

Ю. Г. Емельянова, К. А. Константинов, С. В. Погодин,
А. А. Талалаев, И. П. Тищенко, В. П. Фраленко,
В. М. Хачумов

Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата

Аннотация. Описана нейросетевая технология решения задачи контроля датчиков положения космического аппарата. Рассмотрены общие вопросы организации мониторинга и обработки потоков информации, включая приближение и интерполирование экспериментальных данных. Приведены результаты решения задач обработки информационных потоков с использованием кластерного вычислителя. Дана оценка необходимого уровня производительности программно-аппаратного комплекса.

Ключевые слова и фразы: контроль датчиков положения, корреляционный анализ, искусственные нейронные сети, ориентация в пространстве.

1. Введение

Высокая стоимость космических проектов предъявляет повышенные требования к надежности космических аппаратов (КА). Для их удовлетворения необходимы новые методы контроля, способные обнаруживать аномалии в телеметрических данных. Телеметрия (потоки данных о положении КА, параметрах внешней среды и аппаратуры) представляет наивысший интерес, поскольку содержит важную информацию о состоянии объектов и требует быстрых средств контроля с применением современных вычислителей. В настоящее время на наземных станциях командно-измерительных систем отсутствуют инструменты автоматического анализа потоков данных, которые могут быть связаны с неисправностями и кратковременными сбоями. Целью настоящей работы является определение неисправностей датчиков положения и выявление участков телеметрии, в которых

Работа поддержана Программой Союзного государства «Космос–НТ» (проект «Нейросеть») и грантами РФФИ (№09–07–00006–а, 08–01–00485–а).

имеются сбои. В качестве математического аппарата для обработки целевой и телеметрической информации предлагается использовать аппарат искусственных нейронных сетей (ИНС) [1, 2]. Нейронные сети высококачественно обрабатывают информацию, распознают и классифицируют ситуации и образы даже при неполных или нечетких входных данных [3]. Ускорение вычислений достигается за счет использования отечественных кластерных установок (КВУ) семейства СКИФ.

Функционирование системы контроля происходит следующим образом:

- все показания датчиков фиксируются в базе данных;
- строится модель текущего состояния контролируемой аппаратуры;
- моделируемые значения фиксируются в базе данных;
- на основании сравнения реальных и моделируемых показаний датчиков производится анализ текущего состояния системы и принимается решение;
- информация о выявленных неисправностях передается оператору.

2. Задачи мониторинга датчиков углов положения и дальности

Решение задач контроля системы датчиков в условиях помех осуществляется на основе выдвижения и проверки предположений о корреляции и правдоподобности показаний, исходя из физической модели КА и его конструктивных особенностей.

2.1. Постановка задачи выявления сбоев и методы ее решения

Сложность решения задачи выявления сбоев и отказа датчиков определяется отсутствием телеметрических данных с прецедентами различных поломок и возможности проведения натурального эксперимента. Единственный выход в сложившейся ситуации — строить и проверять гипотезы, основанные на эвристических предположениях, учитывающих особенности конструкции КА и расположение элементов управления его движением. Запуск соответствующего двигателя

коррекции положения аппарата по одному из углов, или другие управляющие действия, как правило, приводит к некоторому изменению значений и других датчиков. Если предположить, что при исправных датчиках имеет место устойчивая корреляционная зависимость в их показаниях, то резкое снижение такой зависимости, при воздействии на любой двигатель ориентации, будет служить сигналом о возможной неисправности. Контроль датчиков осуществляется на основе следующих предположений:

- (1) Исправные датчики, в силу конструктивных особенностей КА, устойчиво коррелируют друг с другом.
- (2) Аномалии, противоречащие конструктивным особенностям и модели КА, относятся к категории сбоев или помех.

Данные положения проверяются в ходе эксперимента.

2.2. Экспериментальная проверка гипотезы о корреляции датчиков

Для проверки первой гипотезы была разработана программа, выполняющая предобработку показаний датчиков КА. Проверялось наличие парной и тройной корреляции между показаниями датчиков. Ниже предлагается методика проведения эксперимента.

Воспользуемся данными от шести датчиков, измеряющих следующие параметры: дальность (D), скорость (V), курсовой угол по первой линии связи (УКР), тангажный угол по первой линии связи (УТР), курсовой угол по второй линии связи (УКА) и тангажный угол по второй линии связи (УТА). Получим все комбинации пар (a, b) специальных векторов при выполнении следующих условий: каждый элемент пары есть набор значений $x_1^1 x_2^1 \dots x_m^1 \dots x_1^n x_2^n \dots x_m^n$, где x_i^j — i -е показание j -го датчика, являющееся результатом комбинирования по n отсчетов с m разных датчиков. Число таких комбинаций равно $\frac{k!}{2(k! - 2m!)}$, где k — общее количество датчиков. Для каждой такой комбинации (a, b) находим среднеарифметическое значение коэффициента ранговой корреляции Спирмена [4], используя сканирующее окно (для каждой позиции окна вычисляется значение корреляции). Варьируя размером сканирующего окна, можно определить его оптимальный размер, при котором среднеарифметическое значение коэффициента корреляции для комбинации (a, b) будет максимальной.

Вычисление включает следующие этапы:

- (1) сопоставление каждому из признаков порядкового номера по возрастанию (или убыванию) корреляции;
- (2) определение разности рангов d для каждой пары сопоставляемых значений;
- (3) вычисление коэффициентов корреляции рангов по формуле

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^p d_i^2}{p(p^2 - 1)} = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^p (x^i - y^i)^2}{p(p^2 - 1)},$$

где $\sum_{i=1}^p d_i^2$ — сумма квадратов разностей рангов, а p — число парных наблюдений.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента по нахождению взаимосвязанных наборов датчиков по данным файла телеметрии.

Таблица 1. Коэффициенты корреляции наборов датчиков

Наборы датчиков	Значение корреляции
УКА и УТА	0.732575
D, V и УТР, УТА	0.776135
D, УТР, УКА и V, УТА, УКР	0.651810

В результате, получены наборы датчиков, показания которых имеют высокую корреляцию. Было обнаружено снижение корреляции при внесении помех в показания датчиков и наличие реакции на имитацию поломки устройства. Таким образом, на основании результатов экспериментов был сделан вывод о верности первой гипотезы.

2.3. Экспериментальная проверка гипотезы о наличии сбоя, вызванного помехой

Рассмотрим задачу обнаружения сбоев на примере параметра дальности. В канале измерения производится формирование отсчета дальности и его привязка к временной шкале. Сформированные таким образом измерения дальности образуют массив, содержащий в том числе, ложную информацию об изменениях дальности в результате воздействия помех. Далее вычисляется фактическое значение с использованием аппроксимирующего полинома, учитывающего реальные характеристики КА и «игнорирующего» наличие сбоя датчика в результате воздействия помехи.

Предположение о наличии сбоя основывается на том факте, что показания датчиков могут не отвечать физическим законам движения КА. Например, резкое изменение показания датчика дальности и следующий за ним возврат в исходное положение свидетельствуют о наличии помехи или сбоя датчика, поскольку не соответствует динамике полета КА. Такие показания необходимо распознавать и корректировать, отфильтровывая помеху. На рис. 1 приведен пример воздействия краткосрочной помехи на характеристику дальности, позволяющая визуально наблюдать наличие сбоя.

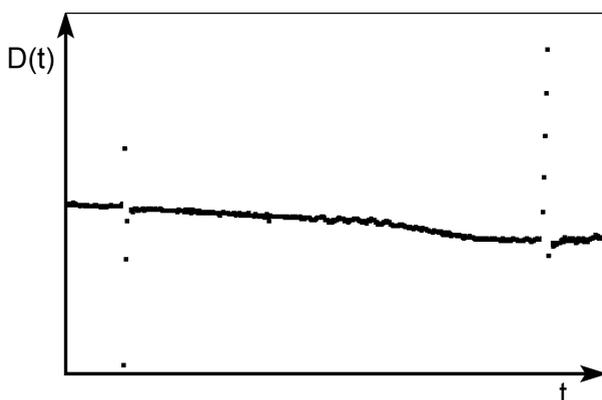


Рис. 1. Фрагмент графика показаний датчика дальности

Приближение показаний датчиков полиномом позволяет находить и игнорировать наличие сбоя в результате помехи. Сложность обработки реальных данных и подбора полинома заключается в наличии сбоев в виде выбросов, что должно быть учтено в коэффициентах полинома. Алгоритм подбора степени полинома основан на пошаговом приближении измеренных и восстановленных данных.

На первом шаге алгоритма всем отсчетам приписывается определенный вес. При этом выделяют отсчеты времени с резким изменением скорости показаний, которым назначается относительно небольшой вес, чтобы уменьшить их влияние на характер приближающего полинома. На данном шаге выявляются моменты времени (отсчеты), в которых реальные данные значительно отклоняются от восстановленных полиномом.

На втором шаге производится анализ отклонений. Вводится пороговое значение отклонения Δ , которое обусловлено конструктивными особенностями КА. В результате проведенных экспериментальных исследований принято $\Delta = 0.03$. На рис. 2 черным цветом отображены показания датчика, голубым цветом представлены данные, восстановленные полиномом, а красным — обозначены моменты времени, в которых отклонения измеренных датчиком значений превысили допустимый порог.

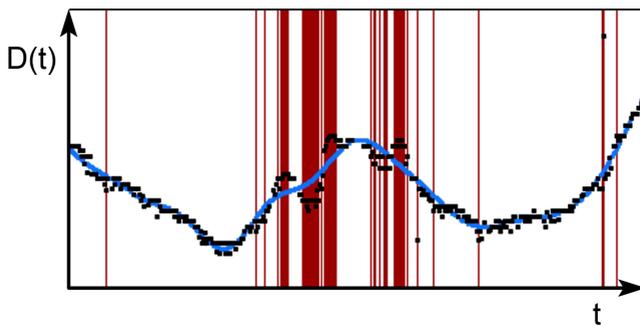


Рис. 2. Сбои в показаниях датчика

На третьем шаге осуществляется перераспределение весов точек и повторно подбирается полином. Таким образом достигается большая точность интерполяции показаний датчиков. Результаты работы алгоритма представлены на рис. 3, где черным цветом обозначены реальные показания датчика дальности, а голубым — восстановленные значения на основе анализа показаний и выявления сбоев.

Пороговые значения подбираются экспериментально. Полином может служить также для выполнения интерполяции и экстраполяции временных рядов.

3. Решение задач контроля телеметрии в программной системе

Рассмотрим решение нескольких задач контроля с использованием модулей параллельной программной системы «ППС ИНС», развернутой на кластерном вычислительном устройстве (КВУ) семейства «СКИФ».

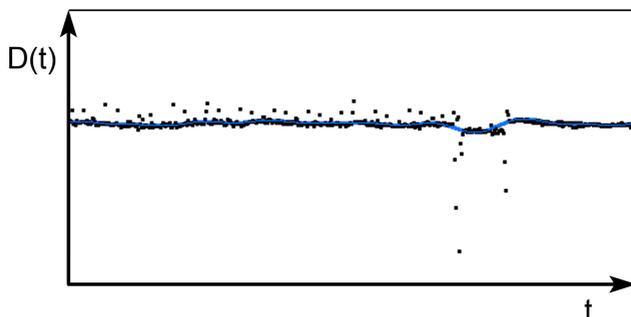


Рис. 3. Восстановленные без сбоев показания датчика

3.1. Задача выявления сбоя методом анализа корреляционных зависимостей

ИНС обучается методом обратного распространения ошибки и позволяет, на основании известных данных, производить прогнозирование значений показаний датчиков и корреляций. Места сбоев обнаруживаются в результате сравнения реального и прогнозного значений корреляции. Если ошибка прогноза превышает установленный порог, то фиксируется сбой. Приведем графическую схему данной задачи (рис. 4).

Алгоритм обработки входных данных можно описать следующим образом:

- (1) Модуль `clean_reader` (`dat_reader`) отправляет данные телеметрии, предназначенные для сглаживания, модулю `SensorFailClean` (`sensorfail`) в канал `Input`.
- (2) Модуль `norm_reader` (`dat_reader`) отправляет предназначенные для нормализации данные телеметрии модулю `SensorFailNorm` (`sensorfail`) в канал `Input`.
- (3) Модуль `SensorFailClean` (`sensorfail`) сглаживает данные и отправляет модулю `Dat_extractor` (`dat_extractor`) в канал `InputLearn`.
- (4) Модуль `SensorFailNorm` (`sensorfail`) нормализует данные телеметрии и отправляет модулю `Dat_extractor` (`dat_extractor`) в канал `InputRecognize`.
- (5) Модуль `Dat_extractor` (`dat_extractor`):

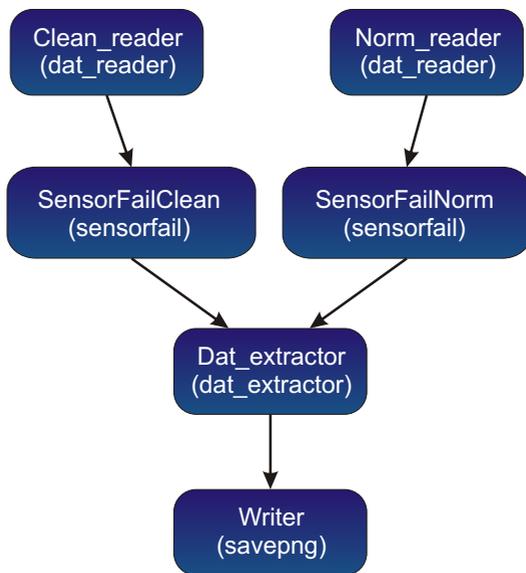


Рис. 4. Схема задачи

- на основании данных из канала `InputLearn` определяет группы датчиков с максимальной корреляцией;
- вычисляет значения корреляции из канала `InputRecognize`;
- находит ошибки прогноза корреляции.

(6) Модуль `Writer (savepng)` получает из канала `Input` графики с результатами и сохраняет их.

В случае корректной работы модуля будут созданы три графических файла: график по набору UKP и UTP; график по набору D, UTA и V, UKA; график по набору D, V, UKP и UTA, UKA, UTP. Перечисленные графики представлены на рис. 5, 6, 7, где синим цветом обозначены ошибки прогноза нейронной сети, а черным — значения прогноза ранговой корреляции Спирмена для набора датчиков.

При тестировании системы на КВУ «СКИФ» были получены следующие результаты (рис. 8, табл. 2):

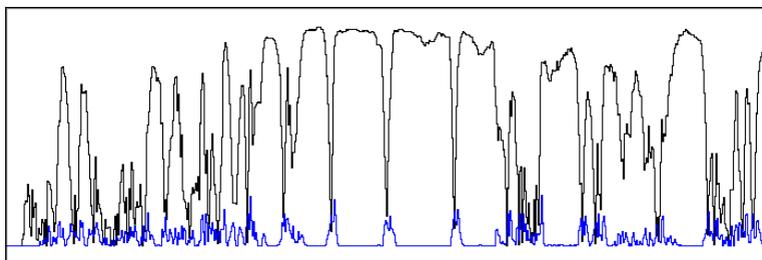


Рис. 5. График по набору UKP и UTP

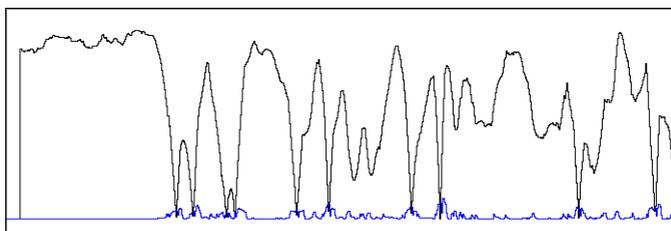


Рис. 6. График по набору D, UTA и V, UKA

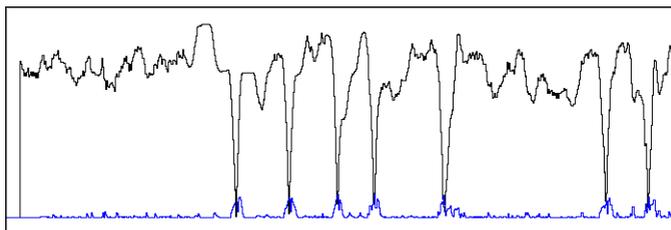


Рис. 7. График по набору D, V, UKP и UTA, UKA, UTP

3.2. Аппроксимация значений временных рядов

Решается задача аппроксимации значений временных рядов при наличии сбоев в показаниях датчиков. Описание задачи представлено в виде графической схемы на рис. 9.

Алгоритм обработки входных данных можно описать следующим образом:

ТАБЛИЦА 2. Результаты тестирования на КВУ СКИФ «Первенец-М»

Кол-во процессоров	Время, с	Время (относительное)
1	365.84	1.000
2	195.24	1.874
3	139.57	2.621
4	115.37	3.171
5	98.57	3.711
6	88.93	4.114
7	82.17	4.452
8	77.33	4.731
9	79.57	4.598
10	74.21	4.930

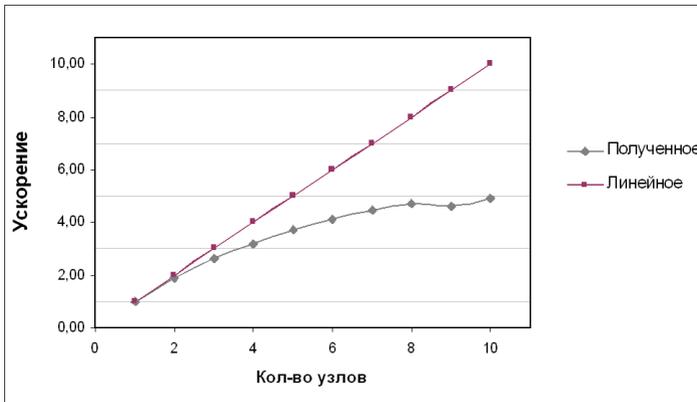


Рис. 8. Ускорение счета при увеличении количества узлов

- (1) Модуль Reader (`dat_reader`) отправляет данные телеметрии модулю SensorFail (`sensorfail`) в канал Input.
- (2) Модуль SensorFail (`sensorfail`) обрабатывает данные телеметрии и передает модулю Writer (`savepng`) изображение, на котором показаны исходные и сглаженные данные телеметрии.
- (3) Модуль Writer (`savepng`) сохраняет полученные изображения.

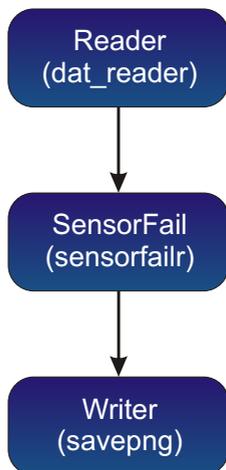


Рис. 9. Схема задачи

Входные данные представляют собой показания шести датчиков и соответствующие им отсчеты времени. Фрагмент описания входных данных приведен в табл. 3.

Таблица 3. Описание входных данных (фрагмент)

Время	D	V	UKP	UTP	UKA	UTA
02:43:05.27	0.2375	-0.029	1.51	6.58	-0.53	-0.33
02:43:05.47	0.2367	-0.029	1.54	6.62	-0.53	-0.33
02:43:05.67	0.2367	-0.029	1.54	6.65	-0.53	-0.33
02:43:05.88	0.2367	-0.029	1.54	6.65	-0.53	-0.33
02:43:06.09	0.2367	-0.029	1.54	6.65	-0.53	-0.33
02:43:06.29	0.2375	-0.029	1.54	6.65	-0.53	-0.33
02:43:06.49	0.2375	-0.026	1.54	6.65	-0.53	-0.34

На рис. 10 показаны найденные сбои в показаниях датчиков (визуально не определяются).

На данном этапе, реализация модуля `Sensorfail` не предусматривает параллельной обработки входных данных. При тестировании системы на КВУ «СКИФ», с использованием одного узла, были получены результаты, представленные в табл. 4.

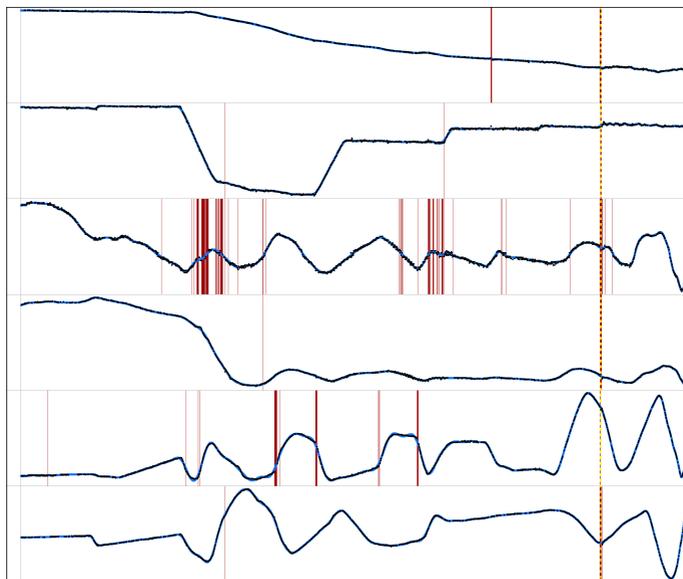


Рис. 10. Выделенные сбои

Таблица 4. Результаты тестирования

Название файла телеметрии	Кол-во отсчетов телеметрии	Время обработки, с
P39.dat	2240	25.96
P40.dat	3075	25.96

4. Характеристики программно-аппаратного комплекса диагностики

Экспериментальный комплекс решает следующие задачи:

- интерполяция числовых рядов показаний датчиков с использованием метода наименьших квадратов;
- прогнозирование значений числовых рядов с применением искусственных нейронных сетей (ИНС);
- контроль и диагностика датчиков положения КА с использованием ИНС;

- контроль и диагностика системы поддержания давления в баках с помощью вероятностной нейронной сети.

Все задачи были протестированы с учетом их распараллеливания на кластерной установке. Предполагается, что данные для обработки поступают в комплекс со скоростью 256 Кбит/сек. В табл. 5 приведены данные для различных задач, выполняемых программным комплексом на основе искусственных нейронных сетей. Тестирование было проведено на узле с производительностью 6.125 Гфлопс.

Таблица 5. Оценка требуемой производительности

Задача	Время, с обработки,	Оценка требуемой производительности, Гфлопс
Нейросетевая диагностика состояния баков	0.015	5.88
Нейросетевая диагностика состояния датчиков положения КА	0.004	1.568
Предсказание значения числового ряда на базе нейронной сети	0.005	1.96

Предполагаемые пути повышения производительности связаны с установкой графических ускорителей для многопоточковой обработки информации, развертыванием высокоскоростной коммутационной сети для обмена данными между узлами кластерной установки.

5. Заключение

В статье рассмотрен подход к обнаружению сбоев датчиков, основанный на применении корреляционного анализа и нейронных сетей. Подтверждено предположение о наличии устойчивой корреляции некоторых датчиков. Прогнозирование корреляции наборов датчиков с помощью нейронной сети позволяет на основании значения ошибки прогноза находить сбои в показаниях датчиков. Контроль на основе анализа парных корреляций дает возможность провести дополнительную обработку и определить конкретный датчик, показания которого не верны.

Разработана нейросетевая технология, включающая методы и алгоритмы мониторинга потоков телеметрии, прогнозирования и интерполирования временных рядов с целью обнаружения аномалий. Используется аппарат вероятностных нейронных сетей, с помощью которого можно прогнозировать возможные значения потока данных с датчиков или, в более сложном случае, значение функции корреляции. Нейронная сеть способна также интерполировать входные отсчеты, что важно для решения задач определения местоположения КА или решения других задач, сопряженных с анализом временных рядов. Предложена итерационная процедура построения аппроксимирующего полинома с функцией фильтрации сбоев датчиков. Дана оценка необходимого уровня производительности для перспективного программно-аппаратного комплекса космического назначения.

Статья подготовлена в рамках работ по Программе Союзного государства «Космос-НТ» (проект «Нейросеть») и проектов РФФИ (№09-07-00006-а, 08-01-00485-а).

Список литературы

- [1] Ватутин В. М., Гвоздяков Ю. А., Заднепровский В. Ф., Круглов А. В., Снегирев В. М., Фраленко В. П., Хачумов В. М. *Алгоритмы сжатия данных и прогнозирования внештатных ситуаций при управлении КА с применением искусственных нейронных сетей* // Труды всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы ракетно-космического приборостроения и информационных технологий». — РНИИ КП, 2009, с. 185–194. ↑1
- [2] Емельянова Ю. Г., Талалаев А. А., Фраленко В. П., Хачумов В. М. *Нейросетевой метод обнаружения неисправностей в космических подсистемах* // Труды международной конференции «Программные системы: теория и приложения» (г. Переславль-Залесский, май 2009)/ ИПС им. А.К. Айламазяна РАН. — Переславль-Залесский : Изд-во «Университет города Переславля», 2009. Т. 1. — ISBN 978-5-901795-16-3, с. 133–143. ↑1
- [3] Талалаев А. А., Тищенко И. П., Фраленко В. П., Хачумов В. М. *Анализ эффективности применения искусственных нейронных сетей для решения задач распознавания, сжатия и прогнозирования* // Искусственный интеллект и принятие решений, 2008. Т. 2, с. 24–33. ↑1
- [4] Корреляция Спирмена : Wikipedia, the free encyclopedia, <http://ru.wikipedia.org/wiki/Correlation>. ↑2.2

J. G. Emeljanova, K. A. Konstantinov, S. V. Pogodin, A. A. Talalaev, I. P. Tishchenko, V. P. Fralenko, V. M. Khachumov. *Monitoring system of spacecraft orientation angle-data and distance transmitters based on artificial neural networks.*

АБСТРАКТ. The neural network technology of spacecraft orientation transmitters control task solution is described. The general organization problems of monitoring and information flow processing including experimental data interpolation and approximation is considered. The task solution results of diagnosis and information flow processing with using cluster evaluator is presented. The necessary performance level estimation of perspective bundled software is given.

Key Words and Phrases: orientation transmitters control, correlation analysis, artificial neural network, spatial orientation.

Образец ссылки на статью:

Ю. Г. Емельянова, К. А. Константинов, С. В. Погодин, А. А. Тала-лаев, И. П. Тищенко, В. П. Фраленко, В. М. Хачумов. *Нейросетевая система контроля датчиков углов ориентации и дальности космического аппарата* // Программные системы: теория и приложения : электрон. научн. журн. 2010. № 1(1), с. 45–59. URL: http://psta.psiras.ru/read/psta2010_1_45-59.pdf