

УДК 629.78

ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ПО ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИМ ДАННЫМ

Н.В. Румянцев

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Россия, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, 4А
E-mail: nikita.rumyantsev1@rsce.ru

Д.В. Павлов

Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва (РКК «Энергия»)
Россия, Московская обл., Королёв, ул. Ленина, 4А
E-mail: dmitry.pavlov@rsce.ru

Ключевые слова: космический аппарат, интеллектуализированная система, управление полётом, искусственные нейронные сети.

Аннотация: В работе представлена интеллектуализированная система контроля, диагностики и прогнозирования состояния бортовых систем КА, основанная на использовании искусственных нейронных сетей (ИНС). Приводится структура системы синтеза искусственных нейронных сетей, подготовки обучающих и тестовых наборов данных, обучения и создания компьютерных приложений (этап обучения) и системы анализа, где в реальном масштабе времени реализуются три основных процесса анализа поступающей с борта КА телеметрической информации (ТМИ): выявление аномалий в работе бортовых систем и агрегатов, определение расчетных нештатных ситуаций и прогнозирование оставшегося времени службы оборудования, технические характеристики которых подвержены естественной деградации (этап применения).

1. Введение

Надёжность управления полётом космическими аппаратами (КА) зависит от принятия качественных и оперативных решений по выдаче командных воздействий на борт КА. Практика показывает, что в ряде случаев только выдача команд немедленного исполнения позволяет предотвратить развитие опасных ситуаций. Надёжность решения таких задач повышается при использовании интеллектуализированной системы в составе наземного комплекса управления, применение которой направлено на ускорение процессов выявления нештатных режимов работы бортовых систем и уменьшение влияния «человеческого фактора».

В работе представлена интеллектуализированная система контроля, диагностики и прогнозирования состояния КА, основанная на вычислительном интеллекте с использованием методов глубокого обучения искусственных нейронных сетей. Предлагаемая интеллектуализированная система представляет собой информационно-вычислительную систему с интеллектуальной поддержкой при решении задач управления с участием специалиста (оператора).

2. Разработанная интеллектуализированная система

2.1. Этап обучения

Для решения задачи синтеза и настройки интеллектуализированной системы анализа ТМИ предлагается специальная ИИ-платформа, выступающая в роли системы разработки искусственных нейронных сетей рис. 1. Одной из целей ИИ-платформы является подготовка обучающих и тестовых наборов данных.



Рис. 1. Структура подготовки data-set.

Для формирования репрезентативного набора данных предлагается использовать комбинацию реальных и синтетических данных. В настоящее время наблюдается мегатренд на цифровизацию с использованием цифровых двойников для поддержки сложных технических систем, включая космические комплексы. Согласно этому тренду, в работе предполагается, что специалисты разработчики бортовых систем КА имеют качественные цифровые (компьютерные) модели. Это позволяет использовать такие модели с целью генерации адекватного синтетического набора обучающих данных. Одним из методов получения синтетических данных с помощью компьютерной модели является сценарный подход. На вход компьютерной модели поступает сценарий, содержащий баллистические данные, полётные операции и команды управления, которые передаются на борт КА с Земли, размеченные во времени. На основе сценария модель реализовывает режимы работы бортовой системы и формирует временной ряд значений ТМП, из которых синтезируется необходимый набор данных. Другой метод состоит в использовании возможностей комплексных моделирующих стендов космических аппаратов, которые можно рассматривать в качестве цифровых двойников и предназначены для экспериментальной отработки полетных операций в условиях максимально приближенных к реальным.

2.2. Этап анализа

Следуя сложившейся практике организации оперативного контроля технического состояния КА в пилотируемой космонавтике, для каждой составной части КА используется свое специализированное рабочее место специалиста (оператора) управления полетом. На этом этапе предлагаемая система предстает в форме интеллектуализированной системы анализа ТМИ для каждой составной части КА, объединенной общей концепцией и едиными инструментами универсальной

платформы. Интеллектуализированная система анализа обеспечивает подготовку телеметрических данных для выполнения анализа, реализует механизмы интерактивного взаимодействия специалиста управления с компьютерным ИИ-приложением и выполняет непосредственно анализ телеметрических данных с применением обученных искусственных нейронных сетей рис. 2.



Рис. 2. Интеллектуализированная система анализа ТМИ.

Для ИИ-приложений используются универсальные для всех составных частей КА базовые прототипы нейронных сетей рис. 1, отражающих три основных процесса анализа ТМИ, а именно:

- ИНС структуры LSTM автоэнкодер поиска аномалий;
- ИНС структуры LSTM классификации НШС;
- ИНС структуры LSTM автоэнкодер прогнозирования отказов.

В случае возникновения аномалии специалист группы управления полетом получает предупреждение о том, что в работе бортовой системы КА присутствуют отклонения и инициализируется процесс диагностики НШС.

3. Метрики оценки ИНС

Детектирование аномалий по сумме невязок. Стратегия детектирования аномалий по невязкам базируется на следующих принципах. Автоэнкодер обучается на

«нормальных» данных и таким образом запоминает характерные паттерны «без аномалий». «Нормальные» данные, в итоге, хорошо восстанавливаются и невязка между исходными данными и восстановленными мала. В случае аномальных данных, автоэнкодер не в состоянии их восстановить с той же погрешностью, что и нормальные данные. Это приводит к увеличению невязки между входными и восстановленными данными.

В качестве интегрального критерия наличия аномалий была взята сумма невязок

$$S(t) = \sum_{k=1}^N |x_k(t) - x_k^r(t)|,$$

где N – количество временных рядов; $x_k(t)$ – входные данные; $x_k^r(t)$ – восстановленные данные

Далее по интервалу $t_0 \leq t \leq t_{\text{end}}$ строится гистограмма $S(t)$. При наличии аномалий хотя бы по одному временному ряду, сумма невязок резко возрастет, что приводит к пространственному разделению гистограмм для трейновой выборки и аномальных данных[1-2].

4. Результаты обучения LSTM автоэнкодера поиска аномалий

Для проверки LSTM автоэнкодера поиска аномалий была выбрана система энергоснабжения КА Прогресс. ИНС обучалась на комбинации реальной и модельной телеметрии. Общий объем обучающего и тестового data-set составил 50000 телеметрических кадров из которых 20 были аномальные. По результатам обучения был построен график зависимости средней ошибки от времени обучения. Как видно из рис. 3 при увеличении времени обучения средняя ошибка уменьшается.

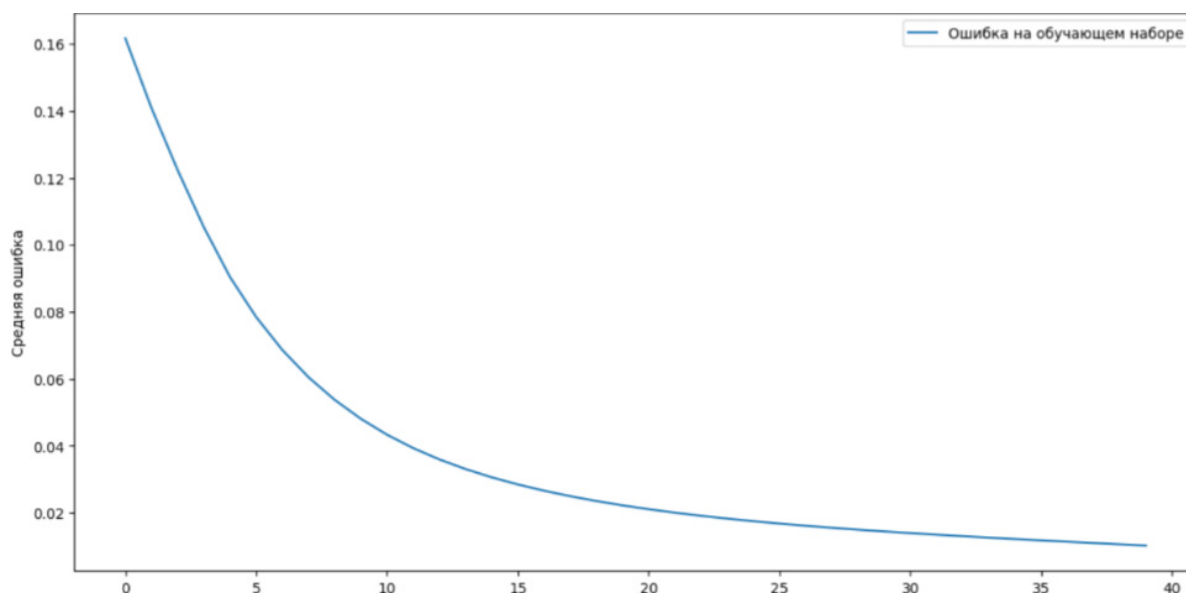


Рис. 3. График процесса обучения.

По результатам обучения:

- минимальная ошибка нормальных значений составила 0.00005;
- средняя ошибка нормальных значений составила 0.00201;
- максимальная ошибка нормальных значений составила 0.12853;

- минимальная ошибка аномальных значений составила 0.05020;
- средняя ошибка нормальных значений составила 0.09931;
- максимальная ошибка нормальных значений составила 0.07276.

При выборе порога определения аномалии в 0.01 ИНС определила 100 % аномальных значений и 97.8% процентов нормальных значений. Общая точность распознавания составила 98.7%.

5. Заключение

В докладе представлена интеллектуализированная система контроля диагностики и прогнозирования состояния бортовых систем КА, основанная на использовании технологии искусственных нейронных сетей (ИНС), состоящая из системы анализа телеметрической информации (ТМИ) (этап применения) и системы синтеза искусственных нейронных сетей (этап обучения). На этапе обучения происходит подготовка репрезентативных Data-set и обучение нейронных сетей. На этапе анализа ТМИ осуществляется поиск аномалий, классификация НШС и прогнозирование отказов агрегатов. Заложенные в систему методы контроля, диагностики и прогнозирования позволяют извлекать из поступающей ТМИ неочевидные знания о функционировании и взаимовлиянии составных частей КА и дают возможность принятия надёжных и оперативных решений. Был проверен элемент системы и показана его эффективность.

Список литературы

1. Jackson J., Mudholkar S. Control Procedures for Residuals Associated With Principal Component Analysis. // *Technometrics*. 1979. Vol. 21, No. 3. P. 341-349.
2. Трыков Е.Л., Трыкова И.В., Коцоев К.И. Обнаружение аномалий в работе реакторного оборудования с помощью нейросетевых алгоритмов // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. 2020. № 3. С. 136-147.