ИП предлагается представить трехкомпонентной системой

$$C = \begin{cases} M_{FrErr}\{V_{HF}, V_{LF}\}, \\ fres\{m, ku, H, v\}, \\ \min_D Cn\{l, k, p, W, D\}. \end{cases} \tag{3}$$

В качестве модели комбинирования высокочастотных и низкочастотных возмущений предложено использование нелинейного полинома:

$$M_{FrErr} = b_0 + b_1 \cdot \sin(b_2 \cdot \sin(V_{HF}(t)) + V_{LF}(t)), \tag{4}$$

где b_0 – свободный коэффициент, учитывающий постоянное смещение возмущения; b_1 – коэффициент, учитывающий влияние нижних частот; b_2 – коэффициент, учитывающий влияние верхних частот.

На основании выражений (1)–(4) предлагается алгоритмическая реализация частотно-зависимой модели в модуле Simulink системы моделирования Matlab. Работа алгоритма представлена следующими шагами.

1. Моделирование внешних воздействий путем комбинирования высокочастотных и низкочастотных возмущений. Структурная схема данного шага для значений $b_0 = 0, b_1 = 5, b_2 = 20$ представлена на рис. 3.

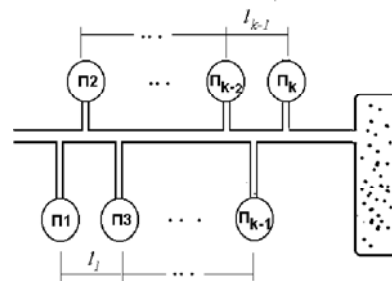


Рис. 2. Структура расположения потребителей и источников ТЭК

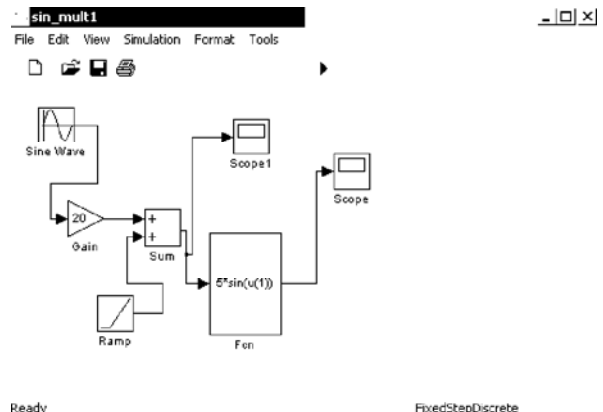


Рис. 3. Схема модели комбинирования высокочастотных и низкочастотных возмущений

2. Реализация частотно-зависимой модели на основе функции моделирования (1), представленной линейным оператором:

$$X' = A \times X, \tag{5}$$

где $A = |0, 1; -1/(ku \cdot m), -H \cdot v/m|$.

Модель комбинирования высокочастотных и низкочастотных возмущений добавлена к частотно-зависимой модели (5) в мультипликативном виде:

$$X' = \{A \times X\} \cdot M_{FrErr}. \tag{6}$$

На рис. 4 представлена структурная схема реализации частотно-зависимой модели в модуле Simulink системы моделирования Matlab.

3. Реализация функции Cn геометрического критерия проектирования на основе выражения (2) выполняется в виде системы k уравнений динамики давления p_k на k -ом участке потребителя:

$$y'_k = -(1/(l_k \cdot W_k))y_k + U, \tag{7}$$

где U – исходное давление топливного резервуара, при этом $U = \sum y_k$.

На рис. 5 представлена структурная схема реализации функции Cn геометрической модели в модуле Simulink для $k=3, l_0=0,5, l_1=l_2=1$.

4. Оценка результатов моделирования по обобщенному критерию (3). Если минимум дисперсии D достигнут, формируются минимальные параметры проектирования и алгоритм заканчивает свою работу. Иначе переходим к п. 1.

Обобщенная схема моделирования работы датчиков расхода топлива и взаимодействия с топливной магистралью представлена на рис. 6.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В соответствии с построенными структурными схемами частотно-зависимых моделей получены следующие результаты моделирования.

На рис. 7 представлен результат моделирования комбинирования высокочастотных и низкочастотных возмущений. На рис. 8 представлен результат реализации частотно-зависимой модели в модуле Simulink системы моделирования Matlab.

Результаты моделирования обобщенной структурной схемы работы датчиков расхода топлива и их взаимодействия с топливной магистралью для значений $v=1,04, ku=1,0, H=20$ и $v=1,04, ku=1,0, H=10$ представлены на рис. 9 и рис. 10 соответственно.

Общие результаты проведенных экспериментов приведены на графике (рис. 11). Представлена зависимость дисперсии ошибок измерений при изменении обобщенного конструкционного параметра от $H = 2$ до $H = 30$,

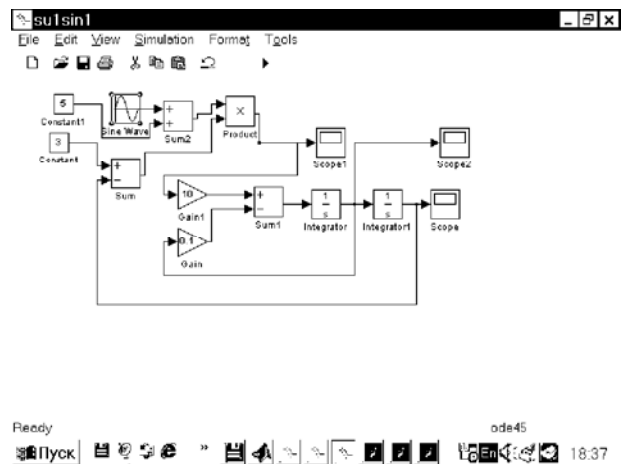


Рис. 4. Структурная схема реализации частотно-зависимой модели в модуле Simulink системы моделирования Matlab

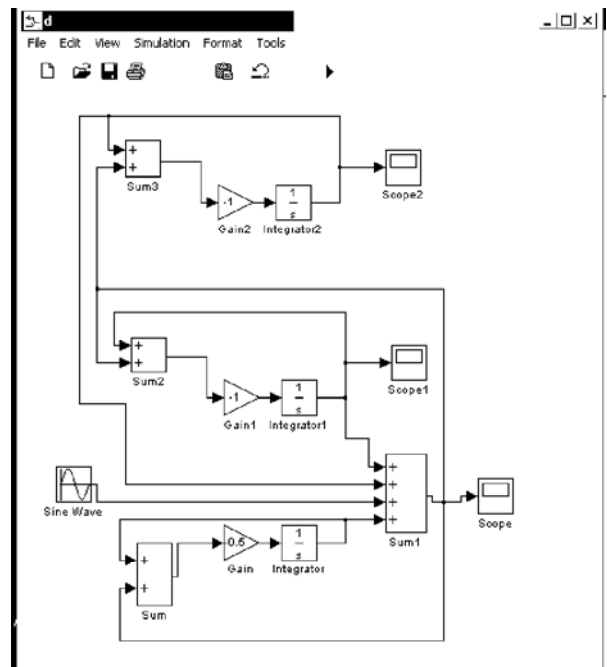


Рис. 5. Структурная схема реализации геометрической модели

при выбранных значениях вязкости рабочего тела – метана $v = 1,04$, коэффициента упругости $ku = 1,0$, для различных значений l и k . При этом $l_1 < l_2 < l_3, k_1 > k_2 > k_3$.

Результаты моделирования позволили выделить области конструктивных параметров проектирования ИП А и С, в которых динамические погрешности измерений максимальны. Определена предпочтительная область В конструктивных параметров проектирования в которой влияние динамических погрешностей измерений минимально.

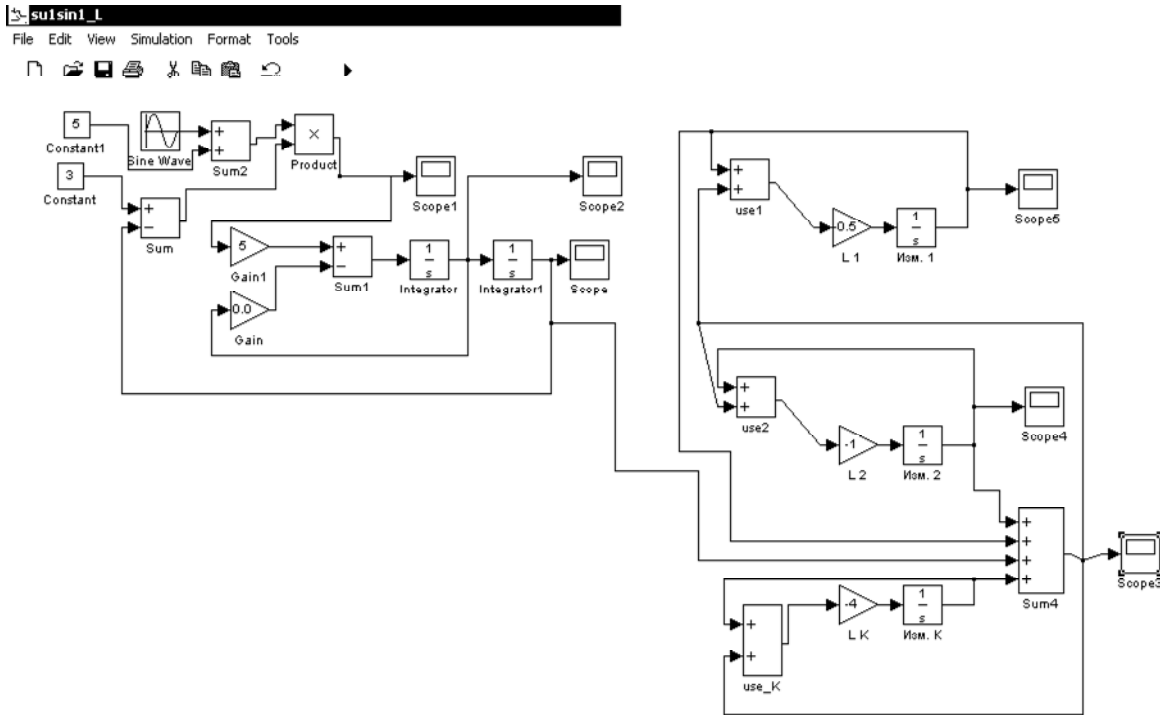


Рис. 6. Обобщенная структурная схема моделирования работы датчиков расхода топлива и их взаимодействия с топливной магистралью

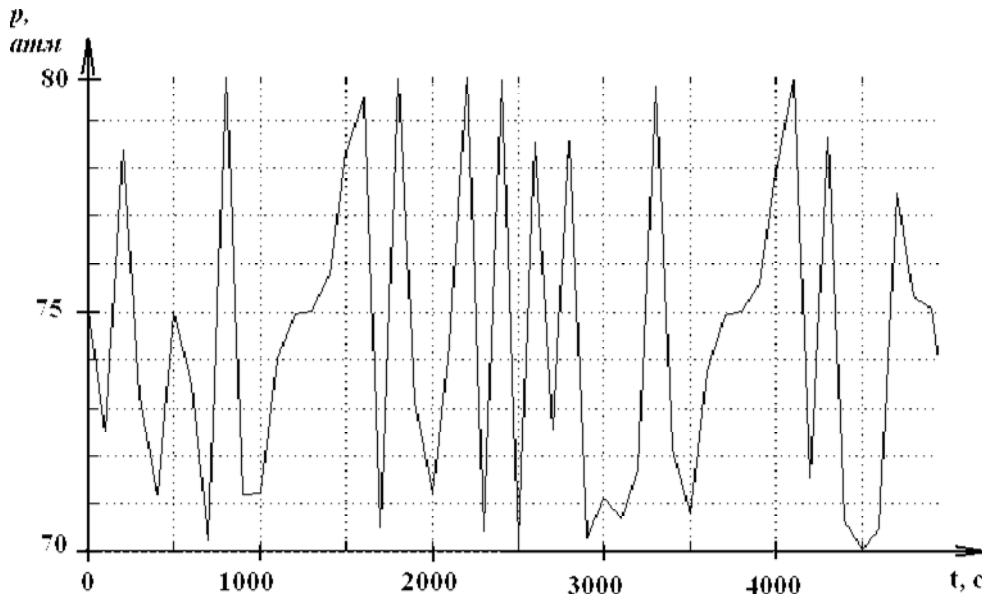


Рис. 7. Результаты моделирования комбинации высокочастотных и низкочастотных возмущений

ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований разработан общий алгоритм моделирования ИИС контроля параметров энергоносителей ЛА и ТЭК, выполнено моделирование общего критерия проектирования ИП. Разработаны математические модели функционирования ИИС контроля параметров энергоносителей, которые учитывают динамические параметры датчиков и широкую

спектральную характеристику ТМ, что позволяет минимизировать динамические погрешности проектируемых ИП. Предложены модель частотных возмущений, резонансная характеристика проектируемого ИП, трехкомпонентный критерий проектирования ИП.

Результаты моделирования позволили сформировать рекомендации при проектировании ИП по выбору обобщенного конструктивного параметра *H* и коэффициента

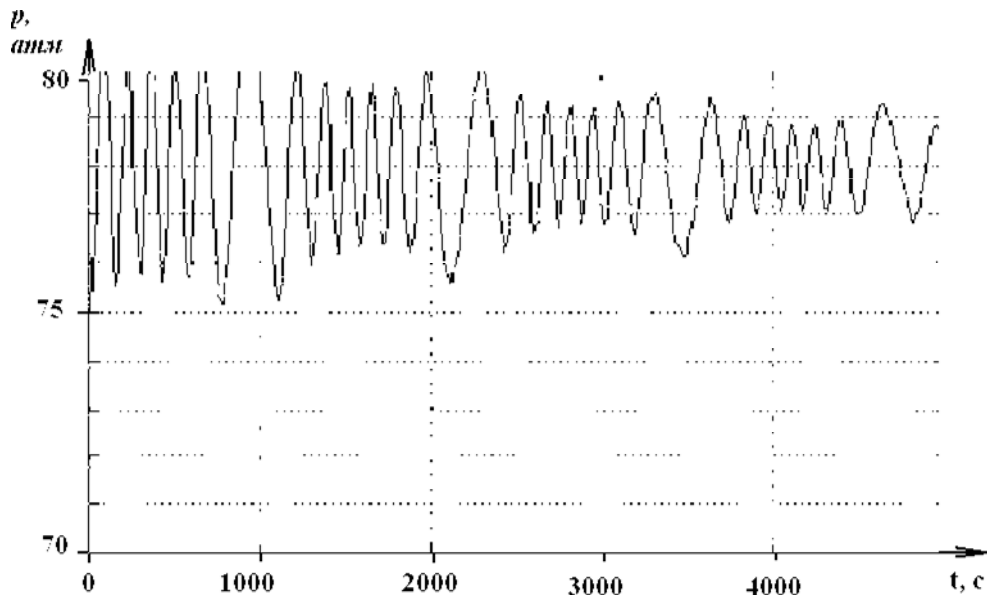


Рис. 8. Результаты моделирования частотно-зависимой модели ТП в модуле Simulink системы моделирования Matlab

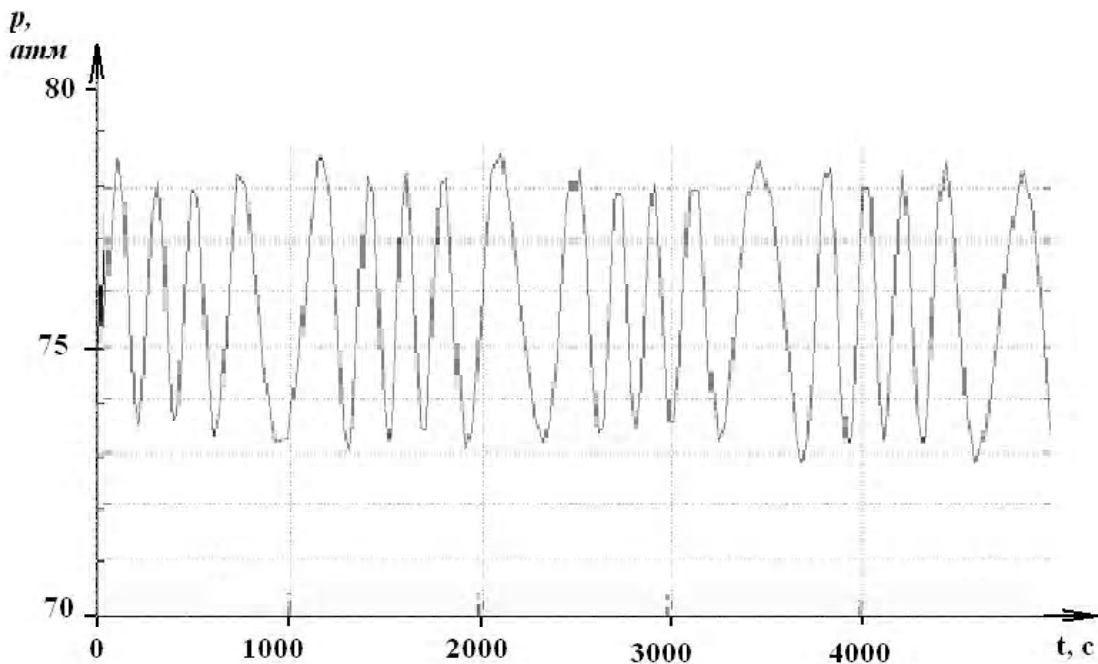


Рис. 9. Результаты моделирования обобщенной структурной схемы работы датчиков расхода топлива и их взаимодействия с топливной магистралью для значений $\nu=1,04$, $ku=1,0$, $H=20$.

упругости пружинного элемента ku при заданных значениях массы чувствительного элемента m , вязкости рабочего измерительного тела ν , расстояний между потребителями l и заданном числе потребителей k .

Таким образом, выполнено совершенствование методологии проектирования ИИС и новых устройств контроля параметров энергоносителей, которые могут применяться в ЛА или наземных магистралях ТЭК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Целищев, Е.* Пример проектирования систем контроля в среде AutomatiCS ADT. Фрагменты пилотного проекта / Е. Целищев, М. Савинов, А. Непомнящих // САПР и графика. – 2006. – № 5. – С. 30–37.
2. *Свиридов, В. Н.* Создание ИВС «Кама» подсистемы «Утечка» / В. Н. Свиридов // Приборы. Системы автоматизации. – 2007. – № 4. – С. 26–29.

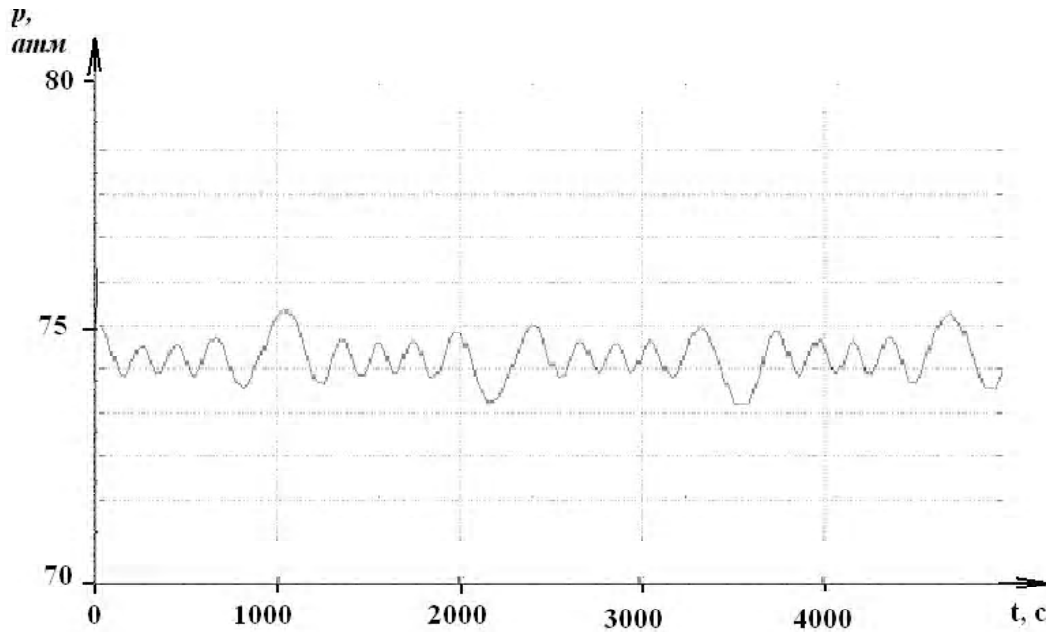


Рис. 10. Результаты моделирования обобщенной структурной схемы работы датчиков расхода топлива и их взаимодействия с топливной магистралью для $v=1,04$, $ku=1,0$, $H=10$

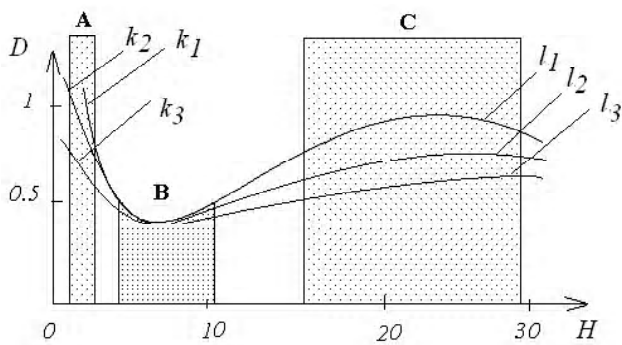


Рис. 11. Общие результаты проведенных экспериментов

3. Михайлов, А. Г. Моделирование структурных схем измерителей расхода топлива / А. Г. Михайлов, А. Р. Сарамольки // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 5. – С. 35–39.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2011.

Кошовий М. Д., Михайлов А. Г.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ДАТЧИКІВ ВИТРАТИ ПАЛИВА ТА ВЗАЄМОДІЇ З ПАЛИВНОЮ МАГІСТРАЛЛЮ

В статті розглянуті принципи побудови алгоритмів моделювання роботи датчиків витрати палива. Представлені динамічні моделі функціонування систем вимірювання параметрів енергоносіїв.

Ключові слова: математичні моделі, алгоритми моделювання, датчики, витрата палива.

Koshevoy N. D., Mikhailov A. G.

MODELING ALGORITHMS DEVELOPMENT OF DEVICE FUNCTION OF THE FUEL CHARGE AND INTERACTION WITH A FUEL MAIN

In this article the construction principles of device function modeling algorithms of the fuel charge are considered. The functioning dynamic models of parameters measurement systems of fuel are submitted.

Key words: Mathematical models, modeling algorithms, gauges, fuel charge.

Юр Т. В.¹, Харитонов В. Н.², Дубровин В. И.³¹Ассистент Запорозького національного технічного університета²Інженер-конструктор ГП ЗМКБ «Прогрес» ім. Івченко, Запорозьє³Канд. техн. наук, професор Запорозького національного технічного університета

МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ И S-ДИСКРИМИНАНТА

В работе предложена модель диагностирования узлов газотурбинного двигателя с применением метода спектрального анализа вибрационных сигналов на основе непрерывного вейвлет-анализа и S-дискриминанта. Разработанная модель может быть использована при проектировании перспективных систем управления силовых установок современных летательных аппаратов для анализа особенностей нестационарных сигналов и диагностирования состояний деталей и узлов ГТД.

Ключевые слова: модель диагностирования, вибросигнал, вейвлет-фильтрация, S-дискриминант, узлы ГТД.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из перспективных направлений решения задачи повышения эффективности характеристик силовых установок современных летательных аппаратов касательно адаптивности к условиям эксплуатации и режимам использования самолета, надежности и ресурса лежит в области интегрированных систем автоматического управления и контроля авиационных газотурбинных двигателей (ГТД).

Износ в процессе эксплуатации приводит к изменениям состояния и характеристик узлов двигателя: опор роторных деталей, зубчатых передач, лопаточных машин, камер сгорания, элементов проточной части. В результате значительно изменяются как статические, так и динамические характеристики двигателя, определяющие его свойства как объекта регулирования.

Разработка метода автоматического распознавания технического состояния узлов двигателя, реализуемого в системе автоматического управления (САУ) двигателя, позволит в процессе функционирования двигателя автоматически переходить к режиму управления, наиболее оптимальному в данных условиях.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одними из эффективных средств технического диагностирования ГТД являются вибродиагностические методы. Вибрационный сигнал несет в себе большое количество информации о техническом состоянии узлов двигателя и может быть достоверным показателем их работоспособности.

В работе [1] авторами предложено усовершенствование статистического метода анализа вибрационных сигналов за счет применения S-дискриминанта [2], что позволило создать метод первичной экспресс-диагностики отклонения технического состояния двигателя от нормального.

Для эффективного анализа вибрационных сигналов ГТД с целью выделения характерных составляющих

и признаков износа узлов авторами усовершенствован метод анализа огибающей высокочастотной случайной вибрации за счет применения банков вейвлетных фильтров и кросс-спектрального анализа [3, 4].

За счет выделения не только гармонических, но и импульсных составляющих, предложенный метод позволяет выделить большее количество характеристических частотных составляющих вибрационных сигналов, что дает более четкие признаки отклонения состояния узлов двигателя от нормального.

Результаты экспериментального исследования эффективности разработанного метода анализа вибрационных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования для решения практических задач диагностирования износа подшипников качения приведены в работах [3, 4].

Результаты проведенного исследования показали, что применение вейвлет-фильтрации увеличивает быстрдействие и надежность постановки диагноза по сравнению с традиционными статистическими методами и методами, основанными на применении быстрого преобразования Фурье (БПФ).

Кроме того, полученные результаты позволяют сделать вывод об универсальности предложенного метода и возможности его эффективного применения для идентификации различных дефектов двигателя: дефектов подшипников, зубчатых передач, дефектов роторных деталей и т. д.

Целью данной работы является разработка модели диагностирования узлов ГТД, основанной на применении разработанных авторами методов анализа вибрационных сигналов.

2. ВОЗМОЖНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ГТД

Реализация методов диагностирования рассмотрена на примере двигателя ТВ3-117ВМА-СБМ самолета Ан-140.

Для реализации метода диагностирования узлов ГТД с применением предложенных методов анализа вибрационных сигналов возможны два варианта реализации.

В первом варианте на самолете не предусматривается никаких доработок, а реализация разработанного метода диагностирования осуществляется в наземном технологическом цифровом аппаратно-программном комплексе, который подключается к бортовой аппаратуре контроля вибрации.

У данного варианта существует ограничение. Как показала практическая отработка предложенных методов, зависимость амплитуды характерных частот дефектов подшипников от уровня повреждений элементов подшипников носит нелинейный характер. Имеющее место уменьшение амплитуды при среднем уровне повреждения может быть пропущено при периодическом контроле. В таком случае может быть некорректно определен момент развития более опасных и быстроразвивающихся значительных уровней повреждения элементов конструкции подшипника.

Более перспективным следует считать второй вариант, который предусматривает установку на борту самолета бортового цифрового модуля контроля и диагностики.

Цифровой модуль контроля и диагностики принимает аналоговые сигналы от усилителей заряда штатной бортовой аппаратуры контроля вибрации и производит их обработку. В результате обработки решается ряд задач по распознаванию технического состояния узлов и систем двигателя:

- контроль роторных составляющих;
- контроль переднего редуктора на частотах шестеренчатых и подшипниковых составляющих;
- контроль заднего редуктора и валопровода на частотах шестеренчатых и подшипниковых составляющих;
- контроль коробки приводов на частотах шестеренчатых и подшипниковых составляющих;

- контроль загрязнения масла;
- оценка состояния измерительных трактов «датчик вибрации – усилитель заряда»;
- контроль элементов газоздушного тракта.

По результатам распознавания выдаются управляющие воздействия (сообщения) в САУ самолета.

Для решения перечисленных задач авторами разработана модель диагностирования узлов ГТД, использующая разработанные методы анализа вибрационных сигналов: статистический метод, улучшенный применением S -дискриминанта, и метод, основанный на применении вейвлетной фильтрации.

3. МОДЕЛЬ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ УЗЛОВ ГТД

Разработанная модель диагностирования узлов ГТД основана на существующей модели [5], представляющей систему вибродиагностирования ГТД на основе применения БПФ. Модель была модифицирована с учетом специфики применяемых разработанных методов анализа сигналов. На рис. 1 представлен общий вид разработанной модели.

В модель диагностирования поступает информация двух видов: аналоговая информация от усилителей заряда (УЗ) датчиков вибраций (ДВ) (анализируемый вибрационный сигнал) и цифровые данные по частотам вращения роторов, крутящему моменту на валу винта и др. ($N_{ВВ}$, $N_{СТ}$, $N_{ТК}$, $M_{КР}$). Выходными данными модели являются сообщения, передаваемые в САУ самолета.

В модуле предварительной обработки информации (МПОИ) определяется режим работы двигателя как динамической системы. Если полученные параметры находятся в устойчиво-неизменяемом состоянии в текущем временном диапазоне, то такой режим считается установившимся (УР), в противном случае режим следует считать переходным (ПР).

Вышеописанная характеристика режима работы двигателя важна как на этапе подготовки данных (определе-

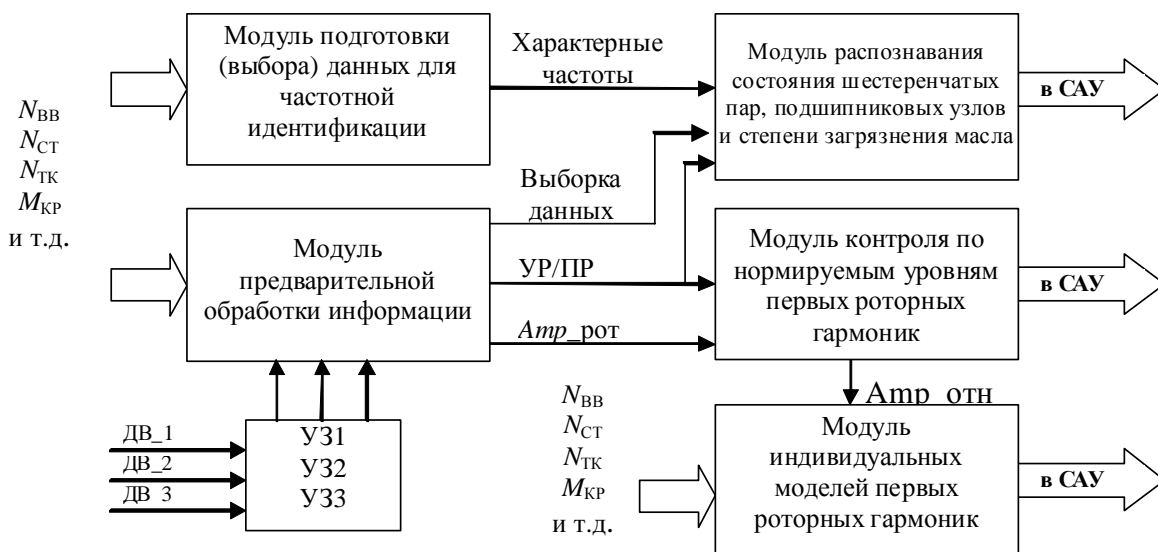


Рис. 1. Модель диагностирования узлов ГТД

ние количества точек в выборке и количества групп выборок данных по вибрациям), так и на этапе контроля и диагностики. В МПОИ происходит оцифровка вибрационного сигнала с отбраковкой сбойных групп данных на основе допускового и перекрестного контроля. После чего данные проходят вейвлет-преобразование с дальнейшим спектральным анализом полученных вейвлет-коэффициентов. Из спектров выделяются составляющие первых роторных гармоник роторов турбокомпрессора, винта и трансмиссии. Амплитудные значения выделенных составляющих спектров передаются в модуль контроля по нормируемым уровням, где происходит их сравнение с тремя типовыми уровнями.

Ограничительные уровни «Опасная вибрация» (ОВ) и «Повышенная вибрация» (ПВ) устанавливаются исходя из комплексных требований прочности конструкции двигателя и его комплектующих агрегатов и их долговечности на протяжении выработки жизненного цикла. Т. е. значения ОВ и ПВ оговариваются параметрами точности. Если текущее значение превысит указанные уровни и это превышение устойчиво будет фиксироваться на протяжении определенного времени, то в САУ самолета будет выдано соответствующее аварийное сообщение.

Информационный уровень «Статистический типовой» представляет зависимость амплитуды той или иной роторной гармоники (статистически максимально вероятной для парка двигателей данного типа) от частоты вращения соответствующего ротора или крутящего момента. Данный уровень используется для вновь устанавливаемого на самолет двигателя на период формирования индивидуальной модели в модуле индивидуальных моделей первых роторных гармоник (МИМПРГ).

Одновременно в модуле контроля по нормируемым уровням первых роторных гармоник производится вычисление текущих значений относительных амплитуд той или иной роторной гармоники по формуле

$$Amp_i \text{ _отн} = 20 \log \frac{Amp_i \text{ _тек}}{Amp_i \text{ _ОВ}}, \text{ дБ},$$

где $Amp_i \text{ _тек}$ – текущее значение амплитуды, $Amp_i \text{ _ОВ}$ – значение амплитуды для уровня опасной вибрации.

Вычисленные значения относительных амплитуд передаются в МИМПРГ.

МИМПРГ отвечает за формирование и хранение в энергонезависимой памяти индивидуальных моделей первых роторных гармоник, а также оценку тренда этих моделей в процессе выработки ресурса.

Индивидуальные модели представляются в виде двухуровневых зависимостей относительных амплитуд от частот вращения соответствующих роторов и крутящего момента. Модель для установившихся режимов представляет собой набор поддиапазонных статистически-вероятностных оценок (максимальных и минимальных, средних значений и границ клиппирования) относительных амплитуд, определенных по первым Z полетам. Модель для переходных режимов представляет постоянное

значение для всех частот вращения роторов и крутящего момента, определенного как максимально-достигнутое значение во всех условиях эксплуатации по первым Z полетам.

Оценка трендов по времени выработки ресурса строится на вычислении S -дискриминанта средних значений моделей для установившихся ресурсов. При условии, если текущее значение S -дискриминанта в каком-либо поддиапазоне превысит заранее установленное значение (из опыта экспериментальных исследований работы метода рекомендуется значение равное семи), то в САУ самолета выдается диагностическое сообщение.

На рис. 2 приведена функционально-логическая модель модуля распознавания состояния шестеренчатых пар, подшипниковых узлов и степени загрязнения масла (МРСШПМ).

Поступающая в МРСШПМ оцифрованная в МПОИ информация «переупаковывается» относительно частоты вращения винта. Данная операция производится для того, чтобы компенсировать влияние низкочастотных процессов в системе «турбокомпрессор-трансмиссия-винт». Отсортированные таким образом данные проходят вейвлет-преобразование в соответствии с методом, представленным в работах [3, 4].

Модуль подготовки данных для частотной идентификации (МПДЧИ) производит расчет характеристических частот узлов двигателя в зависимости от частот вращения роторов.

На основании информации, поступающей из модуля выбора данных для контроля шестерен и подшипников редукторов и коробки приводов, в МРСШПМ формируются задания частотной идентификации спектров вейвлет-коэффициентов и взаимных спектров вейвлет-коэффициентов. Затем производится амплитудное сравнение составляющих, выделенных в соответствии с заданием частотной идентификации.

В соответствии с заданием частотной идентификации спектры вейвлет-коэффициентов и взаимные спектры вейвлет-коэффициентов проходят обработку в специальных согласующих фильтрах. В общем виде формула таких фильтров:

$$Conform Filter (CF) = \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i \bullet w_i)^2},$$

где

$$w_i = \left[\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k V_i(t) \right]^{-1}, \quad k < N.$$

Эти фильтры предназначены для оценки «боковых» и комбинационных составляющих относительно основных характерных составляющих. Цель такой обработки – раннее обнаружение изменений в соответствующих узлах. При отсутствии или незначительных изменениях выходное значение фильтра стремится к единице. В противном случае – к нулю. Результаты фильтрации и амплитуды

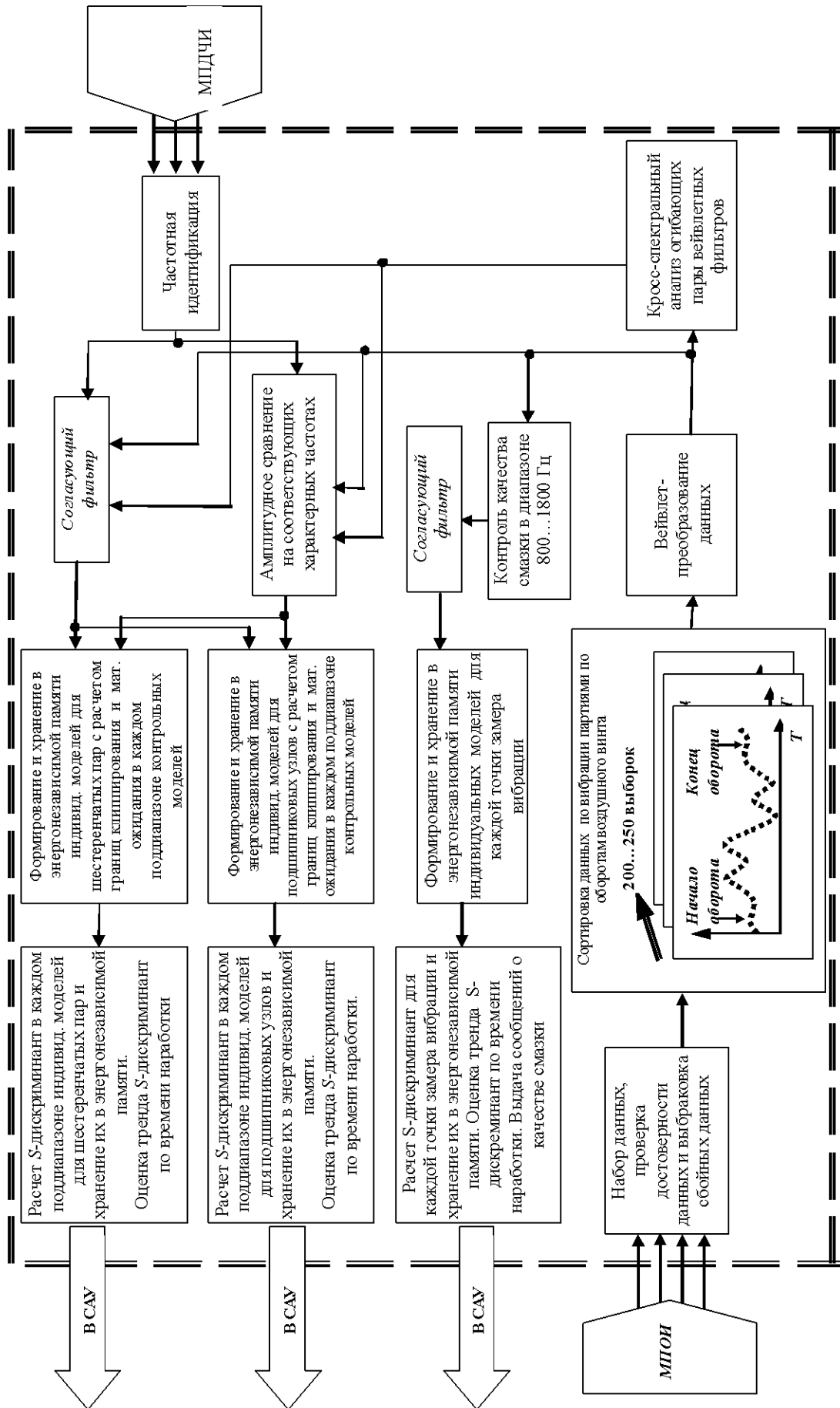


Рис. 2. Модель распознавания состояния шестеренчатых пар, подшипниковых узлов и степени загрязнения масла

литудных сравнений в дальнейшем проходят через процедуры обобщения в индивидуальных моделях и оценку трендов по аналогии с операциями в МИМПРГ. В МРСШПМ предусмотрена оценка степени загрязнения масла на основе обработки данных в частотном диапазоне 800–1800 Гц.

Предусмотренная в перечне задач по распознаванию технического состояния узлов и систем двигателя оценка состояния измерительных трактов «датчик вибрации – усилитель заряда» основана на сравнительной оценке (по схеме согласующих фильтров) составляющих в частотном диапазоне 1...10 Гц (самые высшие масштабы вейвлет-преобразования) и составляющей зубозацепления ступени перебора (средние масштабы вейвлет-преобразования).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе получила дальнейшее развитие модель диагностирования узлов ГТД, которая отличается от существующих применением непрерывного вейвлет-анализа и S-дискриминанта.

Проведенные экспериментальные исследования разработанных методов анализа вибрационных сигналов показали их эффективность при выделении признаков износа узлов двигателя.

При помощи усовершенствованного статистического метода предлагается проводить общую экспресс-диагностику отклонения технического состояния двигателя от нормального и следить за степенью развития дефектов. При помощи метода, основанного на применении вейвлетной фильтрации, проводится спектральный анализ вибрационного сигнала с целью выделения частотных характеристических составляющих, позволяющих судить о месте возникновения дефекта.

Таким образом, модель диагностирования, объединяющая в себе разработанные методы, делает возможным выявление признаков износа узлов ГТД на более ранних этапах развития и позволяет в автоматическом режиме следить за степенью развития дефектов.

Разработанная модель диагностирования может быть использована при проектировании перспективных систем управления силовых установок современных летательных аппаратов для анализа особенностей нестационарных сигналов и диагностирования состояний деталей и узлов ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юр, Т. В. Диагностирование технического состояния подшипников качения / Т. В. Юр, В. Н. Харитонов,

В. И. Дубровин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2009. – № 7 (64). – С. 166–170.

2. Соколова, А. Г. Вибромониторинг машинного оборудования и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений / А. Г. Соколова, Ф. Я. Балицкий // *Вестник научно-технического развития*. – 2008. – № 7 (11). – С. 45–50.
3. Юр, Т. В. Метод анализа технического состояния подшипников качения, основанный на использовании вейвлет-математики / Т. В. Юр, В. Н. Харитонов, В. И. Дубровин // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2010. – 10(77). – С. 187–191.
4. Юр, Т. В. Исследование фильтрующих свойств вейвлет-преобразования / Т. В. Юр, В. И. Дубровин, В. Н. Харитонов // *Радиоэлектроника, информатика, управління*. – 2010. – № 2. – С. 157–165.
5. Patent US 7013210 B2. Vibration monitoring system for gas turbine engines / Mcbrien, Gary M. (Glastonbury, CT), Gottwald, James (Amherst, NH); Goodrich Pump & Engine Control Systems, Inc. (West Hartford, CT, US). – filed on 16-Mar-2004, published on 14-Mar-2006.

Стаття надійшла до редакції 25.05.2011.

Юр Т. В., Харитонов В. Н., Дубровін В. І.

МОДЕЛЬ ДІАГНОСТУВАННЯ ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА S-ДИСКРИМІНАНТУ

У роботі запропоновано модель діагностування вузлів газотурбінного двигуна із застосуванням методу спектрального аналізу вібраційних сигналів на основі безперервного вейвлет-аналізу та S-дискримінанту. Розроблена модель може бути використана при проектуванні перспективних систем керування силових установок сучасних літальних апаратів для аналізу особливостей нестационарних сигналів і діагностування станів деталей і вузлів ГТД.

Ключові слова: модель діагностування, вібраційний сигнал, вейвлет-фільтрація, S-дискримінант, вузли ГТД.

Yur T. V., Haritonov V. N., Dubrovin V. I.

DIAGNOSTIC MODEL FOR GAS TURBINE ENGINE ELEMENTS BASED ON WAVELET ANALYSIS AND S-DISCRIMINANT

Diagnostic model for gas turbine elements based on wavelet spectral analysis method of vibration signals and S-discriminant is proposed in the work. The developed model could be used in construction of perspective control systems of aircraft engine units to analyze non-stationary signals and to give a diagnosis of engine units state.

Key words: model of diagnostics, vibrations, wavelet filtering, S-discriminant, gas turbine engine units.

ПОСТРОЕНИЕ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПАРАДИГМЫ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОТБОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА МАСКИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ

Получили дальнейшее развитие модель отрицательного отбора с использованием маскированных детекторов и метод ее обучения. Исследовались различные критерии останова для метода обучения модели. Разработан критерий останова, позволяющий выполнить своевременный останов процесса обучения, и таким образом ускорить данный процесс, а также сократить использование вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: отрицательный отбор, маскированный детектор, критерий останова.

ВВЕДЕНИЕ

При решении задач технического и медицинского диагностирования возникает необходимость представления диагностической модели в виде продукционных правил вида «если-то». Это обусловлено тем, что продукционные правила отличаются простотой представления знаний и организации логического вывода [1]. На практике зачастую оказывается целесообразным описывать antecedentes правил в бинарном виде, где логическая единица определяет наличие признака у экземпляра, а логический ноль – его отсутствие.

Традиционно используемые для построения диагностических моделей подходы [2, 3] обладают рядом недостатков. Так, например, извлечение правил из искусственных нейронных сетей предполагает наличие дополнительного этапа вербализации [2]. Деревья решений облегчают процедуру генерации правил, однако при решении задач большой размерности получаемые в конечном итоге правила существенно усложняются [3].

Устранение этих недостатков возможно обеспечить при использовании искусственных иммунных систем. В частности, предлагается использовать парадигму отрицательного отбора, благодаря таким ее особенностям, как независимость от представления данных, прозрачность процесса обучения и возможность обучения на экземплярах только одного класса [4]. Однако в существующих реализациях моделей отрицательного отбора значительно снижается точность классификации при увеличении размерности задачи [5].

Для снижения размерности задачи предлагается выполнять отбор наиболее информативных признаков, что позволит повысить точность результатов, увеличит способность модели к обобщению, ускорит процесс обучения и улучшит интерпретируемость результатов.

Цель данной работы заключается в создании метода на основе принципов иммунокомпьютинга, позволяющего строить диагностические модели для случая двух классов и представлять результаты работы в виде про-

дукционных правил, а также осуществлять отбор наиболее информативных признаков.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу построения диагностической модели для случая, когда все экземпляры описываются с помощью бинарных строк длиной l , где каждый разряд соответствует значению входного признака, характеризующего свойства экземпляра. Набор всех возможных l -битовых строк представляет собой пространство признаков U . Известно, что множество U можно представить в виде двух комплементарных подмножеств S и N , описывающих «свои» и «чужие» экземпляры соответственно. Пусть нам дана обучающая выборка S' , состоящая исключительно из «своих» экземпляров. Необходимо построить диагностическую модель, которую в терминах отрицательного отбора опишем набором детекторов D , такую, чтобы на основании этого набора любой экземпляр $x \in U$ можно было однозначно отнести к классу «своих» или «чужих» экземпляров. Также необходимо, чтобы набор детекторов D можно было преобразовать во множество продукционных правил вида «если-то», где antecedentes описывают наличие или отсутствие определенного признака у экземпляра, а консеквент определяет принадлежность экземпляра к множеству S или N . Antecedents правил должны учитывать наиболее информативные признаки.

2. ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ОТБОР В ИММУНОКОМПЬЮТИНГЕ

Модель отрицательного отбора в искусственных иммунных системах была первой моделью, основанной на поведении биологической иммунной системы.

Основными компонентами модели отрицательного отбора являются детекторы и правила сопоставления. Детекторы способны определить, является ли неизвестный экземпляр экземпляром «чужого» класса, или нет.

Для этого к экземпляру x и детектору d применяется правило сопоставления $match(d, x)$, которое возвращает значение «1», если детектор d активизировался при сопоставлении с экземпляром x , и «0» – в противном случае.

Принцип работы модели заключается в том, что модель содержит набор детекторов, которые толерантны к «своим» экземплярам: $match(d, s) = 0, \forall s \in S$. Поскольку модель отрицательного отбора решает задачу двухклассовой классификации (каждый экземпляр может быть отнесен ко множеству S или N), и $S \cup N = U, S \cap N = \emptyset$, то это предполагает, что детекторы будут реагировать на «чужие» экземпляры $n \in N$.

Первый метод обучения такой модели был описан в [6] и состоял из следующих этапов.

1. Этап генерации детекторов. На этом этапе случайным образом формируется набор кандидатов в детекторы C , как правило, превышающий по объему число экземпляров обучающей выборки S' .

2. Цензурирование. На данном этапе каждый кандидат в детекторы $c \in C$ сопоставляется с каждым «своим» экземпляром из обучающей выборки S' .

Если кандидат активизировался (значение правила сопоставления стало равным 1), то он уничтожается, поскольку не может обеспечить толерантность модели к «своим» экземплярам. Все оставшиеся кандидаты формируют набор детекторов D , который может быть использован для обнаружения «чужих» экземпляров.

Несмотря на очевидную ресурсоемкость данного метода, он получил дальнейшее развитие, что заключалось в разработке более оптимальных методов генерации набора детекторов (жадного метода, метода генерации детекторов за линейное время [7]).

3. МЕТОД ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОТБОРА С ПЕРЕСТАНОВКОЙ БИТОВ

Большинство реализаций модели отрицательного отбора обладают существенным недостатком – эффектом «дыр». «Дырами» называют такие экземпляры «чужого» класса, для которых не может быть сформирован ни один детектор, который оставался бы толерантным к «своим» экземплярам, и при этом реагировал на данный «чужой» экземпляр: $a \in N, \forall x \in U, match(x, a), \exists s \in S, match(s, a)$.

Возможное решение данной проблемы описано в [8], при этом модель отрицательного отбора модифицирована таким образом, что каждый детектор представляется не только битовой строкой, а также маской перестановки битов. Эта маска служит для получения дополнительной битовой строки на основе исходной. Маска определяет порядковые номера битов, которые участвуют в перестановке, а также их новое смещение относительно начала строки. Таким образом, с помощью маски формируется вторичное представление детектора (так-

же в виде битовой строки). Например, если детектор представлен исходной битовой строкой $d^1 = \{0,1,1,0\}$, а маска перестановки имеет вид $\{3,2,1,4\}$, то вторичное представление детектора будет иметь вид $d^2 = \{1,1,0,0\}$.

На этапе обучения такие детекторы с множественным представлением подвергаются цензурированию (удаляются) только в случае, если $\forall s \in S, match(d^i, s) = 1, i = 1, \dots, k$, где k – число представлений детектора. Однако при проведении классификации экземпляра x , детектор считается активизированным, если хотя бы одно его представление активизировалось: $match(d^i, x) = 1, i = 1, \dots, k$.

Очевидно, что это увеличит область покрытия детектора, однако приведет к увеличению ошибки первого рода («чужие» экземпляры будут ошибочно относиться к классу «своих»).

Первоначально предполагалось, что маска перестановки битов является общей для всей модели, однако в модели LISYS [9] было предложено использовать индивидуальные маски для каждого детектора в наборе. Применение маски перестановки битов в задаче обнаружения сетевых атак позволило обеспечить точность классификации на 32 % выше, по сравнению с базовым методом.

4. МАСКИРОВАНИЕ

Для уменьшения отрицательного влияния «дыр» на результаты классификации авторами предлагается модификация модели отрицательного отбора. Так же, как и в случае множественного представления детектора, в предлагаемой модели детекторы с маскированием характеризуются увеличенной областью покрытия.

Увеличение области покрытия достигается за счет использования замаскированных битов в строках, представляющих детекторы. Для этого алфавит Ω , на котором определена задача, должен быть дополнен специальным символом Z , обозначающим маскирование: $\Omega = \{0,1,Z\}$.

Будем считать, что при вычислении правил сопоставления замаскированный бит строки совпадает с любым значением бита другой строки. С использованием замаскированных детекторов становится возможным применение полного соответствия строк в качестве меры подобия двух детекторов, что было затруднительным ранее [10].

Жизненный цикл детектора также предлагается модифицировать, дополнив генерацию и цензурирование итеративным обучением детектора. Это позволит сократить число сгенерированных детекторов.

Извлечение правил из замаскированных детекторов является тривиальной задачей и заключается в следующем. Каждый детектор представляет собой одно продукционное правило, антецедент которого включает в себя все незамаскированные биты детектора (рассматриваемые как наличие или отсутствие соответствующего при-

знака), а консеквент всегда определяет принадлежность к классу «чужих» экземпляров.

5. МЕТОД ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОТБОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАСКИРОВАНИЯ ДЕТЕКТОРОВ

Для обучения модели отрицательного отбора с использованием маскирования детекторов предлагается применять описанный ниже метод.

1. Установить номер итерации: $I = 0$. Положить число детекторов, подвергнутых цензурированию: $N_c = 0$. Задать: $D = \emptyset$.

2. Сформировать замаскированный детектор $d = \{d_i\}$, где d_i – значение маски для n -го разряда. Для этого всем битам строки, описывающей детектор d , необходимо установить значение: $\forall n: d_i = Z$. Увеличить номер итерации: $I = I + 1$.

3. Если $\exists s \in S: match(d, s) = 1$, тогда перейти к этапу 3, в противном случае – к этапу 6.

4. Выбрать произвольным образом бит $d_i, i = 1, \dots, l$, $d_i = Z$. Если такого бита не существует, тогда установить $N_c = N_c + 1$ и перейти к этапу 2, в противном случае – перейти к этапу 5.

5. Установить значение i -го бита детектора: $d_i = \neg s_i$. Перейти к этапу 3.

6. Добавить детектор d в набор детекторов: $D = D \cup \{d\}$. Если выполняется критерий останова (который может быть основан на значениях N_c и I – данный вопрос подробнее рассмотрен в разделе б), тогда перейти к этапу 7, в противном случае – перейти к этапу 2.

7. Останов.

Важно отметить, что обучение детектора является «жадным» по своей природе. Поэтому для нахождения оптимального набора детекторов рекомендуется во время обучения отбирать «свои» экземпляры в случайном порядке.

Качество полученной диагностической модели будем характеризовать точностью классификации φ , которая определяется как отношение числа правильно распознанных экземпляров к общему числу экземпляров тестовой выборки.

Производительность работы метода можно повысить, добавив процедуру фильтрации набора детекторов D на этапе 5. На данном этапе необходимо удалить дублирующиеся детекторы, а также детекторы, поглощенные другими детекторами с меньшей строгостью.

Строгость замаскированного детектора определим как:

$$\tau(d) = \sum_{i=1}^l \{1 | d_i \neq Z\}.$$

Детектор d удаляется в результате цензурирования, если $\exists d^*, \forall i = \overline{1, l}, (d_i^* = Z) \vee (d_i^* = d_i) \wedge (\tau(d^*) < \tau(d))$.

При программной реализации данного метода рекомендуется хранить набор детекторов в виде связанного списка, упорядочив его по убыванию строгости детектора.

6. КРИТЕРИИ ОСТАНОВА МЕТОДА ОБУЧЕНИЯ МОДЕЛИ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО ОТБОРА

Предложенный метод генерирует вначале детекторы с меньшей строгостью, а затем заполняет получившиеся «дыры» более строгими детекторами. Поскольку заполнение «дыр» весьма несущественно сказывается на точности работы модели, то целесообразно прерывать обучение модели. Для этого необходим критерий останова, который позволит определить полноту покрытия пространства признаков детекторами из набора.

Рассмотрим критерии, на основе которых можно производить останов предложенного выше метода.

Наиболее простым с точки зрения вычислительной сложности является ограничение числа детекторов в популяции. Для этого требуется заранее оценить необходимое число детекторов для обеспечения требуемой точности классификации. Аналогичный подход применялся в [11], что позволило использовать заранее известное фиксированное число детекторов. Однако данный подход не пригоден для останова обучения маскированных детекторов, поскольку детекторы в наборе не являются однородными, а значит, их число не является показателем точности.

На рис. 1 представлен график, отображающий зависимость точности классификации φ от числа детекторов $N_D = |D|$ в серии вычислительных экспериментов с использованием предложенной модели отрицательного отбора, проведенных в рамках решения задачи диагностирования заболеваний сердца [12].

Из рис. 1 можно видеть, что с ростом числа детекторов N_D увеличивается точность классификации φ . Таким образом, для обеспечения высокой точности диагностической модели на основе клональной селекции необходимо использовать число детекторов, сопоставимое с объемом обучающей выборки. В то же время для обеспечения обобщающих свойств диагностической

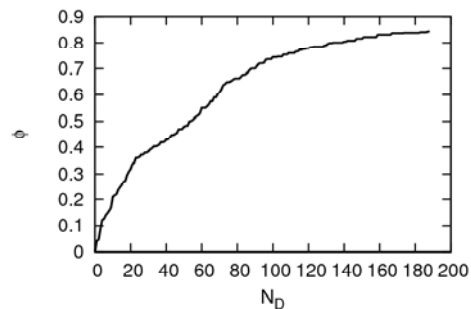


Рис. 1. График зависимости точности классификации φ от числа детекторов N_D

модели необходимо, чтобы число детекторов было меньше объема обучающей выборки.

Вместо числа детекторов в наборе предлагается использовать в качестве критерия останова степень покрытия пространства детекторами. Под степенью покрытия пространства заданным набором детекторов будем подразумевать соотношение объема пространства, занятого детекторами из набора D , к объему пространства, занятого «чужими» экземплярами:

$$p = \frac{V_D}{V_N}.$$

При этом считаем, что благодаря этапу цензурирования детекторы будут находиться только в «чужом» пространстве. Очевидно, что одиночный замаскированный детектор d может покрыть до $V(d)$ «чужих» эк-

земпляров, где $V(d) = \prod_{i=1}^l \{2 | d_i = Z\}$.

Оценка покрытия группы детекторов не является тривиальной задачей. Так, например, два замаскированных детектора d_1 и d_2 могут покрыть до $V(d_1) + V(d_2) - V(d_1 \wedge d_2)$, где $V(d_1 \wedge d_2)$ – число «чужих» экземпляров, которые покрываются как детектором d_1 , так и детектором d_2 . Для вычисления покрытия большого числа детекторов расчеты еще более усложняются.

Поэтому предлагается использовать приближенную оценку области покрытия детекторов.

В качестве оценки можно использовать число детекторов, которые подверглись цензурированию. Такие детекторы в результате обучения не содержат ни одного замаскированного бита и в то же время реагируют на какой-либо «свой» экземпляр. Логично предположить, что в процессе обучения число таких детекторов будет

возрастать, а значит, его можно использовать в качестве критерия останова метода.

На рис. 2 приведены экспериментально полученные графики зависимости точности работы модели Φ (рис. 2, а) и числа отвергнутых на этапе цензурирования детекторов N_c (рис. 2, б) от числа итераций обучения модели I , используемой при решении задачи диагностирования заболеваний сердца [12].

Из рис. 2, а следует, что с ростом числа итераций I наблюдается увеличение точности классификации Φ , а также числа детекторов, подвергнутых цензурированию N_c , что за счет исключения избыточных детекторов позволяет повысить обобщающие свойства диагностической модели на основе клональной селекции.

Также можно оценить степень покрытия пространства признаков детекторами с помощью метода, предложенного в [13]. Необходимо сгенерировать достаточно большое число случайных экземпляров в пространстве признаков и вычислить соотношение числа экземпляров, распознанных моделью как «чужие» к их общему числу. При таком подходе невозможно оценить абсолютную степень покрытия детекторами, однако можно анализировать ее динамику, и при снижении темпов роста выполнять останов.

Существенным недостатком такого подхода является необходимость создания, хранения и обработки слишком большого набора случайных тестовых данных. В связи с этим целесообразно осуществлять такую проверку не на каждой итерации, а с некоторым шагом.

Приближенную оценку степени покрытия предлагается определять следующим образом.

1. Сгенерировать случайную пробу t . Проба представляет собой замаскированный детектор высокой строгости, т.е. проба описывает несколько расположенных близко точек в пространстве признаков U , при этом число этих точек и их сгруппированность определяется строгостью пробы $\tau(t)$. Предлагается задать строгость $0,2l$.

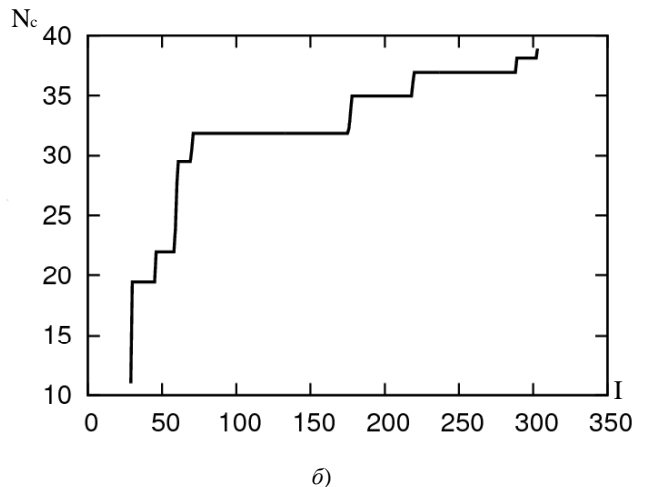
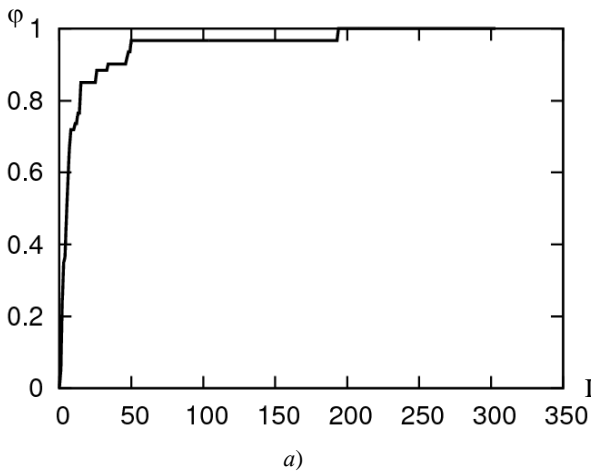


Рис. 2. График зависимости точности классификации Φ (а) и числа отвергнутых на этапе цензурирования детекторов N_c (б) от числа итераций I

2. Положить значение оценки покрытия $e^* = 1$.

3. Вычислить, насколько данная проба t распознается детекторами из набора D . Для этого для каждого детектора $d \in D$ необходимо выполнить подэтапы 3.1–3.4.

3.1. Положить: $e = 0$.

3.2. Если $\exists i, d_i \neq Z \wedge t_i \neq Z \wedge d_i \neq t_i$, то выбрать следующий детектор $d \in D$ и перейти к подэтапу 3.1.

3.3. Для всех $d_i = Z$, положить: $e = 2e$.

3.4. Если $e > e^*$, тогда положить: $e^* = e$. Выбрать следующий детектор $d \in D$ и перейти к подэтапу 3.1.

4. Останов.

В результате работы метода для пробы t значение e^* укажет, сколько точек, содержащихся в пробе, распознаются детекторами из набора D . Проанализировав данные о нескольких таких случайных пробах, можно судить об области покрытия детекторами модели.

Рекомендуется использовать вместо абсолютного значения e^* относительное значение:

$$e' = \frac{e^*}{2^{1-\tau(t)}}.$$

Это позволит использовать пробы различной строгости.

Останов процедуры обучения модели можно производить, если относительный показатель покрытия детекторов модели e' остается неизменным на протяжении нескольких последовательных итераций.

7. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для проведения экспериментов предложенная модель отрицательного отбора и метод ее обучения были реализованы на языке Python.

Предложенная модель отрицательного отбора обучалась и тестировалась на выборке SPECT [12], которая содержит сведения о пациентах с заболеваниями сердца. Каждый экземпляр описан 22 бинарными признаками и может быть отнесен к одному из двух классов (здоров или болен). Точность классификации после обучения составила 95 %. Для обеспечения такой точности потребовалось сформировать 47 детекторов. Малый размер набора детекторов показывает хорошую обобщающую способность предложенной модели.

Также предложенная модель отрицательного отбора применялась для решения задачи диагностирования повторных респираторных заболеваний у детей [14]. Классификация проводилась на основании данных о 23 бинарных признаках, которыми были представлены экземпляры выборки. В результате работы модели на основе 34 детекторов был получен набор продукционных правил, позволяющий определить предрасположенность пациентов к повторным респираторным заболеваниям. Полученная точность работы диагностической модели составила 98 %.

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о работоспособности разработанного метода и реализующего его программного обеспечения, а также позволяют рекомендовать их для использования при решении практических задач диагностирования.

ВЫВОДЫ

С целью решения актуальной проблемы автоматизации процесса диагностирования объектов, характеризуемых набором бинарных признаков, разработано математическое обеспечение, позволяющее синтезировать диагностические модели для определения класса состояний объектов диагностирования на основе парадигмы отрицательного отбора.

Научная новизна работы заключается в том, что получили дальнейшее развитие модель отрицательного отбора и метод ее обучения, которые модифицированы для использования маскированных детекторов, а также впервые предложен критерий останова метода обучения, что позволяет решать задачи диагностирования с использованием меньшего числа детекторов. Это повышает скорость обучения модели и позволяет снизить требования к вычислительным ресурсам. Также, благодаря маскированию битов в детекторе, учитываются только наиболее информативные признаки, и облегчается получение продукционных правил на основе набора детекторов.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработана программная реализация модели отрицательного отбора с использованием маскированных детекторов, которая может использоваться для решения практических задач технического и медицинского диагностирования.

Работа выполнена в рамках госбюджетных тем «Информационные технологии автоматизации распознавания образов и принятия решений для диагностирования в условиях неопределенности на основе гибридных нечеткологических, нейросетевых и мультиагентных методов вычислительного интеллекта» (№ гос. регистрации 0109U007673), «Методы, модели и устройства принятия решений в системах распознавания образов» (№ гос. регистрации 0110U002031).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Субботін, С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: навч. посібник / С. О. Субботін. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2008. – 341 с.
2. Нейроинформатика / [А. Н. Горбань, В. Л. Дунин-Барковский, А. Н. Кирдин и др.]. – Новосибирск : Наука. Сибирское предприятие РАН, 1998. – 296 с.
3. Quinlan, J. R. C4.5: Programs for Machine learning / J.R. Quinlan. – Massachusetts : Morgan Kaufmann Publishers, 1993. – 302 p.
4. Ji, Z. Revisiting negative selection algorithms / Z. Ji, D. Dasgupta // Evolutionary Computation. – 2007. – № 15. – P. 223–251.
5. Stibor, T. On the Use of Hyperspheres in Artificial Immune Systems as Antibody Recognition Regions / T. Stibor, J. Timmis, C. Eckert // Artificial Immune Systems : 5th international conference ICARIS-2006, Oeiras, 4–6 September 2006 : proceedings. – New York : Springer-Verlag, 2006. – P. 215–228.

6. *Forrest, S.* Self-Nonself Discrimination in a Computer / S. Forrest, A. S. Perelson, R. Cherukuri, L. Allen // *Research in Security and Privacy : IEEE Symposium, Oakland, 16–18 May 1994 : proceedings.* – Los Alamitos: IEEE, 1994. – P. 202–212.
7. *D'haeseleer, P.* An immunological approach to change detection: algorithms, analysis, and implications / P. D'haeseleer, S. Forrest, P. Helman // *Computer Security and Privacy : IEEE Symposium, Oakland, 6–8 May 1996 : proceedings.* – Los Alamitos: IEEE, 1996. – P. 110–119.
8. *Hofmeyr, S.* Architecture for an artificial immune system / S. Hofmeyr, S. Forrest // *Evolutionary Computation.* – 2000. – № 8. – P. 443–473.
9. *Balthrop, J.* Revisiting LISYS: parameters and normal behavior / J. Balthrop, S. Forrest, M. Glickman // *Evolutionary Computation: congress CEC'02, Honolulu, 12–17 May 2002 : proceedings.* – Los Alamitos: IEEE, 2002. – P. 1045–1050.
10. *Balthrop, J.* Coverage and generalization in an artificial immune system / J. Balthrop, F. Esponda, S. Forrest, M. Glickman // *Genetic and Evolutionary Computation: conference GECCO–2002, New York, 9–13 July 2002 : proceedings.* – San Francisco: Morgan Kaufmann, 2002. – P. 3 10.
11. *Farmer, J.* The immune system, adaptation, and machine learning / J. Farmer, N. Packard, A. Perelson // *Physica D : Nonlinear Phenomena.* – 1986. – № 2. – P. 187–204.
12. *Frank, A.* SPECT heart data set [Electronic resource] / A. Frank, A. Asuncion. – Irvine : University of California, 2010. – Access mode : <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/SPECT+Heart>.
13. *Ji, Z.* Negative selection algorithms: from the thymus to V-detector : dissertation ... doctor of philosophy / Z. Ji. – Memphis : The University of Memphis, 2006. – 337 p.
14. *Герасимчук, Т. С.* Использование искусственных иммунных систем для прогнозирования риска развития рекуррентных респираторных инфекций у детей раннего воз-

раста / Т. С. Герасимчук, С. А. Зайцев, С. А. Субботин // *Діагностика та лікування інфекційно опосередкованих соматичних захворювань у дітей: міжрегіональна науково-практична конференція, Донецьк, 10–11 лютого 2011 : матеріали.* – Донецьк : Норд-прес, 2011. – С. 27–29.

Стаття надійшла до редакції 04.05.2011.

Зайцев С. О., Суботін С. О.

ПОБУДОВА ДІАГНОСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ПАРАДИГМИ НЕГАТИВНОГО ВІДБОРУ З ВИКОРИСТАННЯМ ПРИНЦИПУ МАСКУВАННЯ ДЕТЕКТОРІВ

Дістали подальшого розвитку модель негативного відбору з використанням маскованих детекторів та метод її навчання. Досліджувалися різноманітні критерії зупину для методу навчання моделі. Розроблено критерій зупину, що дозволяє виконувати своєчасний зупин процесу навчання, і таким чином прискорити даний процес, а також скоротити використання обчислювальних ресурсів.

Ключові слова: негативна селекція, маскований детектор, критерій зупину.

Zaitsev S. A., Subbotin S. A.

THE DIAGNOSIS MODEL BUILDING ON THE BASIS OF NEGATIVE SELECTION PARADIGM USING THE PRINCIPLE OF DETECTOR MASKING

A new negative selection model using masked detectors with training method has been developed. Various stopping criteria for the training method have been investigated. The stopping criterion is proposed. It allows to terminate training procedure, to speed-up training process and to reduce computational resources.

Key words: negative selection, masked detector, stopping criterion.

УДК [519.674:519.688]:62-11

Чопоров С. В.

Магістр Запорозького національного університета

ПОСТРОЕНИЕ НЕРАВНОМЕРНЫХ ДИСКРЕТНЫХ СЕТОК ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗЕ ТЕОРИИ R-ФУНКЦИЙ

В работе рассмотрена проблема математического моделирования геометрических объектов на базе теории R-функций. Предложен подход к построению неравномерных сеток шестигранных элементов.

Ключевые слова: R-функция, сетка, шестигранный элемент, математическая модель.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Исследование прочности и долговечности проектируемых инженерных конструкций является важной составляющей современной техники. В настоящее время для этих целей широко применяется компьютерное моделирование, позволяющее заменить длительное и дорогостоящее испытание опытного образца изучением соответствующих математических моделей. Следовательно, актуальной является проблема построения математических моделей геометрических объектов, которые

в пространстве занимают определенный объем. Например, сложные инженерные конструкции, сооружения, машины, механизмы и прочее. По сути, речь идет о решении так называемой обратной задачи аналитической геометрии, когда для имеющейся геометрической области строится ее аналитическое описание.

Множество физических объектов реального мира можно определить как сплошные тела, геометрическое моделирование которых можно рассматривать как процесс формализации представления геометрии существу-

ющего или воображаемого объекта. Наиболее общим методом определения множества точек, принадлежащих объекту, является введение предиката, являющегося индикатором принадлежности объекту точки пространства (неявное определение). Простейшей формой такого предиката будет ограничение на знак некоторой действительной функции в виде

$$\Omega = \{(x, y, z) / F(x, y, z) \geq 0\},$$

где неявная функция $F(x, y, z)$ больше нуля внутри области, соответствующей телу Ω , равна нулю на границе и меньше нуля вне тела. Например, для построения математической модели тела в форме эллипсоида с центром в точке (x_0, y_0, z_0) необходимо определить коэффициенты a, b и c в формуле

$$F_{\text{ellipsoid}}(x, y, z) = 1 - \frac{(x - x_0)^2}{a^2} - \frac{(y - y_0)^2}{b^2} - \frac{(z - z_0)^2}{c^2}.$$

Математические модели геометрических объектов нетривиальной формы могут быть определены при помощи более сложных функций конструктивно, используя логические комбинации более простых функций. Такие действия с математическими функциями логически эквивалентны стандартным операциям над множествами. В работах Владимира Логвиновича Рвачева [1–3] разработан достаточно общий подход, получивший название теории R -функций, в котором предложены принадлежащие классу C^m функции для описания теоретико-множественных операций. Наиболее распространенная на практике система R -функций имеет вид (1). Например, тело в форме объединения двух шаров (рис. 1), один из которых радиуса r_0 с центром в начале координат, второй – радиуса r_1 с центром в точке $(0, r_0, 0)$ можно описать формулой (2).

$$\left\{ \begin{array}{l} C \equiv \text{const}, \\ \neg x \equiv -x, \\ x_1 \wedge x_2 \equiv x_1 + x_2 - \sqrt{x_1^2 + x_2^2}, \\ x_1 \vee x_2 \equiv x_1 + x_2 + \sqrt{x_1^2 + x_2^2}. \end{array} \right. \quad (1)$$

$$F_{\text{balls}}(x, y, z) = (r_0^2 - x^2 - y^2 - z^2) \vee [r_1^2 - x^2 - (y - r_0)^2 - z^2]. \quad (2)$$

Поскольку математические модели геометрических объектов в основном используются при численном анализе различных параметров состояния сложных инженерно-технических объектов, на практике требуется построение конечно-элементных дискретных математических моделей. Для этого при использовании R -функций, в первую очередь, требуется разработка методов построения дискретных моделей областей, описанных с помощью неявных функций.

Среди конечных элементов, используемых в пространстве, наиболее распространенными являются элементы тетраэдрической и шестигранной форм. Преимуществом первого типа элементов является большая топологическая гибкость, второго – возможность уменьшения размерности систем линейных алгебраических уравнений за счет использования меньшего количества элементов (необходимо использовать пять тетраэдров для представления объема элемента, представленного одним шестигранником, рис. 2).

При этом функции формы линейного тетраэдрического конечного элемента имеют вид

$$N_T(x, y, z) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z, \quad \alpha_i \in R, i = \overline{0,3}, \quad (3)$$

а функции формы шестигранного конечного элемента –

$$N_H(x, y, z) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 y + \alpha_3 z + \alpha_4 xy + \alpha_5 xz + \alpha_6 yz + \alpha_7 xyz, \quad \alpha_i \in R, i = \overline{0,7}. \quad (4)$$

Наличие нелинейных членов в соотношении (4) приводит к тому, что градиенты шестигранного конечного элемента (в отличие тетраэдрического) не постоянны и изменяются вдоль одной из координатных плоскостей. Таким образом, применение шестигранных конечных элементов является более предпочтительным в вычислительном плане.

На практике в основном требуется построение нерегулярных сеток, где количество конечных элементов сгущается в местах, где расположены так называемые сингулярности (особенности) объекта (острые углы, отверстия, трещины и т. п.). С другой стороны, построение первоначального приближенного разбиения требует последующей его оптимизации.

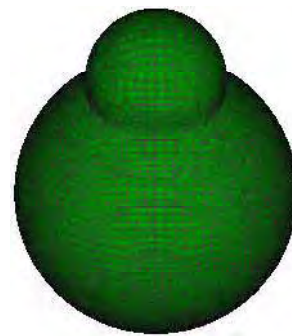


Рис. 1. Тело в форме объединения двух шаров: $r_0 = 0,8$, $r_1 = 0,4$

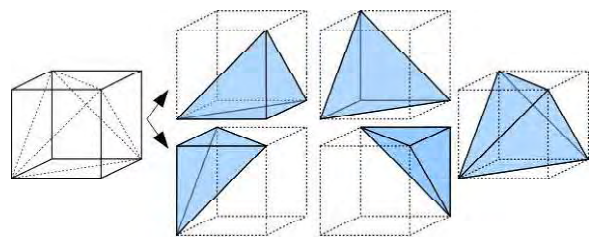


Рис. 2. Представление шестигранника пятью тетраэдрами

Таким образом, разработка методов построения неравномерных дискретных моделей трехмерных объектов, заданных при помощи R -функций, на базе шестигранных конечных элементов является сложной и актуальной задачей.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Методы построения нерегулярной сетки шестигранных конечных элементов можно разделить на прямые и не прямые. Прямые методы используют непосредственное построение шестигранных ячеек внутри заданной границы, в то время как не прямые базируются на преобразовании некоторого исходного дискретного представления области.

Среди прямых методов можно выделить фронтальные методы (наиболее распространенной тут идеей является исчерпание области пласт за пластом, формируя таким образом и дискретизацию границы, и дискретизацию внутренней части области [4]) и методы, использующие блочную декомпозицию [5–7] или суперпозицию [8–10].

Методы декомпозиции и блочной декомпозиции основаны на идее (полуавтоматической или автоматической) декомпозиции тела на кубоподобные блоки, для каждого из которых дискретизация может быть получена отображением на дискретизацию единичного куба, с последующим объединением дискретизаций частей. Для автоматизации процесса декомпозиции на блоки используются срединные поверхности. Достоинством данной группы методов является их высокая скорость и качество получаемой сетки. Основным недостатком – затруднительность их применения для дискретизации сложных нестандартных областей.

Основная идея методов суперпозиции заключается в использовании начальной сетки, которая может быть более или менее просто создана для части пространства, содержащей объект, и последующей адаптации сетки к границе области. Ключевым шагом данной группы методов является генерация сетки высокого качества около границы объекта. Для адаптации начальной сетки могут быть использованы техники изоморфизма [8, 9] и проекции. При всей прагматичности такого подхода результирующие алгоритмы данного типа методов является весьма трудоемкими для реализации [11].

Непрямые методы можно разделить на фронтальные, в основе которых идея послышной конвертации начальной сетки тетраэдров [12, 13], методы, использующие двойственное представление (STC-представление [14]) и методы поэлементной конвертации (например, на основе шаблонов). Преимуществом данной группы методов является отсутствие вырожденных элементов. Недостатком – необходимость построения качественной начальной дискретизации, что само по себе является трудоемкой задачей.

МЕТОД СУПЕРПОЗИЦИИ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ НА БАЗЕ ТЕОРИИ R -ФУНКЦИЙ

Пусть тело Ω представлено неявной функцией на базе теории R -функций. Использование методов теории R -функций при неявном представлении тела Ω требует учета особенностей такого представления при разработке алгоритмов получения дискретного представления. Неявное представление дает правило для проверки принадлежности точки Ω , однако, не дает правило генерации системы точек и топологии элементов, образующих Ω . Это делает более предпочтительным использование в качестве алгоритмической базы метода суперпозиции совместно с сеточным методом и техникой изоморфизма [8–10] на шаге адаптации пограничного слоя элементов. Тогда общий алгоритм получения дискретного представления тела заданного неявной функцией можно представить схемой, приведенной на рис. 3.

На первом шаге алгоритма для формирования начальной сетки достаточно покрыть область равномерной сеткой с шагом h и определить значение R -функции в узлах сетки. Затем последовательно отсеивать элементы, в узлах которых есть внешние точки или которые не соответствуют критерию близости к границе области (на расстоянии $\Delta = 0,5h$ есть внешние точки).

Граница полученной таким образом начальной сетки является многогранником, каждая грань которого является четырехугольником. Следовательно, ее можно рассматривать как неструктурированную сетку четырехугольных элементов, для которой может быть получена изоморфная (однозначно соответствующая) сетка на границе тела путем установления для каждого узла соответствующего граничного, а для каждого ребра границы начальной сетки – ребро на границе. Таким образом,

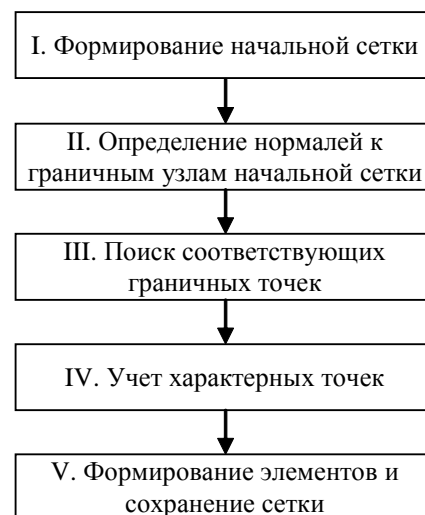


Рис. 3. Общая схема построения дискретной модели

каждому четырехугольнику будет соответствовать четырехугольная грань на границе тела, которые совместно определяют шестигранный элемент.

На втором шаге к каждому граничному узлу начальной сетки определяется нормаль как среднее арифметическое нормалей смежных в узле граней (рис. 4). Полученные нормали определяют направления для поиска соответствующих граничных точек на третьем шаге.

На четвертом шаге происходит учет характерных точек (геометрических особенностей, концентраторов напряжений и т. д.), так как утеря таковых может приводить к значительной утери точности при использовании полученного дискретного представления численными методами. При этом характерные точки могут быть учтены как при помощи техники перемещения необходимого граничного узла, так и при помощи коррекции направления нормали соответствующего узла начальной сетки и последующей репродукции.

На последнем шаге алгоритма при помощи техники изоморфизма формируются элементы, соединяя узлы начальной сетки с соответствующими узлами на границе (рис. 5).

Следует отметить, что в результате применения описанного подхода генерируются элементы приблизительно одинакового размера, что позволяет применять для последующего улучшения качества сеток методы на основе локального сглаживания Лапласа.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ШАБЛОН ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ НЕРАВНОМЕРНЫХ СЕТОК

Наиболее распространенным подходом к получению неравномерной начальной сетки для методов на основе суперпозиции является использование множества шабло-

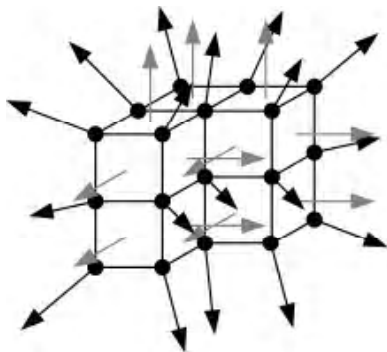


Рис. 4. Опеделение нормалей к узлам начальной сетки

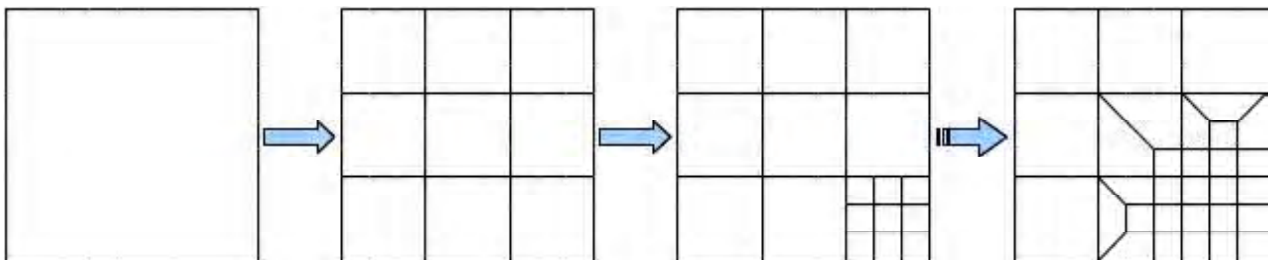


Рис. 6. Идея сгущения сетки

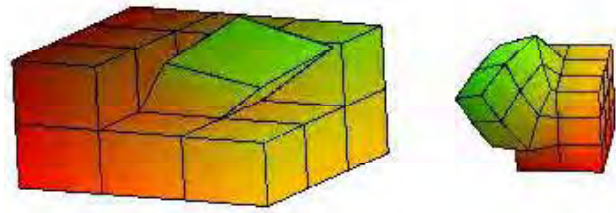


Рис. 5. Построение граничного слоя шестигранных элементов

лонов сгущения с таблицами соответствия шаблонов [8–10]. Идея алгоритма заключается в рекурсивном разбиении области, в которую помещен исходный объект, на 27 элементов до тех пор, пока в узлах сетки удовлетворяет некоторая управляющая функция (пример такого сгущения на плоскости приведен на рис. 6), с последующим восстановлением топологии сетки. При этом в одном узле не должны быть смежными части, у которых разность уровней рекурсии больше единицы.

При построении неравномерной адаптивной сетки для трехмерной области с учетом вращения получается 22 различных конфигурации (256 без учета вращения, рис. 7), покрывающих все возможные ситуации взаимного расположения частей с разными уровнями рекурсии. Такое количество необходимых конфигураций делает трудным их построение, верификацию и программирование.

В работах [8, 9] предложено использовать упрощенное множество шаблонов, которое изображено на рис. 8.

В работе [10] разработано альтернативное множество шаблонов (рис. 9), которое позволяет генерировать неравномерные сетки с меньшим использованием шаблона на 8 (разбиения куба на 27 частей).

Однако и первое, и второе множество шаблонов в ряде случаев приводит к необходимости использования шаблона, соответствующего конфигурации 8 (разбиению на 27 элементов), что приводит к избыточному сгущению сетки. Для решения этой задачи, в таких случаях, можно использовать универсальный шаблон (рис. 10), конфигурации граничных элементов которого будут соответствовать одному из шаблонов множества 2.

Для корректного определения координат внутренних узлов может быть использовано изопараметрическое преобразование. Такой подход может быть использован также для сгущения построенных дискретных моделей.

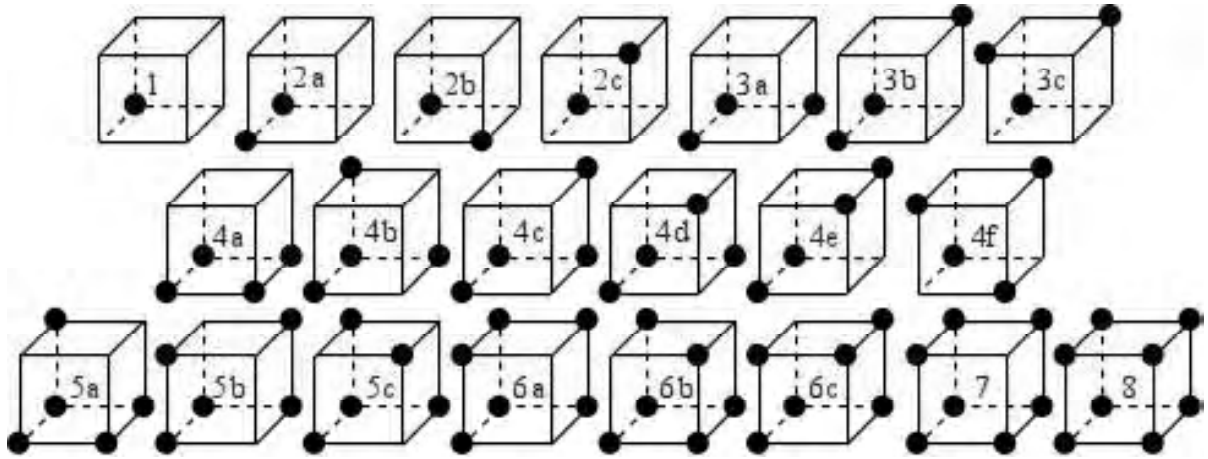


Рис. 7. Возможные конфигурации в трехмерном пространстве

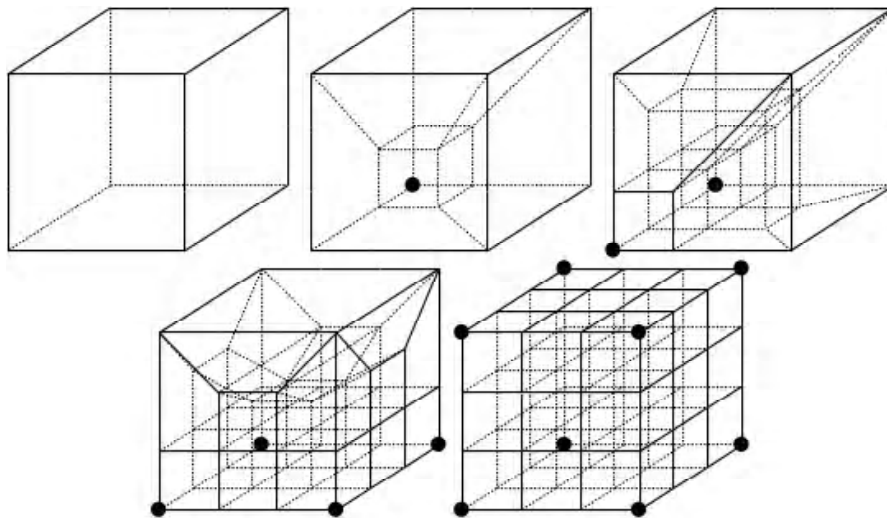


Рис. 8. Множество шаблонов 1

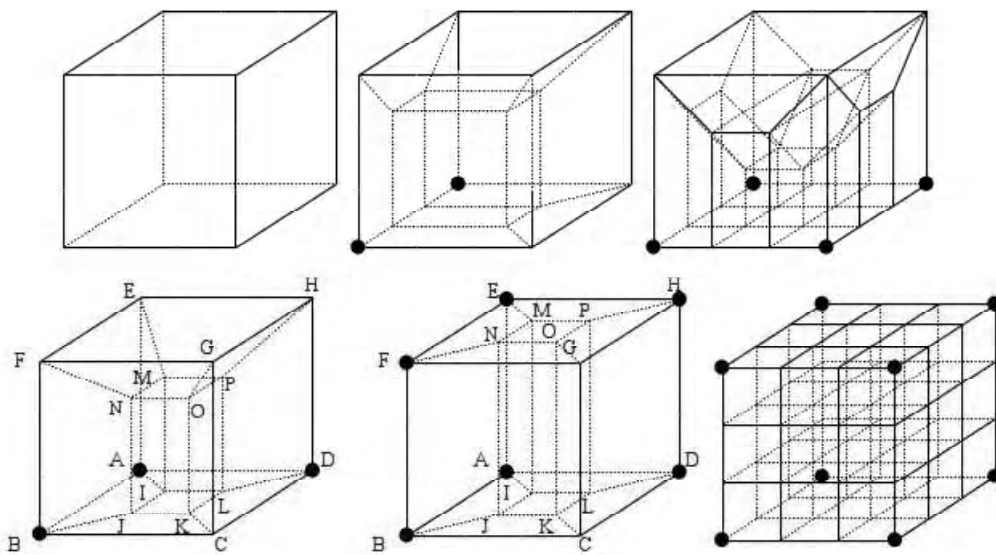


Рис. 9. Множество шаблонов 2

ВЫВОДЫ

Таким образом, в работе разработан подход к получению дискретных моделей, соответствующих неявным аналитическим моделям, построенным на базе теории

R-функций. Предложен подход к построению неравномерных дискретных моделей на базе разработанного универсального шаблона. Результаты работы реализованы в виде подсистемы САПР, которая может быть ис-

пользована при моделюванні і проектуванні різних технічних деталей і об'єктів (некоторые при-
меры приведены на рис. 11).

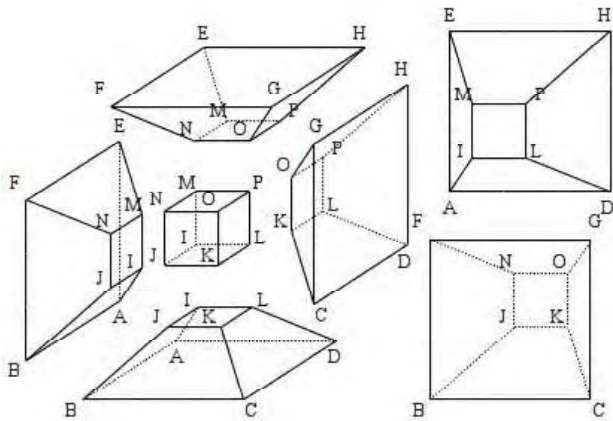


Рис. 10. Универсальный шаблон

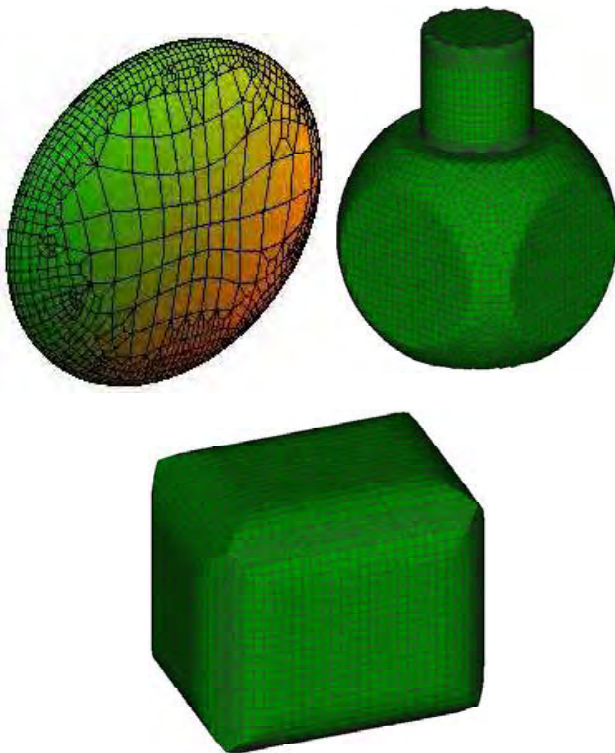


Рис. 11. Примеры неравномерных сеток

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рвачев, В. Л. Теория R -функций и некоторые ее приложения / В. Л. Рвачев. – К. : Наукова думка, 1982. – 552 с.
2. Рвачев, В. Л. Новые подходы к построению уравнений трехмерных локусов с помощью R -функций / В. Л. Рвачев, А. В. Толок, Р. А. Уваров, Т. И. Шейко // Вісник Запорізького державного університету. – 2000. – № 2. – С. 119–130.
3. Рвачев, В. Л. Введение в теорию R -функций / В. Л. Рвачев, Т. И. Шейко // Проблемы машиностроения. – 2001. – Т. 4, № 1–2. – С. 46–58.
4. Staten, M. L. Unconstrained Paving & Plastering: A New Idea for All Hexahedral Mesh Generation / M. L. Staten,

- S. J. Owen, T. D. Blacker // Proceedings, 14th International Meshing Roundtable. – Sandia National Laboratories: Springer-Verlag, 2005. – P. 399–416.
5. Armstrong, C. G. Medials for Meshing and More / C. G. Armstrong, D. J. Robinson, R. M. McKeag, T. S. Li, S. J. Bridgett, R. J. Donaghy, C. A. McGleenan // Proceedings, 4th International Meshing Roundtable. – Sandia National Laboratories, 1995. – P. 277–288.
6. Holmes, D. J. Generalized Method of Decomposition Solid Geometry into Hexahedron Finite Elements / D. J. Holmes // Proceedings, 4th International Meshing Roundtable. – Sandia National Laboratories, 1995. – P. 141–152.
7. Liu, S. -S. Automatic Hexahedral Mesh Generation by Recursive Convex and Swept Volume Decomposition / S.-S. Liu, R. Gadh // Proceedings, 6th International Meshing Roundtable. – Sandia National Laboratories, 1997. – P. 217–231.
8. Schneiders, R. A Grid-based Algorithm for the Generation of Hexahedral Element Meshes / R. Schneiders // Engineering with Computers. – 1996. – № 12. – P. 168–177.
9. Schneiders, R. Octree-based Generation of Hexahedral Element Meshes / R. Schneiders, R. Schindler, F. Weiler // 5th Annual International Meshing Roundtable. – 1996. – P. 205–216.
10. Ito, Y. Octree-based reasonable-quality hexahedral mesh generation using a new set of refinement templates / Yasushi Ito, Alan M. Shih, Bharat K. Soni // International Journal For Numerical Methods in Engineering. – 2009. – № 77 (13). – P. 1809–1833.
11. Thompson, J. F. Hand book of grid generation / Joe F. Thompson, Bharat K. Soni, Nigel P. Weatheril. – New York: CRC Press, 1999. – 1200 p.
12. Owen, S. J. H-Morph: An Indirect Approach to Advancing Front Hex Meshing / S. J. Owen, S. Saigal // International Journal for Numerical Methods in Engineering. – 2000. – № 1 (33). – P. 289–312.
13. Owen, S. J. Hex-domain mesh generation using 3D constrained triangulation / S. J. Owen // Computer Aided Design. – 2001. – №3(33). – P. 211–220.
14. Murdoch, P. The spatial twist continuum: A connectivity based method for representing all-hexahedral finite element meshes / P. Murdoch, S. E. Benzley, T. D. Blacker, S. A. Mitchel // Finite Elements in Analysis and Design. – 1997. – № 28. – P. 137–149.

Стаття надійшла до редакції 11.05.2011.

Choporov S. V.

GENERATION OF NONUNIFORM HEXAHEDRAL ELEMENT MESHES FOR FUNCTIONAL MODELS ON THE BASIS OF R -FUCTIONS

The problem of mathematical modeling of geometrical objects on the basis of R -functions is described in the article. Author propose an approach for generation of nonuniform hexahedral element meshes.

Key words: R -function, mesh, hexahedral element, mathematical model.

Чопоров С. В.

ПОБУДОВА НЕРІВНОМІРНИХ ДИСКРЕТНИХ СІТОК ДЛЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ НА БАЗІ ТЕОРІЇ R -ФУНКЦІЙ

В роботі розглянута проблема математичного моделювання геометричних об'єктів на базі теорії R -функцій. Запропоновано підхід до побудови нерівномірних сіток шестигранних елементів.

Ключові слова: R -функція, сітка, шестигранний елемент, математична модель.

ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЙ ПОДХОД ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛЕЙ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Предложена методика построения динамической модели системы с локализованными свойствами на основе объектно-ориентированного подхода. Рассмотрен пример системы автоматического регулирования температуры рабочего тела с пропорционально-интегрально-дифференциальным законом регулирования, приведена методика построения классов и функций, составляющих программную реализацию модели, обсуждаются возможности предлагаемой методики.

Ключевые слова: компьютерное моделирование систем, моделирование динамики системы, объектно-ориентированный подход, система терморегулирования.

ВВЕДЕНИЕ

Параллельно с развитием аппаратных и программных средств вычислительной техники интенсивно эволюционируют и общие подходы моделирования сложных систем различной природы. Однако имеющиеся в настоящее время методы построения динамических моделей технических систем все же не удовлетворяют в полной мере растущим запросам разработчиков систем различной этимологии [1, 2]. Остается открытым вопрос о формализации синтеза компьютерной модели сложной системы из заданного множества субмоделей. Определенным потенциалом в создании более продвинутых методов моделирования систем обладает подход, который называют объектно-ориентированным.

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ

Ниже рассмотрена методика построения динамической модели технической системы на основе объектно-ориентированного подхода и ее программной реализации. Хорошим примером (не слишком громоздким и, в то же время, достаточно характерным) системы как объекта моделирования, является система автоматического регулирования температурой некоторого рабочего тела, структура которой показана на рис. 1. Модель системы в нашем примере состоит из следующих элементов:

- 1) рабочее тело;
- 2) нагреватель;
- 3) регулятор;

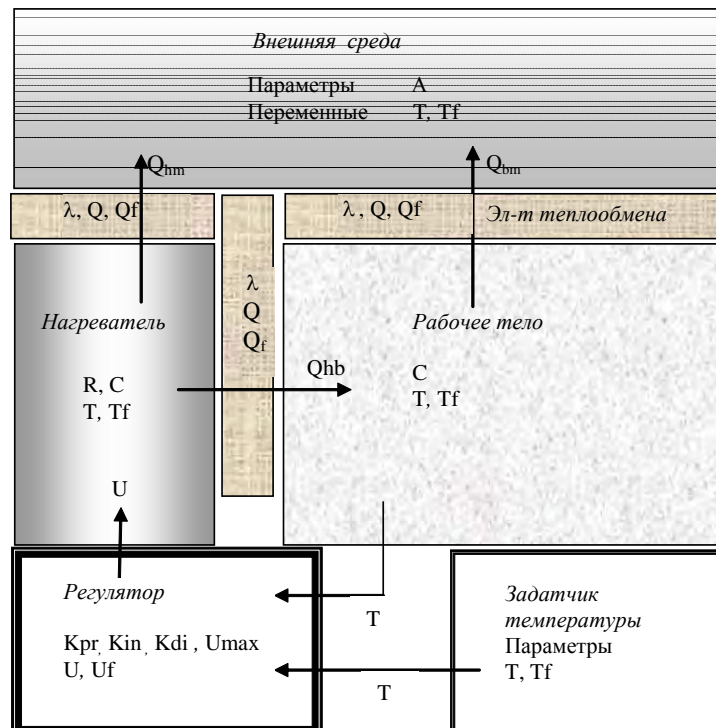


Рис. 1. Схема взаимодействия объектов в системе терморегулирования

- 4) элемент теплообмена «нагреватель – внешняя среда»;
- 5) элемент теплообмена «рабочее тело – внешняя среда»;
- 6) элемент теплообмена «нагреватель – рабочее тело»;
- 7) датчик температуры;
- 8) внешняя среда.

Принимается следующая методология моделирования.

Элементы системы типизированы, т. е. каждый из элементов системы принадлежит определенному виду. Модель элемента системы данного вида представлена соответствующим классом. Состояние элемента системы определяется внутренними процессами, отображаемыми в субмодели, и воздействиями на него других элементов системы. Состояние элемента системы описывается набором переменных его состояния.

Каждый из элементов системы получает информацию о состоянии тех элементов системы, которые оказывают на него влияние. Обобщенная информация о наличии такого влияния для каждого элемента системы представлена матрицей межэлементных воздействий M , которая для рассматриваемой системы имеет следующий вид:

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	1	1	0	0
2	0	0	1	1	0	1	0	0
3	1	0	0	0	0	0	1	0
4	0	1	0	0	0	0	0	1
5	1	0	0	0	0	0	0	1
6	1	1	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0

Номера строк и номера столбцов в этой матрице соответствуют номерам элементов системы, перечисленным ранее. Единичное значение элемента матрицы M_{ik} означает, что элемент с номером i испытывает воздействие со стороны k -того элемента системы. Матрица M используется для построения интерфейсов функций, описывающих поведение элементов системы.

Моделирование поведения системы выполняется на заданном отрезке времени $[0, t_m]$. Временной шаг моделирования может быть переменным. При этом выполнение каждого шага включает в себя 3 этапа.

1. Каждый элемент системы получает информацию о состояниях воздействующих на него в данный момент времени элементов.

2. Каждый из элементов системы вычисляет свое состояние в следующий момент времени с учетом величины текущего шага моделирования (не переходя при этом в следующее состояние). Вычисления выполняются на основе соответствующей субмодели элемента системы.

3. Каждый из элементов системы реализует (переводит себя в) следующее состояние.

В соответствии с идеологией объектно-ориентированного моделирования (ООМ) все элементы модели системы типизированы, т. е. относятся к определенному классу и каждый элемент модели системы представляется объектом соответствующего класса. При этом струк-

тура, свойства и поведение объекта данного класса, порождаемого моделирующей программой, однозначно определяется описанием этого класса. Класс определяет информационную структуру элемента модели системы и содержит набор функций (методов), определяющих эволюцию его состояния. При этом структура межэлементных взаимодействий, определяемая матрицей M , представлена в соответствующих классах в виде списков аргументов функций – членов класса, осуществляющих выполнение второго этапа очередного шага моделирования системы.

СТРУКТУРА И ОПИСАНИЕ КЛАССОВ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ

Обобщенную структуру класса, описывающего произвольный элемент системы, можно представить следующим образом:

```
class <имя типа элемента>
{
  <список параметров модели элемента системы
  с указанием их типов>
  < описание переменных состояния текущего мо-
  мента времени >
  < описание переменных состояния следующего
  момента времени >
  void next(список аргументов - состояний воз-
  действующих элементов);
  void step(); // реализация
  следующего состояния системы
  < конструкторы и другие стандартные элементы
  класса>
};
```

Приведем описание каждого из классов рассматриваемой модели. Описание конструкторов и других стандартных элементов классов опустим для краткости.

Класс Body (рабочее тело)

```
class Body
{public:
  double C;
  double T, Tf;
  void next(Inter<Heater, Body>&,
  Inter<Body, Medium>&);
  void step() { T=Tf; }
  Body() { C=0.0; T=0.0; Tf=0.0; }
  Body(double c, double x) { C=c; T=x; }
};
void Body::next(Inter<Heater, Body>& hb,
Inter<Body, Medium>& bm)
{ Tf= T+(h/C)*(hb.Q-bm.Q);
}
```

Модель элемента системы типа Body имеет один параметр: теплоемкость рабочего тела C , по одной переменной состояния для текущего и следующего моментов времени T и Tf (температура рабочего тела). Функция next, вычисляющая следующее состояние системы (т. е. значение Tf), через список своих аргументов получает информацию о состояниях элементов теплообмена «нагреватель – рабочее тело» и «рабочее тело – внешняя среда». Приведенный алгоритм для функции next

класа Body соответствует рабочей формуле первого порядка интегрирования дифференциального уравнения теплового баланса рабочего тела:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{C} (Q_{hb} - Q_{bm}), \quad (1)$$

где Q_{hb} – тепловой поток от нагревателя к рабочему телу, Q_{bm} – тепловой поток от рабочего тела во внешнюю среду (в приведенном описании класса эти величины имеют имена hb.Q и bm.Q).

Класс Heater (нагреватель)

```
class Heater
{ public:
double R, C;
double T, Tf;
void next(Regul&, Inter<Heater,Medium>&,
Inter<Heater,Body>&);
void step() { T=Tf; }
Heater(double r, double c, double To) { R=r;
C=c; T=To; }
};
void Heater::next(Regul& reg,
Inter<Heater,Medium>& hm, Inter<Heater,Body>&
hb)
{ double P=sqr(reg.U)/R;
Tf=T+(h/C)*(Phm.Q-hb.Q);
}
```

Модель нагревателя имеет два параметра: R – электрическое сопротивление нагревателя, C – его теплоемкость. Параметром состояния является температура (переменные T и Tf). Функция next получает информацию о состоянии регулятора, а также элементов теплообмена «нагреватель – внешняя среда» и «нагреватель – рабочее тело». Алгоритм функции next включает в себя вычисление тепловой мощности нагревателя (входного теплового потока):

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (2)$$

и температуры для следующего момента времени. Для вычисления последней использована рабочая формула для уравнения теплового баланса нагревателя такого же вида, как и в случае рабочего тела.

Класс Regul (регулятор)

```
class Regul
{public:
double Umax, Kpr, Kin, Kdi;
double Uf, U;
void next(Body&, Targ&);
void step() { U=Uf; }
Regul(double Um, double kpr, double kin, double
kdi)
{Umax=Um; Kpr=kpr; Kin=kin; Kdi=kdi; U=0; }
};
void Regul::next(Body& body, Targ& targ)
{static int M; M++;
```

```
static double S=0.0;
static Body body0;
static Targ targ0;
if (M==1) { body0=body; targ0=targ; }
double Dx=targ.T-body.T, Dxo=targ0.T-body0.T,
D=(Dx-Dxo)/h;
S+=h*(Dx+Dxo)/2;
Uf= Kpr*Dx+Kin*S+Kdi*D;
if (Uf<0) Uf=0.0;
if (Uf>Umax) Uf=Umax;
body0=body; targ0=targ;
}
```

Субмодель регулятора соответствует универсальному пропорционально-интегрально-дифференциальному закону регулирования. Параметрами модели регулятора являются величины: Kpr – коэффициент пропорционального регулирования, Kin – коэффициент интегрального регулирования, Kdi – коэффициент дифференциального регулирования, Umax – максимальное напряжение на выходе регулятора. Параметром состояния является напряжение на выходе регулятора (переменные U, Uf).

Функция next построена на основе уравнения пропорционально-интегрально-дифференциального регулирования. Напряжение U, выдаваемое регулятором, определяется значением и поведением во времени температуры рабочего тела T и температуры датчика Z:

$$U = K_{pr}(Z-T) + K_{in} \int_0^t (Z-T)dt + K_{di} \frac{d}{dt}(Z-T), \quad (3)$$

Класс Inter (элемент теплообмена)

Основным назначением субмодели вида «элемент теплообмена» является описание механизма передачи тепла от одного элемента системы к другому. Хотя такая субмодель может учитывать и другие сущности. В нашем примере элементы теплообмена являются безинерционными и, таким образом, представляют механизм теплопередачи в «чистом виде».

При построении данного класса используются возможности параметризованных классов (шаблонов). Класс Inter является шаблоном с параметрами type1 и type2, с помощью которых передаются типы воздействующих объектов – элементов системы.

```
template <class type1, class type2>
class Inter
{ public:
double Ld;
double Q, Qf;
Inter(double ld) { Ld=ld; Q=0; }
void next(type1, type2);
void step() { Q=Qf; }
};
template <class type1, class type2>
void Inter<type1, type2>::next(type1 A, type2 B)
{ Qf=Ld*(A.T-B.T);
}
```

Объект класса *Inter* содержит один параметр (L_d – коэффициент теплопроводности соответствующего материала) и один параметр состояния (Q , Q_f – передаваемые тепловые потоки). Функция *next* вычисляет тепловой поток в соответствии с уравнением:

$$Q = \lambda(T_a - T_b), \quad (4)$$

где T_a , T_b – температуры источника и приемника тепла, λ – коэффициент теплообмена.

Класс *Targ* (задатчик температуры)

Задатчик температуры является целеустанавливающим элементом системы. Он представляет закон изменения температуры со временем или просто заданную температуру. Состояние задатчика в нашем примере не зависит от состояний других элементов системы.

```
class Targ
{public:
double T, Tf;
Targ() { T=Tf=Tmin; }
Targ(double A) { T=A; }
void next();
void step() { T=Tf; }
};
void Targ::next()
{const float A=300;
if (t<tm/2) Tf=t/tm*A; else Tf=A*(1.0-t/tm);
}
```

Параметров данная субмодель в нашем примере не имеет. Вместо этого, параметры задатчика могут быть инкапсулированы в функцию – член класса *next*. В нашем примере мы имеем один такой параметр. Параметром состояния задатчика является выдаваемая им температура (переменные T , T_f).

Функция *next* содержит принятый закон изменения температуры: линейный рост (первая фаза) и линейное снижение (вторая фаза) температуры рабочего тела:

$$T = \begin{cases} T_f = \frac{t}{t_m} A, & \text{если } t < \frac{1}{2} t_m, \\ T_f = A(1 - \frac{t}{t_m}), & \text{если } t \geq \frac{1}{2} t_m. \end{cases} \quad (5)$$

Параметры A – максимальная температура процесса, t_m – общее время моделирования системы удобно представить как общие параметры моделирования, присутствующие в программе в виде глобальных переменных.

Класс *Medium* (внешняя среда)

Данный класс представляет субмодель внешней среды.

```
class Medium
{public:
double A1, A2;
double T, Tf;
Medium(double a1, double a2){ A1=a1; A2=a2; T=A1; }
void next();
void step() { T=Tf; }
};
```

```
void Medium::next()
{if (t<tm/2) Tf=A1; else Tf=A2;
}
```

Субмодель имеет два параметра (A_1 и A_2) и одну переменную состояния – температура внешней среды (T , T_f).

Функция *next* содержит информацию об изменении состояния внешней среды: ее температура в момент времени $t = t_m/2$ скачкообразно изменяется от значения A_1 до A_2 .

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты моделирования приведены на рис. 2 и 3. На рисунках приведены следующие кривые: температура задатчика, напряжение на выходе регулятора, температура нагревателя, температура рабочего тела, все величины как функции времени. Результаты моделирования на рис. 2 соответствуют следующим условиям: температура внешней среды постоянна, задатчик формирует сигнал в форме Π -импульса. Параметры модели:

1. Задатчик: $T_{min}=10$, $T_{max}=100$.
2. Внешняя среда: $T_{medi}=10$.
3. Элементы теплообмена: $L_{bm}=10$, $L_{hm}=0.1$, $L_{hb}=15$.
4. Рабочее тело: $C_{body}=20$.
5. Нагреватель: $R_{heat}=100$, $C_{heat}=2$.
6. Регулятор: $U_{max}=400$, $K_{pr}=20$, $K_{in}=3$, $K_{di}=0.1$.

Рис. 3 соответствует таким условиям: температура внешней среды постоянна, задатчик формирует сигнал в форме треугольного импульса. Параметры модели:

1. Задатчик: $T_{min}=10$, $T_{max}=100$.
2. Внешняя среда: $T_{medi}=0$.
3. Элементы теплообмена: $L_{bm}=10$, $L_{hm}=0.1$, $L_{hb}=15$.
4. Рабочее тело: $C_{body}=20$.
5. Нагреватель: $R_{heat}=100$, $C_{heat}=2$.
6. Регулятор: $U_{max}=400$, $K_{pr}=20$, $K_{in}=12$, $K_{di}=0$.

ВЫВОДЫ

На примере конкретной системы показана результативность объектно-ориентированного подхода для построения компьютерной модели, позволяющей отслеживать фазовую траекторию системы. Показаны особенности построения программной реализации модели на основе объектно-ориентированного подхода. Основными преимуществами такого подхода являются следующие.

1. Модульность, позволяющая с минимальными затратами вносить функциональные и структурные изменения в модель анализируемой системы.
2. Возможность формализации процесса построения программной реализации динамической модели системы с локализованными свойствами различной этимологии и природы.
3. Потенциальная возможность построения моделей систем высокого уровня сложности, включающих большое число элементов и связей.

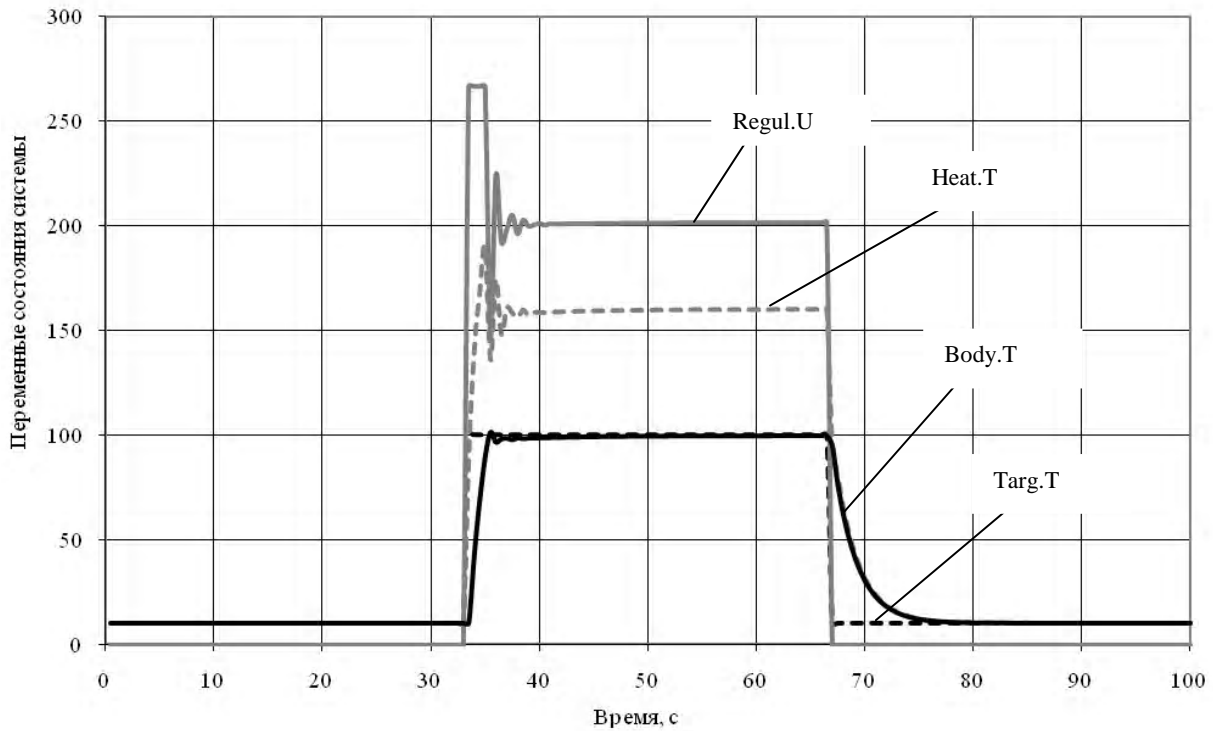


Рис. 2. Результат моделирования при ступенчатом изменении задаваемой температуры

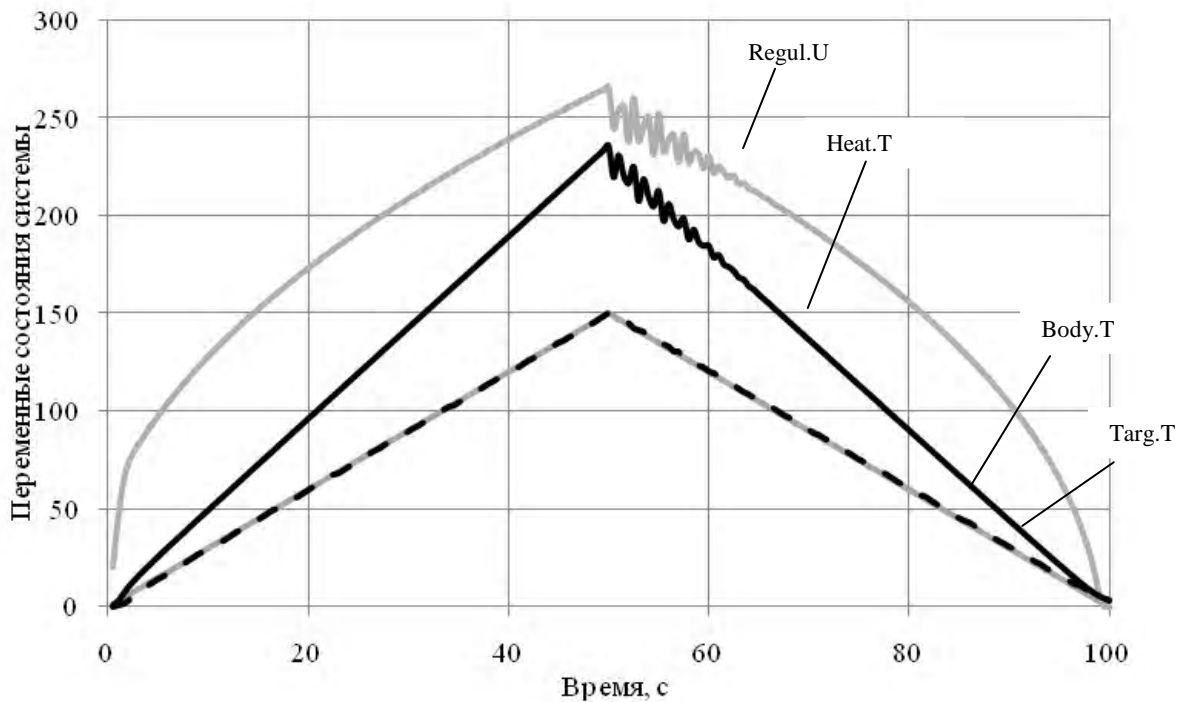


Рис. 3. Результат моделирования для функции задатчика треугольной формы

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесов, Ю. Б. Объектно-ориентированное моделирование сложных динамических систем / Ю. Б. Колесов. – СПб. : Изд-во С.Пб. ГПУ, 2004. – 239 с.

2. Колесов, Ю. Б. Моделирование систем. Динамические и гибридные системы / Ю. Б. Колесов, Ю. Б. Сениченков. – С. Пб. : БХВ-Петербург, 2006. – 224 с.

Стаття надійшла до редакції 15.03.2011.