

Разработка концептуальной модели искусственной иммунной системы прогнозирования дрейфа параметров бортовой аппаратуры

Аннотация. Рассмотрена проблема прогнозирования дрейфа параметров бортовой аппаратуры. Сформулированы основные требования, принципы построения, функционирования и разработки концептуальной модели искусственной иммунной системы (ИИС) прогнозирования дрейфа критических параметров бортовой автоматизированной системы управления (БАСУ) летательным аппаратом (ЛА). Определена специфика временных рядов и области применения, обоснованы и выбраны биологические модели и эвристические приемы для предлагаемого подхода к прогнозированию. Приведено сопоставление применяемых биологических терминов с их аналогами из предметной области. Предложены: формальное описание и концептуальная модель ИИС, структура антигена, антигена и клетки памяти, совокупность показателей качества прогнозирования.

Ключевые слова: прогнозирование, бортовая автоматизированная система управления, искусственные иммунные системы, модифицированный алгоритм клональной селекции, вывод по прецедентам, сплайн аппроксимация.

Введение

Участвовавшие в последнее время отказы изделий авиационной и ракетно-космической промышленности свидетельствуют, что проблема обеспечения качества и надежности технических объектов ответственного назначения становится крайне значимой и подлежит незамедлительному решению. В сложившихся условиях одним из наиболее действенных путей снижения вероятности и тяжести последствий отказов является совершенствование приемочного контроля, как основного фактора, влияющего на качество функционирования изделий и полноту выполнения ими назначенных функций. Необходимость предупреждения потенциальных отказов диктует необходимость включения в контур технологической системы приемочного контроля средств прогнозирования времени наступления предотказного состояния объекта контроля. Это позволит разрабатывать рекомендации эксплуатирующим организациям для выбора стратегии проведения профилактических мероприятий и снабжения запасными частями, гарантирующих

сохранение работоспособности на заданном интервале эксплуатации.

Надежность ЛА в большой степени определяется надежностью БАСУ. Доминирующим видом отказов БАСУ являются постепенные (параметрические) отказы, вызванные различной интенсивности процессами деградации в радиоэлектронных компонентах. При этом своевременное обнаружение таких отказов затрудняется их скрытым внешним проявлением.

Оценка времени достижения параметром критически опасного значения у границы области работоспособности остается одним из наиболее сложных вопросов. Основные трудности для построения модели исследуемого процесса связаны с недостатком априорной информации, а именно, с отсутствием необходимого математического описания, с малым объемом выборки значений параметров, недостатком информации о закономерностях процессов деградации в электронных компонентах, о характере зависимости между множеством дестабилизирующих факторов и поведением параметров, с ограниченными возможностями экспериментального исследования процессов

для получения достаточной статистической информации и т.д.

В этих условиях традиционные методы прогнозирования, основанные на математической статистике и теории случайных процессов, из-за целого ряда ограничений на их использование, не позволяют получить адекватную оценку предстоящих изменений в поведении процесса дрейфа параметров. В этом случае более эффективными оказываются методы и модели искусственного интеллекта, ориентированные на прогнозирование временных рядов с высокой степенью неопределенности.

Таким образом, задача разработки методического обеспечения для прогнозирования дрейфа контролируемых параметров к границам полей допусков на основе теории искусственного интеллекта, позволяющего повысить качество принимаемых решений при управлении техническим состоянием БАСУ, является актуальной как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Целью работы является разработка концептуальной модели ИИС прогнозирования дрейфа параметров бортовой аппаратуры на основе комбинирования интеллектуальных технологий и сплайн-аппроксимации, позволяющей получать приближенные оценки с приемлемой для практического применения точностью.

1. Постановка задачи

Техническое состояние БАСУ определяется совокупностью параметров $X = \{x_i, i \in [1, N_p]\}$, характеризующих работоспособность изделия и подверженных изменениям вследствие воздействия различного рода дестабилизирующих факторов. Производство и эксплуатация БАСУ осуществляется на интервале времени $[0, T]$. Контроль параметров производится в моменты времени $t_0 < t_1 < t_2 < \dots < t_s$. Результаты измерений каждого параметра $x_i(t_j)$, $i = \overline{1, N_p}$; $j = \overline{0, s}$ представляют собой временной ряд, имеющий длину s , которая изменяется в процессе поступления новых данных контрольных испытаний. Задача прогнозирования дрейфа параметра БАСУ является обратной задачей прогнозирования, где искомые величины – интервалы времени, в течение которого БАСУ сохранит необходимый уровень некоторого параметра. Она сводится к фор-

мированию прогноза, состоящего из двух частей: точечного и интервального прогноза. Точечный прогноз представляет собой оценку значения прогнозируемой переменной – времени от момента составления прогноза до момента, когда параметр достигнет границы заранее установленной области упреждения в пределах зоны допустимых его значений. Интервальный прогноз – это пессимистичная и оптимистичная оценки значений прогнозируемой переменной, определяющих границы интервала, в котором можно ожидать появления фактического значения прогнозируемой переменной (Рис. 1).

Для решения задачи прогнозирования дрейфа критических параметров требуется разработать концептуальную модель системы прогнозирования, которая позволит получить прогноз или несколько вариантов прогноза, в соответствии с установленными лицом, принимающим решения, параметрами алгоритма поиска решения.

2. Идентификация проблемной области

2.1. Специфика временных рядов

Рассматриваемые в данной работе временные ряды – это хронологические последовательности значений контролируемых параметров БАСУ летательного аппарата с указанием времени измерения каждого параметра. Данные значения параметров фиксируются в процессе контрольных испытаний на этапах изготовления и эксплуатации БАСУ: предъявительских и приемосдаточных испытаний на приборостроительных заводах, входном контроле и испытаниях в составе ЛА на заводах-изготовителях ЛА, периодических испытаниях в составе ЛА в эксплуатирующих организациях до использования по прямому назначению и т.д. В результате сбора и обработки этих данных формируются временные ряды значений параметров, которые имеют ряд особенностей, затрудняющих их анализ и прогнозирование динамики:

- выборка известных значений временного ряда содержит сравнительно немного элементов. Длина временного ряда ограничена 20-30 значениями;
- количество известных временных рядов, используемых для предсказания будущего значения анализируемого временного ряда, также ограничено;

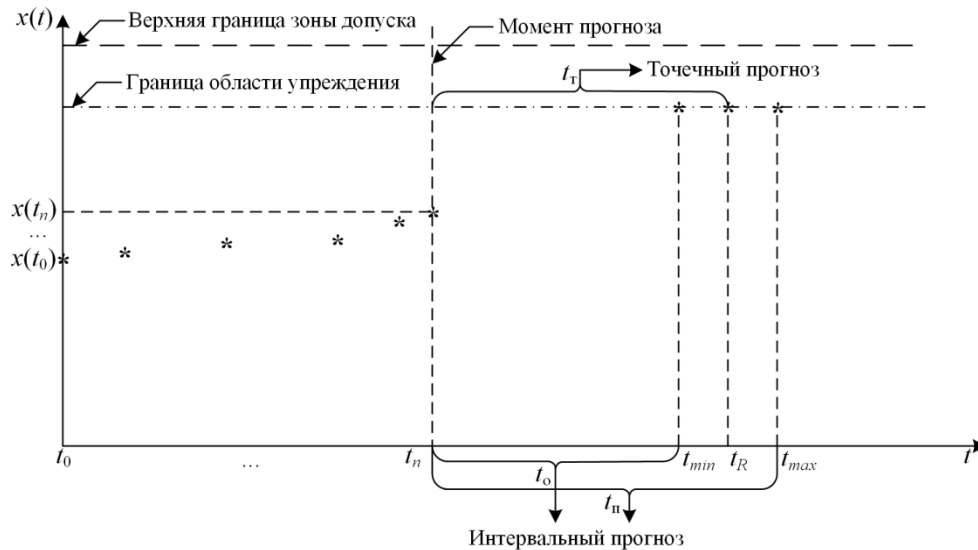


Рис. 1. Графическая иллюстрация к постановке обратной задачи прогнозирования

- процесс изменения значения параметра является случайным и содержит определенную тенденцию развития во времени (тренд), т.е. временной ряд является стохастическим и нестационарным;

- совокупное долговременное воздействие множества факторов на динамику изучаемого показателя происходит непрерывно, но реально исследовать можно лишь дискретные по времени значения процесса, т.е. анализировать дискретный временной ряд;

- равенство временных интервалов фиксации значений параметра во временном ряду не выполняется, т.е. временной ряд является неравноотстоящим, а временные ряды несопоставимыми;

- глубина предыстории и горизонт прогнозирования временного ряда могут меняться во времени по мере поступления данных испытаний, полученных на разных этапах жизненного цикла изделия.

Разработка модели системы прогнозирования проводится в рамках следующих предположений о природе временного ряда:

- закономерности поведения временных рядов, действовавшие в прошлом, сохраняются и в будущем (история повторяется);

- будущая динамика временного ряда зависит от его предыстории;

- временной ряд описывается плавной кривой;

- значения параметра на разных участках временного ряда могут описываться разными аналитическими выражениями.

Существует принципиальная возможность построения сравнительно несложной модели поведения каждого такого участка временного ряда, комбинации моделей и их настройки, позволяющая добиться лучшего качества прогнозирования.

2.2. Выбор параметров БАСУ и границ области упреждения

Текущее техническое состояние БАСУ описывается большим количеством значений параметров состояния, измеренных комплексом контрольно-проверочной аппаратуры в данный момент времени. Большая размерность массива данных для сбора и обработки при прогнозировании временного интервала, в течение которого изделие находится в заданном состоянии и имеет необходимый запас работоспособности, существенно затрудняет решение задачи построения прогноза. Предлагается уменьшить размерность массива данных для прогнозирования, сократив затраты на их сбор и обработку, путем целенаправленного выбора наиболее информативной совокупности параметров, учитывающего специфику объекта контроля.

В качестве параметров, подлежащих прогнозированию, предлагается выбрать критические параметры БАСУ, выход значений которых за пределы допусков приводит к критическому отказу изделия. Критерием выбора таких параметров является допустимый уровень по тяжести возможных последствий. Перечень крити-

ческих параметров может быть определен на основе методических указаний, изложенных в ГОСТ 27.310 – 95 «Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения» и ГОСТ Р 51814.2 – 2001 «Метод анализа видов и последствий потенциальных дефектов».

Для задания границы области упреждения в пределах зоны допустимых значений параметра, характеризующей неудовлетворительный запас работоспособности и определяющей близость к отказу изделия, должна быть известна структура области работоспособности. Решение задачи разбиения области возможных значений параметров работоспособной системы на подклассы в зависимости от их свойств и признаков на основе теории нечетких множеств рассмотрено в работе [1]. Разделение области допустимых значений критического параметра, имеющего лингвистическую оценку «годен», на подобласти, характеризующие интенсивность проявления этого свойства («опасно мало», «опасно велико», «удовлетворительно мало» и т.д.) производится с использованием заданных экспертами значений α -уровней.

2.3. Выбор метода и принципов функционирования системы прогнозирования

Учитывая специфику предметной области и невозможность использования традиционных методов получения прогноза, предлагается применить комбинацию перспективных подходов теории искусственного интеллекта: метода моделирования рассуждений на основе прецедентов (CBR - Case-Based Reasoning) [2, 3] и алгоритма, основанного на принципах работы иммунной системы.

Стратегия прогнозирования заключается в построении прогноза по аналитическим выражениям, описывающим возможное поведение параметра в период упреждения. Для получения аналитических зависимостей используется исходное множество конкурирующих между собой прецедентов (потенциальных решений). Прецедент представляет собой формализованное описание случая, имевшего место в прошлом, а именно, временного ряда значений параметра и аналитического выражения тренда, описывающего поведение параметра.

Формирование аналитического выражения для текущего случая осуществляется путем вы-

бора и адаптации прецедентов по определенным правилам и с учетом требований пользователя, которые задаются иммунным алгоритмом. Процесс эволюционного поиска решения заключается в исследовании точек исходного множества прецедентов, последовательном его преобразовании и оценке таким образом, чтобы каждое новое множество составляли бы наилучшие из решений предыдущего множества. Результатом работы алгоритма является двухсоставной прогноз (варианты прогноза), а при наличии фактических значений прогнозируемых величин и соответствии точности точечного прогноза выбранному критерию оценки качества прогнозирования – два прецедента, которые добавляются в исходное множество прецедентов.

В качестве основы для алгоритма поиска решения предлагается использовать одну из моделей функционирования биологических иммунных систем, а именно, алгоритм клональной селекции. Алгоритм клональной селекции относится к интенсивно развивающемуся классу биоинспирированных алгоритмов – искусственным иммунным системам. Большинство современных разработок с использованием принципов иммунологических теорий основаны на теории клональной селекции. Различным аспектам разработки, реализации и применения алгоритма клональной селекции для прогнозирования временных рядов посвящены работы Дасгупты Д., Кораблева Н.М., Иващенко Г.С., Демидовой Л.А., Самигулиной Г.А., Бидюка П.И., Литвиненко В.И., Фефелова А.А., Антух А.Э., Карпенко А.П. и других ученых [4-8].

С точки зрения разработки алгоритма прогнозирования модель клональной селекции представляет большой интерес и является перспективной при решении задач интеллектуальной обработки информации, поскольку вобрала в себя лучшие особенности биоинспирированных методов, а именно:

- способность к обучению и самообучению;
- умение распознавать образы;
- возможность параллельной обработки значительных объемов данных;
- наличие памяти;
- способность интегрироваться с другими подходами;
- наличие эволюционных механизмов адаптации и др.



Рис. 2. Интерпретация применяемых биологических терминов в контексте решаемой задачи

Для описания искусственной иммунной системы принято использовать биологическую терминологию. С целью исключить возможную неоднозначность понимания отдельных аспектов данного исследования необходимо пояснить, как соотносятся применяемые основные термины, заимствованные из эволюционной биологии и теоретической иммунологии, с понятиями предметной области. Сопоставление основных применяемых терминов с их аналогами из предметной области приведено на Рис. 2.

Предлагаемый подход к созданию искусственной иммунной системы заключается в комплексном использовании путем адаптации к специфике предметной области ряда идей и принципов различных альтернативных концепций эволюции, а также, эвристических приемов из различных областей знаний и математического аппарата численного анализа, взаимно дополняющих друг друга. Следует отметить, что при разработке ИИС не ставится цель в точности воспроизвести законы природы и механизмы функционирования биологических систем живых организмов. Кроме того, в иммунном алгоритме поиска допускается применение операций, которые не используются в биологических системах.

На Рис. 3 приведена систематизация основных требований к модели ИИС, вытекающих из некоторых положений различных эволюционных теорий, являющихся полезными для практического применения при моделировании эволюции на более высоком уровне по сравнению с классическими эволюционными алгоритмами поиска и позволяющих обеспечить эффективность прогнозирования. Для получения требуемых математических моделей трендов, описывающих поведение временных рядов, предлагается использовать метод аппроксимации эмпирических данных (Табл. 1) кубическими сплайнами дефекта 1.

Такой выбор обусловлен следующими обстоятельствами. В реальном мире большое количество физических процессов описывается сплайнами: деформация гибкой линейки, зафиксированной в отдельных точках (машиностроение), траектория движения горнолыжников, траектория космического корабля при смене орбиты, диффузия через слои различных веществ (химия), теплообмен в стержне, составленном из фрагментов с различной теплопередачей (термодинамика) и т.д.

Табл. 1. Табличная функция $f(t)$

t	t_0	t_1	...	t_n
$f(t)$	x_0	x_1	...	x_n

Основные идеи и принципы	Основные требования
Макроэволюция и микро эволюция - две стороны единого эволюционного процесса (синтетическая теория эволюции). Эволюционный процесс протекает на различных организационных уровнях, каждый из которых обладает известной автономией, но в то же время связан как с низшими, так и с высшими (В.А. Красилов, экосистемная теория эволюции)	Должна основываться на применении двухуровневой модели эволюции, при которой на уровне микроэволюции изменениям подвергаются популяции антител, а на уровне макроэволюции – библиотека иммунологической памяти
Фактор эволюции - постоянное влияние изменяющейся внешней среды, обуславливающее формирование всего многообразия приспособлений организмов к окружающим условиям и являющееся основной причиной видообразования (Ж.Б. Ламарк). Существенный фактор эволюции - изменение природных условий, возникновение стрессовых ситуаций (В.А. Красилов, экосистемная теория эволюции)	Должна обеспечиваться возможность адаптации антител, параметров настройки иммунного алгоритма в процессе решения конкретной задачи и библиотеки иммунологической памяти при появлении новых экспериментальных данных. Появление в иммунной системе антигена (стрессовой ситуации) должно запускать механизм формирования иммунного ответа
Принцип активности особи как фактор эволюции вида проявляется в стремлении к усложнению строения и функций. В природе одновременно существуют организмы разной степени сложности (Ж.Б. Ламарк). Разделение генов на структурные и регуляторные (модель Р. Бриттена и Э. Дэвидсона, молекулярная генетика)	Должно обеспечиваться динамическое представление генома антитела и клетки памяти, позволяющее заложить в его структуру возможность появления новых генов при адаптации под изменяемые требования новой окружающей среды (антигены). Структура генома должна содержать помимо закодированного временного ряда и функциональных зависимостей служебную информацию, позволяющую регулировать процесс адаптации антител и клеток памяти в соответствии с целенаправленным процессом эволюции и учитывать уникальные данные, характеризующие каждое антитело и клетку памяти
Принцип генного контроля (популяционная генетика)	Должен применяться механизм кодирования и декодирования, обеспечивающий взаимно однозначное отображение множества генотипов на множество фенотипов
Главным фактором эволюции, в теориях направленной эволюции, является направленная динамика эволюционных изменений (К. Нэгели, Г.Ф. Осборн, Т. Эймер, Л. С. Берг). Генетический поиск нужного варианта антитела в ламаркизме происходит быстро и не является случайным перебором (Э. Стил)	Должен применяться механизм формирования популяций и работы операторов, имеющий направленный характер и позволяющий исключить слепое исследование потенциальных решений в пространстве поиска и увеличить скорость протекания эволюционного процесса
Для осуществления эволюции необходимо наличие трех процессов: мутационного, рекомбинационного и селекционного (синтетическая теория эволюции)	Должна использоваться усложненная процедура поиска за счет применения комплекса генетических операторов: соматической гипермутации, глобальной промежуточной рекомбинации, селекции и др., обеспечивающих целенаправленные изменения в динамической структуре антител
Принцип Ламарка «use-disuse» («упражнение-неупражнение»). Концепция саморегуляции – способности группы регулировать свою численность на оптимальном уровне (В. Винн-Эдвардс). Многоуровневый характер отбора (В. А. Красилов, экосистемная теория эволюции). Адаптивная ценность для группы процесса старения, ограничивающего ее численность путем удаления изношенных особей (теория группового отбора). Стратегия элитарности	Должно обеспечиваться: - преобразование антитела, способного участвовать в формировании иммунного ответа, и его гибель в соответствии с критериями селекции; - применение стратегий селекции с использованием двух видов аффинности и параметров, характеризующих относительный возраст антител и количество удачных применений; - применение элитарной стратегии, позволяющей сохранить в новом поколении лучшие решения из популяций родителей и потомков
Принцип наследования приобретенных признаков (Ж.Б. Ламарк). Изоляция – важный фактор эволюции (Ч. Дарвин)	Должно обеспечиваться: сохранение в клетках памяти благоприобретенных признаков, позволяющее повысить скорость и качество эволюции потенциальных решений; изоляция на макроэволюционном уровне, исключающая возможность обмена генетическим материалом между клетками памяти в библиотеке иммунологической памяти и закрепляя благоприобретенные признаки
Принцип сотрудничества и кооперации организмов для более успешного выживания и воспроизводства (У. Гамильтон, теория родственного отбора)	Должен обеспечиваться коллективный поиск решения с использованием принципа кооперации антител, который позволяет сформировать три антитела, составляющих прогнозную модель, т.е. решать задачу на системном уровне, а не на уровне отдельного антитела

Рис. 3. Систематизация основных требований к модели ИИС

Предлагаемый метод аппроксимации кубическими сплайнами позволяет учитывать особенности предметной области и имеет следующие полезные свойства:

- прохождение графика кубического сплайна точно через узловые точки;
- возможность кусочного моделирования временного ряда;
- отсутствие разрывов и резких перегибов аппроксимирующей функции в узловых точках;
- сходимость процедуры аппроксимации, т.е. равномерное стремление к нулю погрешности аппроксимации при неограниченном количестве узлов сетки на отрезке $[t_0, t_n]$ как для интерполируемой функции $f(t)$, так и для ее первых двух производных;
- хорошая обусловленность системы линейных уравнений, что позволяет получать коэффициенты полиномов с высокой точностью;
- возможность реализации вычислительных процессов на ЭВМ, например, с помощью пакета расширения Spline Toolbox в составе системы Matlab и т.д.

Кубический сплайн дефекта 1 с узлами, совпадающими с узлами табличной функции $f(t)$, описывается уравнением:

$$Spl(t) = \begin{cases} Spl_1(t), & t \in [t_0, t_1] \\ Spl_2(t), & t \in [t_1, t_2] \\ \dots \\ Spl_i(t), & t \in [t_{i-1}, t_i] \\ \dots \\ Spl_n(t), & t \in [t_{n-1}, t_n] \end{cases} \quad (1)$$

Кусочные функции сплайна представляют собой полиномы третьей степени:

$$Spl_i(t) = a_i + b_i \cdot (t - t_{i-1}) + c_i \cdot (t - t_{i-1})^2 + d_i \cdot (t - t_{i-1})^3, \quad (2)$$

где a_i, b_i, c_i, d_i – коэффициенты полиномов, $i=1, 2, \dots, n$ – номер кусочной функции сплайна.

Предлагается в дополнение к условиям интерполирования и гладкости кубического сплайна во всех точках дополнительно использовать следующие два граничных условия – условия нулевой кривизны сплайна (отсутствие выпуклости или вогнутости) в граничных точках t_0 и t_n :

$$\begin{aligned} Spl''(t_0) &= 0, \\ Spl''(t_n) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Для оценки качества прогнозирования (количественного прогноза, прогнозной модели и метода прогнозирования) предлагается использовать совокупность показателей качества прогнозирования, которая позволит получить более полную информацию о прогнозных свойствах моделей. К ним относятся AE (абсолютная ошибка), MAE (средняя абсолютная ошибка), MPE (средняя процентная ошибка), MSE (среднеквадратическая ошибка), U (коэффициент несовпадения Тейла), $K_{кип}$ – коэффициент качества интервального прогноза:

$$K_{кип} = \frac{C_{ип}}{C_{ип} + H_{ип}}, \quad (4)$$

где $C_{ип}$ – число подтвержденных ($t_{п} \leq t^{\Phi} \leq t_o$) интервальных прогнозов, $H_{ип}$ – число неподтвержденных ($t_{п} > t^{\Phi}$ или $t^{\Phi} > t_o$) интервальных прогнозов, t^{Φ} – фактическое значение прогнозируемой величины; $K_{кпп}$ – коэффициент качества точечного прогноза:

$$K_{кпп} = \frac{C_{тп}}{C_{тп} + H_{тп}}, \quad (5)$$

где $C_{тп}$ – число подтвержденных ($AE \leq \Delta_{AE}$) точечных прогнозов, $H_{тп}$ – число неподтвержденных ($AE > \Delta_{AE}$) точечных прогнозов, Δ_{AE} – заданная погрешность AE .

3. Концептуальная модель ИИС

Модель ИИС может быть формально представлена как совокупность следующих элементов:

$IIS = \langle \text{БИП}, S, ALG \rangle$, где $\text{БИП} = \{\text{БКП}, \text{БСИИ}\}$ – библиотека иммунологической памяти, $\text{БКП} = \{\text{БКП}_{kpi}, i \in [1, N_{kp}]\}$ – библиотека клеток памяти, N_{kp} – количество критических параметров, $\text{БСИИ} = \{\text{БА}, \text{БП}, \text{БСИ}\}$ – библиотека служебной иммунологической информации; $\text{БКП}_{kpi} = \{Ab_{Mj}, j \in [1, N_{кли}]\}$ – библиотека клеток памяти Ab_{Mj} i -го критического параметра с общим количеством $N_{кли}$, $Ab_{Mj} = \{ab_{Mf}, f \in [1, N_{гj}]\}$ – j -ая клетка памяти с количеством $N_{гj}$ генов ab_{Mf} в генотипе; $\text{БА} = \{P_{Agk}, k \in [1, N_{тп}]\}$ – база антигенов для текущих прогнозов, $P_{Agk} = \{Ag_i, i \in [1, N_{kp}]\}$ –

множество антигенов Ag_i k -ой задачи, $N_{ТП}$ – количество задач, для которых фактические значения прогнозируемых величин на данный момент времени не получены; $БП = \{P_{Abk}, k \in [1, N_{ТП}]\}$ – база прогнозов, $P_{Abk} = \{A_h, h \in [1, N_{АВП}]\}$ – множество вариантов прогноза для k -ой задачи с общим количеством $N_{АВП}$ альтернатив $A_h = \{Ab_{Rh}, Ab_{minh}, Ab_{maxh}\}$, Ab_{Rh} , Ab_{minh} , Ab_{maxh} – антитела, содержащие значения t_r , t_p , t_o ; БСИ – база статистической информации, содержащая значения показателей качества прогнозирования AE , MAE , MPE , MSE , U , $K_{кпп}$, $K_{кпн}$ для выполненных прогнозов; $S = \{S_{Ag}, S_{Ab}, S_{AbM}, S_{БКП}, S_{БА}, S_{БП}, S_{БСИ}\}$ – множество способов представления (кодирования) элементов ИИС, $ALG = \{ALG_{Ab}, ALG_{БП}, ALG_{ПН}\}$ – множество процедур (алгоритмов) адаптации антител Ab (ALG_{Ab}), БИП ($ALG_{БП}$) и параметров настройки процедур ALG_{Ab} в ходе решения конкретной задачи ($ALG_{ПН}$), управляющих динамикой ИИС.

На основе сформулированных принципов и требований предлагается концептуальная модель

ИИС (Рис. 4), представляющая собой совокупность обобщенных функциональных компонентов, принципов их взаимодействия между собой и внешней средой, которая определяет смысловую структуру разрабатываемой системы.

Задачу построения прогнозной модели и получения прогноза предлагается осуществлять с помощью модифицированного иммунного алгоритма клональной селекции, который в упрощенном виде можно представить в виде следующего кортежа: $CLONALG = \langle Ab_M, Ag, Ag_C, Ab, Ab_C, IO, P_D, P_{AE}, P_{\Pi}, P_{\nu}, P_{\epsilon}, X_{\nu}, LB, UB, N_{АВП}, N_{кр}, S \rangle$, где Ab_M – популяция клеток памяти, Ag – популяция антигенов, состоящая из одного антигена, Ag_C – популяция клонов антигена, состоящая из трех клонов, Ab – популяция антител, Ab_C – популяция клонов антител, IO – множество операторов алгоритма, P_D – пороговая аффинность связи $Ag - Ab$ и $Ag - Ab_C$, P_{AE} – пороговая аффинность связи $Ab_M - Ab$, P_{Π} – показатель применимости, P_{ν} – показатель относительного возраста, P_{ϵ} – порог сжатия популяции, X_{ν} – параметр области упреждения, LB – нижняя граница относительного возраста, UB – верхняя граница относительного возраста,

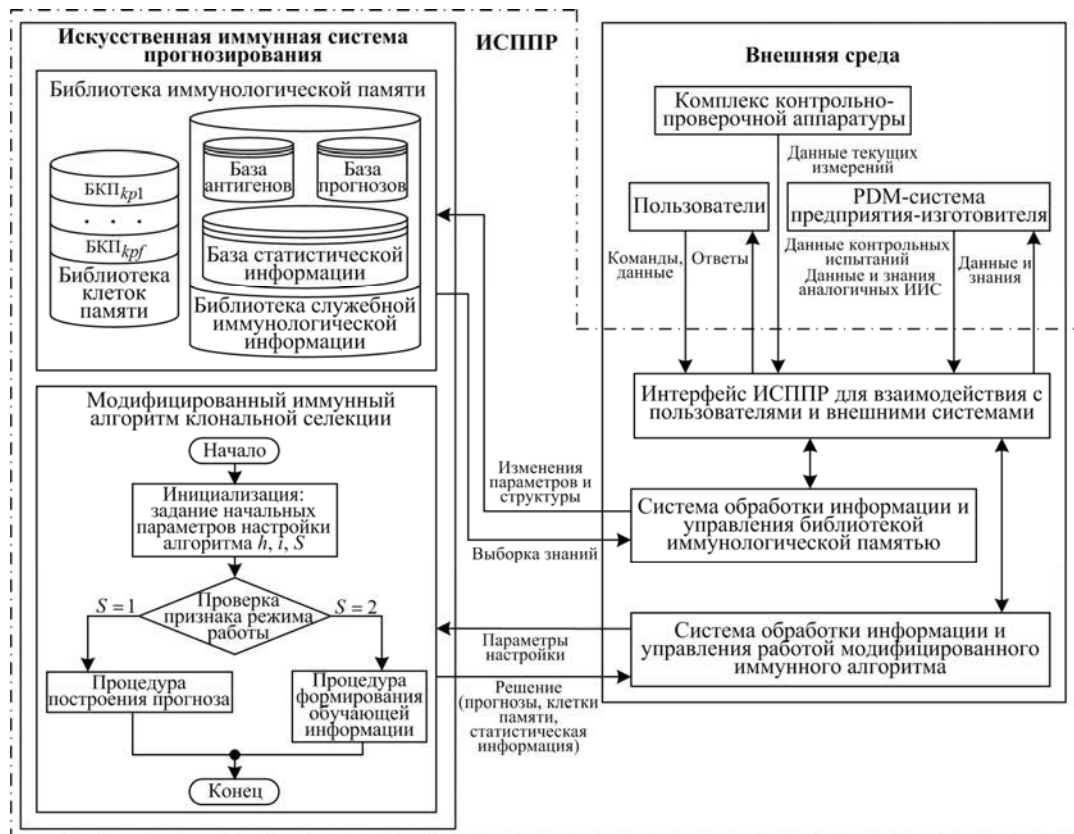


Рис. 4. Концептуальная модель ИИС

$N_{\text{АВП}}$ – количество альтернативных вариантов прогноза, N_{kp} – количество критических параметров, S – признак режима работы.

Чтобы построить иммунный алгоритм, необходимо сначала выбрать подходящие структуры для представления антигенов, антител и клеток памяти. Способ представления (кодирования) иммунных объектов (антигенов, антител и клеток памяти) диктуется спецификой получения, видом исходных данных и стратегией поиска решения. Для решения задачи предлагается использовать три модели кодирования параметров индивидуумов, а именно, в виде антигена, клетки памяти и антитела.

С математической точки зрения антиген представляется в виде численных значений вектора генов фиксированной длины $Ag = \langle ag_1, ag_2, \dots, ag_k \rangle$, где k – количество генов в генотипе Ag (Рис. 5). Каждый ген используется для кодирования значений параметров и времени их фиксации из Табл. 1 экспериментальных данных. Каждая пара генов, в которых закодированы значения из одного столбца Табл. 1, образуют домен. Генотип каждого антитела состоит из $n+1$ доменов ($2 \cdot (n+1)$ генов), где $n+1$ – длина выборки известных значений временного ряда, предшествующих прогнозируемым значениям. Предлагается использовать вещественное кодирование параметров антигена, при котором каждый ген представляет собой битовую строку заданной длины и описывается отдельным вещественным числом. Поскольку используется вещественное кодирование антигена, то кодируется общая структура данных и операция кодирования чисел отсутствует. Длина генотипа у разных антигенов может быть различной и зависит от числа известных значений прогнозируемого временного ряда, но в процессе выполнения алгоритма не изменяется. Геометрически набор генов, характеризующих значение параметра, можно рассматривать как точку в $n+1$ -мерном вещественном пространстве исследуемых объектов, $Ag \in S^{n+1} \subseteq R^{n+1}$.

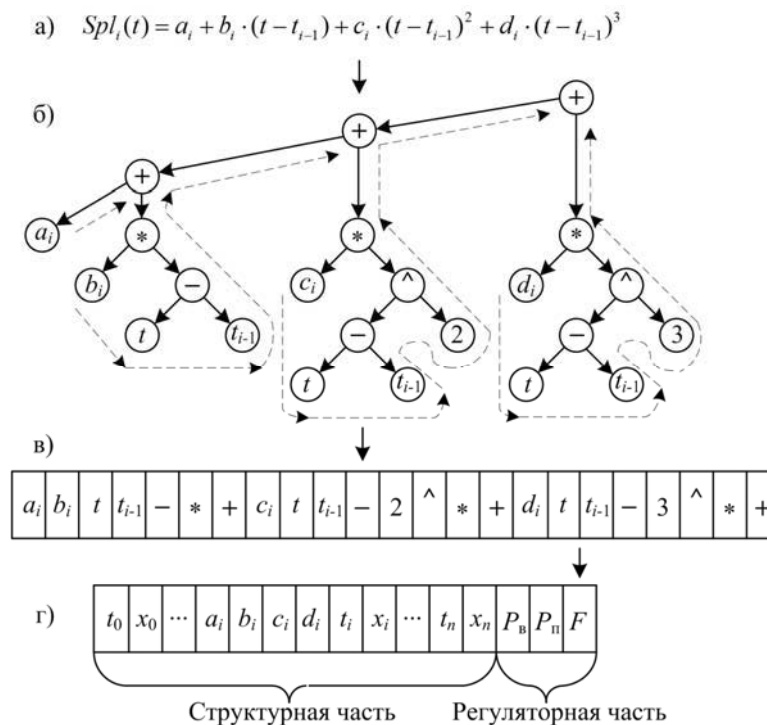
Клетка памяти Ab_M хранится в библиотеке иммунной памяти и представляет собой структурированный вектор генов, длина которого изменяется при поступлении новых данных контрольных испытаний с этапов жизненного цикла изделия. Клетка памяти (Рис. 6) состоит из двух частей. Структурную часть составляет выборка значений временного ряда и коэффициен-

t_0	x_0	...	t_i	x_i	...	t_n	x_n
ag_1	ag_2		...				ag_k

Рис. 5. Структура антигена Ag

тов кусочной функции сплайна, расположенных в строго определенной последовательности. Регуляторная часть состоит из значения показателя относительного возраста P_v , определяющего порядковый номер появления Ab_M в иммунной системе, значения показателя применимости P_n , характеризующей число удачных применений Ab_M в алгоритме при поиске решения, и сегмента генотипа F , представляющего собой буквенную запись математической формулы кусочной функции сплайна. Информация, хранящаяся в регуляторной части, необходима для регулирования процессов, протекающих при эволюционном развитии клетки памяти и антитела, сформированного из этой клетки памяти.

Кодирование генов структурной части и показателей P_v и P_n осуществляется с помощью вещественных чисел. Кодирование математической формулы предлагается выполнять методом трансляции математических выражений польского математика Я. Лукашевича при помощи постфиксной польской записи, в которой операнды расположены перед знаками операций. Такое представление математической формулы в генотипе антитела и клетки памяти позволяет не использовать скобки и максимально приблизить форму записи к естественному языку математики. Для этого используется предварительно созданный алфавит, состоящий из двух частей: терминального и функционального алфавитов. Терминальный алфавит *Terminal* представляет собой множество из восьми букв $\{a_i, b_i, c_i, d_i, t, t_{i-1}, 2, 3\}$, каждая из которых состоит из одного, двух или четырех символов и обозначает переменную функции или ее константу. Буквы функционального алфавита *Functional* = $\{+, -, *, ^\}$ соответствуют операциям сложения, вычитания, умножения и возведения в степень. Символ циркумфлекс (^) обозначает операцию возведения в степень, где показатель степени задается цифрами 2 и 3 из терминального множества. Для преобразования математической формулы в сегмент генотипа клетки памяти строится дерево выражения (генетическая программа), в котором узлам со-

Рис. 6. Преобразование математической формулы в сегмент генотипа F клетки памяти Ab_M

а) – исходная формула; б) – дерево выражения; в) – последовательная запись элементов дерева выражений в строку; г) – структура клетки памяти Ab_M

ответствуют операции, а ветвям – операнды. Построение дерева выражения начинается с корня, в качестве которого выбирается последняя выполняемая операция. Формирование сегмента генотипа F осуществляется путем обхода дерева. Обход совершается от самой левой ветви вправо, и узел записывается в сегмент только после рассмотрения всех его ветвей.

Структурная и регуляторная части клетки памяти могут обрабатываться независимо друг от друга и являются адаптивными, так как в процессе микроэволюции происходит изменение P_n в регуляторной части (параметрическая адаптация), а в процессе макроэволюции изменяется общее количество генов в структурной части (структурная адаптация).

Антитело, представленное на Рис. 7, состоит из трех частей и представляет собой адаптивную структуру с изменяющимися в процессе алгоритмического поиска решения аллелями и длиной генотипа. Структура детекторной части совпадает со структурой антигена и позволяет численно оценить близость между антителом и антигеном. Решающая часть содержит домены, описывающие выборку известных значений

временного ряда, значения коэффициентов кусочных функций сплайна и одно из значений, характеризующих интервал времени точечного прогноза t_t , пессимистичный t_n и оптимистичный t_0 интервал времени интервального прогноза. Аллель, соответствующая t_n , t_t или t_0 , заполняется в генотипе в зависимости от результатов адаптации антитела. При этом два оставшихся гена остаются с пропущенными аллелями. Регуляторная часть содержит рассмотренные выше P_v , P_n и F , а также значения аффинности, вычисленные на основе функции Евклидова расстояния (Aff_D) и функции абсолютной ошибки прогноза (Aff_{AE}). Если в генотипе антитела не содержится аллель, соответствующая t_t , то, соответственно, и аллель, характеризующая Aff_{AE} , будет отсутствовать. При формировании антитела предлагается использовать вещественное кодирование информации.

Таким образом, динамическое представление генотипа при кодировании индивидуумов позволяет заложить возможность накопления и уточнения генетической информации о новых пространствах состояний параметров объекта в рамках изменении среды обитания и внешних

Рис. 7. Структура антитела Ab

воздействий. Подстройка генотипа под измененные требования новой окружающей среды дает возможность синтезировать принципиально новые свойства и структуры на уровне генотипа.

Поскольку разработка схемы иммунного алгоритма, иммунных операторов, способов оценки аффинности индивидуумов, условий останова и т.д. выходит за рамки данного исследования, в силу существующего ограничения на объем статьи, то далее рассмотрим основные режимы работы предлагаемой ИИС, а также некоторые идеи и подходы к реализации иммунных операторов.

На подготовительном этапе ИИС работает в режиме формирования начальной популяции клеток памяти. Клетки памяти – это прецеденты в терминологии CBR, представленные в формате для долговременного хранения. Данные контрольных испытаний, данные и знания аналогичных ИИС, собранные в информационной системе предприятия-изготовителя PDM-системой (системой управления данными об изделии), поступают в ИСППР, кодируются в соответствии с ранее разработанным форматом (Рис. 6) и записываются в БКП. Когда мощность БКП достигнет требуемого значения, осуществляется переход на основной этап работы.

В режиме формирования антигена (текущей задачи в терминах CBR) производится кодирование средствами ИСППР данных текущих измерений в соответствии со структурой антигена (Рис. 5). Эти данные поступают с комплекса контрольно-проверочной аппаратуры после проведения различных контрольных испытаний и записываются в БА.

Процесс правдоподобных рассуждений на основе прецедентов (извлечение наиболее адекватных прецедентов из библиотеки, адаптация выбранных прецедентов для решения текущей задачи, проверка полученного решения, сохранение решения как нового прецедента) выполняет модифицированный иммунный алгоритм клональной селекции.

В режиме построения прогноза на этапе задания начальных параметров настройки алго-

ритма пользователь выбирает режим «Процедура построения прогноза» (устанавливает признак режима работы $S=1$) и вводит начальные значения номера альтернативы h и номера критического параметра i . Перейдя в выбранный режим, пользователем задаются следующие начальные значения параметров настройки выбранной процедуры: N_{ABP} , N_{kp} , P_D , P_{Π} , $P_{\text{в}}$, $P_{\text{с}}$, $X_{\text{у}}$, LB и UB . Далее в автоматическом режиме происходит загрузка антигена из БА и направленное формирование начальной популяции антител. Антитела исполняют роль прецедентов в терминологии CBR и отличаются от клеток памяти форматом представления (Рис. 7), ориентированным на удобство обработки операторами алгоритма для поиска решения. Далее каждое антитело начальной популяции клонируется 1 раз, и создается популяция клонов антител для решения задачи расширения поискового пространства. Популяция клонов антител подвергается соматической гипермутации и совместно с начальной популяцией антител представляется антигену. После вычисления аффинностей связей $Ag - Ab$ и $Ag - Ab_{\text{с}}$ производится запись значения Aff_D в генотип каждого индивидуума, селекция усечением в соответствии с P_D , супрессия (сжатие) промежуточной популяции путем удаления из нее антител в соответствии с критериями P_{Π} , $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{с}}$. Для определения двух антител, на основе которых будет строиться интервальный прогноз, выполняется селекция антител с минимальным и максимальным значением Aff_D . Для формирования антитела, на основе которого будет получен точечный прогноз, предлагается использовать одно из положений корпускулярной концепции наследования, состоящее в том, что усреднение признаков в потомстве является частным случаем наследования. Реализация эволюционной стратегии глобальной промежуточной рекомбинации в операторе рекомбинации позволит скомпенсировать возможные аномалии и погрешности и повысить устойчивость решения. При данном подходе генотип рекомбинантного антитела Ab_R формируется от всех индивидуумов родительской попу-

ляции, а новые аллели каждого j -го гена ab_{Rj} определяются по формуле:

$$ab_{Rj} = \frac{1}{k} \cdot \sum_{i=1}^k ab_{ji}, \quad (6)$$

где k – количество антител в родительской популяции.

Следует заметить, что стратегия усреднения по ансамблю является одним из наиболее распространенных инструментов технического анализа, позволяющим компенсировать завышенные и заниженные оценки и устранить большую часть погрешности.

Далее производится клонирование антигена с получением трех клонов для последующей операции трансформации индивидуумов. В иммунном алгоритме предлагается использовать специфическую стратегию направленного конструирования нового антитела путем изменения его генотипа внесением комбинации генов антигена, позволяющее преодолеть межвидовые барьеры и быстро приобретать нужные гены, расширяя адаптационный потенциал антител. Данная стратегия заимствована из технологии генной инженерии (конструирования рекомбинантных противовирусных вакцин) и моделирует один из механизмов адаптивной эволюции – горизонтальный перенос генов.

Иллюстративный пример работы оператора трансформации индивидуумов популяций антител и антигенов, реализующего указанную стратегию, представлен на Рис. 8.

Промежуточная популяция из трех антител, полученных в процессе трансформации, подвергается соматической гипермутации. В про-

цессе гипермутации определяются значения t_n , t_r , t_o и записываются в генотип антител. Полученный вариант прогноза $A_h = \{Ab_{Rh}, Ab_{minh}, Ab_{maxh}\}$ записывается в БП. Если количество альтернатив N_{ABP} , заданное в начале выполнения процедуры, больше единицы, то пользователь корректирует значения параметров P_D , P_c , LB и UB для получения следующего варианта прогноза аналогичным путем. Работа процедуры построения прогноза завершается после обработки всех антигенов.

После получения из эксплуатирующих организаций фактических значений прогнозируемых величин иммунный алгоритм используется в режиме «Процедура формирования обучающей информации». На этапе задания начальных параметров настройки алгоритма пользователь выбирает режим «Процедура формирования обучающей информации» (устанавливает $S=2$) и вводит начальные значения номера варианта прогноза h и номера критического параметра i . Перейдя в выбранный режим, пользователем задаются начальные значения следующих параметров настройки: N_{ABP} , N_{kp} и P_{AE} . После этого в автоматическом режиме осуществляется загрузка антигена из БА и одного варианта прогноза из БП. Антиген подвергается мутации, когда размер его генотипа увеличивается за счет записи поступивших фактических значений прогнозируемого временного ряда. Далее происходит формирование клетки памяти из данного антигена и ее запись в БКП. Затем вычисляется аффинность связи между сформированной клеткой памяти и антителом Ab_{Rh} из загруженного варианта прогноза $A_h = \{Ab_{Rh}, Ab_{minh},$

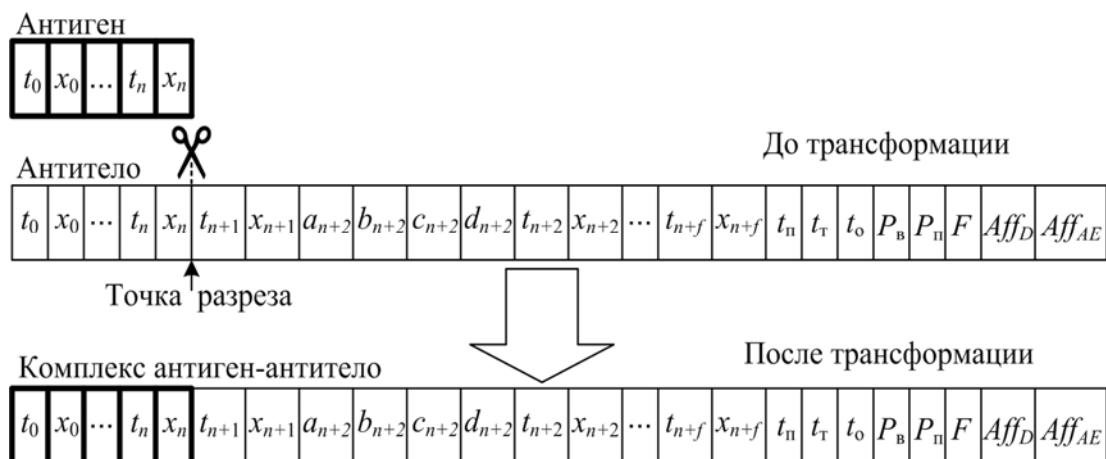


Рис. 8. Пример работы оператора трансформации

Ab_{maxh} и запись полученного значения Aff_{AE} в генотип антитела. Если в БП содержится несколько вариантов прогноза, то в циклическом режиме для каждого из вариантов прогноза из БП производятся операции загрузки, вычисления аффинности и записи. Далее вычисляются значения показателей качества прогнозирования AE , MAE , MPE , MSE , U , $K_{кип}$, $K_{кп}$ для выполненных прогнозов и записываются в БСИ. Из антител, удовлетворяющих условию $Aff_{AE} \leq P_{AE}$, определяется антитело с минимальным значением Aff_{AE} , из которого формируется вторая клетка памяти и записывается в БКП. Таким образом, процедура позволяет создать одну или две клетки памяти, в зависимости от качества прогноза. Затем корректируются (увеличиваются на единицу) значения показателей применимости P_n у тех клеток памяти, чьи потомки участвовали в глобальной промежуточной рекомбинации при формировании новой клетки памяти. Работа процедуры формирования обучающей информации завершается после обработки всех антигенов в циклическом режиме.

Следует добавить, что удаление из БИП обработанных антигенов и прогнозов, адаптация параметров, структуры и алгоритма функционирования ИИС осуществляется пользователем в режиме корректировки.

Заключение

В работе предложена концептуальная модель для решения задачи прогнозирования дрейфа критических параметров бортовой аппаратуры. Подход к построению двухсоставного прогноза основан на биологических механизмах иммунной системы и некоторых полезных идеях и принципах различных эволюционных теорий. Отличительной особенностью модели является использование комбинации метода моделирования правдоподобных рассуждений на основе прецедентов, иммунного алгоритма клональной селекции и метода аппроксимации экспериментальных данных кубическими сплайнами. Предложены также оригинальные структуры иммун-

ных объектов, учитывающие особенности предметной области. Полученные теоретические результаты являются основой для дальнейшей разработки модифицированного алгоритма клональной селекции и создания прикладной ИИС для поддержки принятия решений при контроле, как БАСУ [9], так и других сложных технических систем на предприятиях ракетно-космической отрасли.

Литература

1. Смирнов В.А. Приемочный контроль бортовых систем управления с использованием средств интеллектуального анализа данных // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т.8. №11. С. 99-103.
2. Смирнов В.А. Прецедентный подход к построению моделей процесса поиска неисправностей при диагностировании сложных технических систем // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. №6. С. 73-78.
3. Ларин В.П., Смирнов В.А. Интеллектуализация технологии приемочного контроля сложных технических объектов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. №1. С.191-196.
4. Дасгупта Д. Искусственные иммунные системы и их применение / Пер. с англ. М.: Физматлит. 2006. 344 с. (Dasgupta D. Artificial immune systems and their applications. Berlin: Springer-Verlag. 1999. 320 p.).
5. Кораблев Н.М., Иващенко Г.С. Гибридный метод краткосрочного прогнозирования временных рядов на основе модели клонального отбора // Нейроинформатика: научно-техническая конференция с международным участием: сборник научных трудов. М. 2014. Т.1. С. 79-89.
6. Демидова Л.А., Корячко А.В., Скворцова Т.С. Модифицированный алгоритм клонального отбора для анализа временных рядов с короткой длиной актуальной части // Системы управления и информационные технологии. 2010. Т.42. №4.1. С. 131-136.
7. Самигулина Г.А. Разработка интеллектуальных экспертных систем прогнозирования и управления на основе искусственных иммунных систем // Проблемы информатики. 2010. № 1. С. 15-22.
8. Бидюк П.И., Литвиненко В.И., Баклан И.В., Фефелов А.А. Алгоритм клонального отбора для прогнозирования нестационарных динамических систем // Искусственный интеллект. 2004. №4. С. 89-99.
9. Смирнов В.А., Смирнов Д.В. Разработка концептуальной модели системы поддержки принятия решений для приемочного контроля бортовой аппаратуры // Вестник СибГАУ. 2017. Т.18. №1. С. 149-159.

Смирнов Владимир Александрович. Ведущий инженер-электроник, руководитель группы перспективных заказов отдела новой техники ЗАО «Научно-производственный центр «Акварин» (Санкт-Петербург). Окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения в 1988 году. Кандидат технических наук. Количество печатных работ: 39. Область научных интересов: контроль сложных технических систем, методы искусственного интеллекта, информационные технологии, разработка систем поддержки принятия решений. E-mail: vlad.sm2010@yandex.ru

Смирнов Дмитрий Владимирович. Инженер-электроник второй категории отдела новой техники ЗАО «Научно-производственный центр «Акварин» (Санкт-Петербург). Окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения в 2013 году. Количество печатных работ: 6. Область научных интересов: кон-

троль сложных технических систем, методы искусственного интеллекта, информационные технологии, разработка систем поддержки принятия решений. E-mail: Smit-90@inbox.ru

Development of a conceptual model of artificial immune system prediction of the drift parameters of the onboard equipment

V.A. Smirnov, D.V. Smirnov

The problem of forecasting the drift of onboard equipment parameters is considered in the article. The purpose of this work is the formation of basic requirements, principles of construction, functioning and development of the conceptual model of the artificial immune system (IIS) for predicting the drift of critical parameters of an onboard automated control system (OACS) the flying machine (FM). Specificity of time series and scope is determined, biological models and heuristic methods for the proposed approach to forecasting are substantiated and selected. The comparison of the applied biological terms with their analogues from the subject domain is given. Proposed: a formal description and a conceptual model of IIS, structure of antigen, antibody and memory cells, a set of indicators of the quality of forecasting. The IIS model considered in the work has prospects for the successful application at the enterprises of the rocket and space industry in the creation of intelligent decision support systems (ISPPR) for the acceptance control of complex technical systems.

Keywords: prognostication, onboard automated control system, artificial immune systems, modified clonal selection algorithm, conclusion on precedents, spline approximation

References

1. Smirnov, V.A. 2014. Priemochnyy kontrol' bortovykh sistem upravleniya s ispol'zovaniem sredstv intellektual'nogo analiza dannykh [Acceptance inspection of onboard control systems with the use of data mining]. T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and transport]. Vol.8, No.11, P. 99-103.
2. Smirnov, V.A. 2013. Precedentnyy podkhod k postroyeniyu modeley protsessa poiska neispravnostey pri diagnostirovani slozhnykh tekhnicheskikh sistem [Precedential approach to model building process troubleshooting for diagnosing complex technical systems]. T-Comm: Telekommunikatsii i transport [T-Comm: Telecommunications and transport]. No.6, P. 73-78.
3. Larin, V.P., V.A. Smirnov. 2014. Intellektualizatsiya tekhnologii priemochnogo kontrolya slozhnykh tekhnicheskikh ob'ektov [Intellectualization of acceptance control technology of complex technical objects]. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki [Reports of Tomsk state University of control systems and Radioelectronics]. No.1, P. 191-196.
4. Dasgupta, D. 1999. Artificial immune systems and their applications. Berlin: Springer-Verlag. 320 p.
5. Korablev, N.M., G.S. Ivashchenko. 2014. Gibridnyy metod kratkosrochnogo prognozirovaniya vremennykh ryadov na osnove modeli klonal'nogo otbora [A hybrid method of short-term time series forecasting based on the model of clonal selection]. Neyroinformatika: nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya s mezhdunarodnym uchastiem: sbornik nauchnykh trudov [Neuroinformatics: scientific-technical conference with international participation: collection of scientific works]. Vol.1, P. 79-89.
6. Demidova, L.A., A.V. Koryachko, T.S. Skvortsova. 2010. Modifitsirovanny algoritm klonal'nogo otbora dlya analiza vremennykh ryadov s korotkoy dlinoy aktual'noy chasti [Modified clonal selection algorithm for the analysis of time series with short length of actual part]. Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii [Control systems and information technology]. Vol.42, No.4.1, P. 131-136.
7. Samigulina, G.A. 2010. Razrabotka intellektual'nykh ekspertnykh sistem prognozirovaniya i upravleniya na osnove iskusstvennykh immunnykh sistem [Development of intellectual expert systems of forecasting and control based on artificial immune systems]. Problemy informatiki [The problems of computer science]. No.1, P. 15-22.
8. Bidyuk, P.I., V.I. Litvinenko, I.V. Baklan, A.A. Fefelov. 2004. Algoritm klonal'nogo otbora dlya prognozirovaniya nestatsionarnykh dinamicheskikh sistem [A clonal selection algorithm for forecasting non-stationary dynamical systems]. Iskustvennyy intellekt [Artificial intelligence]. No.4, P. 89-99.
9. Smirnov, V.A., D.V. Smirnov. 2017. Razrabotka kontseptual'noy modeli sistemy podderzhki prinyatiya resheniy dlya priemochnogo kontrolya bortovoy apparatury [Development of a conceptual model of the system of decision support for acceptance control of onboard equipment]. Vestnik SibGAU [Vestnik SibGAU]. Vol.18, No.1, P. 149-159.

Smirnov V.A. Leading engineer-electronic, group leader future projects of new technology department of a Closed joint stock company "Scientific-production center "Akvamarin", Saint- Petersburg, Tallinskaya street, building 7. Candidate of technical Sciences. In 1988 he graduated from Leningrad Institute of aviation instrumentation. Number of publications: 39. Research interests: control of complex technical systems, artificial intelligence methods, information technologies, development of systems of support of decision-making. E-mail: vlad.sm2010@yandex.ru

Smirnov D.V. Engineer-electronic engineer 2 category of new technology department; Closed joint stock company "Scientific-production center "Akvamarin", Saint- Petersburg, Tallinskaya street, building 7. In 2013 he graduated from the St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation. Number of publications: 6. Research interests: control of complex technical systems, artificial intelligence methods, information technologies, development of systems of support of decision-making. E-mail: Smit-90@inbox.ru