УДК 681.5.09м

Алгоритм первичной обработки телеметрической информации с автоматизированной верификацией исходных данных и коррекцией ошибок

Algorithm for primary processing of telemetric information with automated check of initial data and correction of errors

Шмелев / Shmelev V.
Валентин Валерьевич
(vka@mil.ru)
доктор технических наук, доцент.
ФГБВОУ ВО «Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского» МО РФ
(ВКА имени А. Ф. Можайского),
заместитель начальника кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств.
г. Санкт-Петербург

Попов / Popov A.
Антон Михайлович
(vka@mil.ru)
ВКА имени А. Ф. Можайского,
адъюнкт кафедры технологий и средств автоматизации обработки и анализа информации космических средств.
г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: обработка телеметрической информации – processing of telemetric information; сети Петри – Petri nets; анализ свойств сетей Петри – analysis of properties of Petri nets; ошибки обработки телеметрической информации – telemetric information processing errors; автоматизированная верификация – automatic check; коррекция ошибок – error correction.

В статье приведено краткое описание этапов обработки телеметрической информации космических средств. Представлен процесс первичной обработки телеметрической информации с помощью вычислительной сети Петри в среде CPN IDE. Представлен способ поиска и устранения ошибок при вводе различного рода исходных данных в систему обработки на примере задания масштабного ко-эффициента при проведении операции обработки телеметрической информации.

The article provides a brief description of the processing of telemetric information from space vehicles. The solution of the process of processing telemetric information using the computational Petri net in the CPN IDE.
A method for finding and using errors when entering initial values of initial values in the processing system by increasing the scale factor setting when changing the use of telemetric information processing.

Введение

В процессе сбора и обработки телеметрической информации (ТМИ) космических средств (КСр) встречаются случаи, когда поступают неадекватные значения телеметрируемых параметров вследствие ошибки, возникшей в процессе сбора и обработки ТМИ. Однако понять, что именно влияние ошибки привело к некорректному отображению параметра, в оперативном режиме практически невозможно. Ошибки такого рода, как правило, выявляются спустя несколько месяцев после полной обработки и анализа всей телеметрии, поступившей с объекта контроля. Природа причин ошибок, которые могут возникнуть, различна: от ошибки оператора при задании исходных данных на сеанс обработки до семантических ошибок в алгоритмах и ошибках при коммутации аппаратуры.

В данной статье мы рассмотрим алгоритм первичной обработки телеметрической информации с ошибкой в исходных данных, которую допускает оператор при вводе задания на обработку, порядок ее выявления и устранения.

Основные этапы обработки телеметрической информации космических средств

В настоящее время в эксплуатации находятся следующие три основных вида космических средств: ракеты-носители, разгонные блоки и космические аппараты. Особенности конструкции, целевого назначения, эксплуатации указанных групп космических средств пред-полагают применение различных схем (и соответствующих им операций) обработки их ТМИ. Вместе с тем теория и практика обработки показала, что для подавляющего числа КСр все операции можно объединить в три этапа, включив в каждый из них схожие для всех КСр технологические операции. Рассмотрим их более подробно.

3 2023.indd 53 02.10.2023 12:32:07

1. *Предварительная обработка.*

Исходными данными для предварительной обработки является групповой телеметрический сигнал (ГТС) КСр, представляющий собой закодированные по определенным алгоритмам измерения датчиков бортовой радиотелеметрической системы в цифровом виде [1,2]. При предварительной обработке выполняются следующие операции:

– выбор необходимых параметров, интервалов времени для обработки и оценки качества измерений, который осуществляется в соответствии с заданием на обработку и учитывает интересы потребителя в результатах обработки;

– повышение достоверности входной информации путём выявления и отбраковки недостоверных телеметрических кадров (ТМК);

– декоммутация ГТС, предусматривающая синхронизацию наземной и бортовой части телеметрической системы и выделение из ГТС информации по отдельным каналам сигнала (т. е. измерения отдельных телеметрируемых параметров (ТМП)).

2. *Первичная обработка.*

Основной её целью является корректный перевод относительных величин (единиц телеметрической шкалы) в абсолютные единицы отсчёта (физические единицы). На вход поступают декоммутированные измерения ТМП (по отдельным каналам). При этом выполняются следующие технологические операции:

– повышение достоверности телеметрических данных (путём отбраковки аномальных измерений, сглаживания, усреднения измеренных параметров и учёта состояния каналов измерения и передачи данных);

– дешифровка выбранных данных, т. е. определение оценок измеряемых параметров в физических единицах (калибровка и тарировка);

– привязка дешифрованных значений ТМП ко времени;

– формирование летно-технических характеристик (ЛТХ).

3. *Вторичная обработка.*

Основной её целью является определение технического состояния бортовых систем (БС). Включает в себя:

– представление и анализ результатов обработки;

– определение параметров состояния и оценка работоспособности БС;

– определение обобщённых характеристик БС и КСр в целом;

– выработка элементов решения на управление КСр [3].

Моделирование процесса обработки ТМИ

Рассмотрим процесс первичной обработки телеметрической информации. Для этого представим его в виде вычислительной сети Петри, построенной в среде CPN IDE. Это необходимо для того, чтобы установить причинно следственные связи между выполняемыми операциями и состояниями, точно обозна-

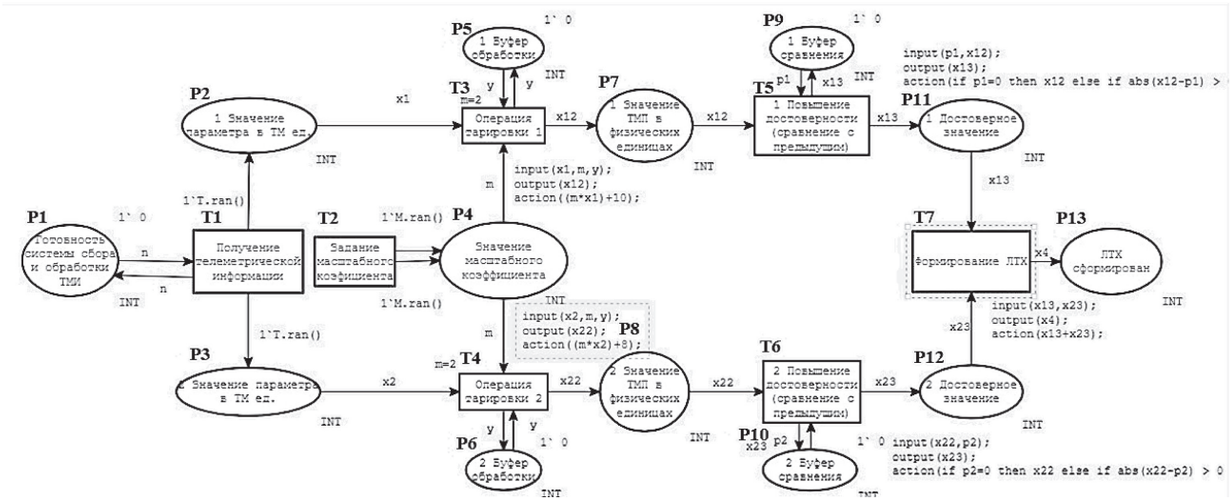

Рис. 1. Процесс первичной обработки телеметрической информации в среде CPN IDE

3 2023.indd 54 02.10.2023 12:32:07

чить последовательность выполняемых операций, проверить правильность функционирования процесса.

На рис. 1 представлен этап первичной обработки телеметрической информации для двух параметров, включающий в себя операции тарировки, повышения достоверности (с использованием алгоритма сравнения с предыдущим) и формирования летно-технической характеристики. Сформированный процесс верифицирован средствами среды проектирования, требуемое (конечное) состояние достигается корректно [4–6].

Сформированная сеть состоит из 13 позиций (P_1..P_{13}) и 7 переходов (T_1..T_7). Каждой позиции соответствует определенное состояние (условие), а каждому переходу – операция:

P_1 – готовность системы сбора и обработки ТМИ;

P_2 – наличие значения ТМП в телеметрических единицах для 1-го параметра;

P_3 – наличие значения ТМП в телеметрических единицах для 2-го параметра;

P_4 – наличие значения масштабного коэффициента;

P_5 – наличие свободного буфера обработки для 1-го параметра;

P_6 – наличие свободного буфера обработки для 2-го параметра;

P_7 – получение значения 1-го ТМП в физических единицах;

P_8 – получение значения 2-го ТМП в физических единицах;

P_9 – наличие предыдущего значения ТМП в буфере сравнения для 1-го параметра;

P_{10} – наличие предыдущего значения ТМП в буфере сравнения для 2-го параметра;

P_{11} – получение достоверного значения 1-го ТМП;

P_{12} – получение достоверного значения 2-го ТМП;

P_{13} – получение значения летно-технической характеристики;

T_1 – оператор получения значения ТМП (производится при готовности системы сбора и обработки ТМИ и передает случайным образом сформированное от 0 до 100 значение ТМП в P_1 и P_2);

T_2 – оператор задания масштабного коэффициента (производится при готовности системы сбора и обработки ТМИ и передает случайным образом сформированное от 0 до 3 значение масштабного коэффициента в P_4);

T_3 – оператор тарировки для 1-го ТМП (функция перевода из телеметрических единиц в физические задана автором условно);

T_4 – оператор тарировки для 2-го ТМП (функция перевода из телеметрических единиц в физические задана автором условно);

T_5 – оператор повышения достоверности (с использованием алгоритма сравнения с предыдущим) для 1-го ТМП;

T_6 – оператор повышения достоверности (с использованием алгоритма сравнения с предыдущим) для 2-го ТМП;

T_7 – оператор формирования летно-технической характеристики (функция формирования ЛТХ задана автором условно).

Для поиска ошибок рассмотрим часть сформированного процесса, в котором происходит ввод исходных данных при задании на обработку.

На рис. 2 представлен процесс перевода значения параметра из телеметрических единиц в физические (операция тарировки).

Сформированная сеть состоит из 5 позиций (P_1..P_5) и 3 переходов (T_1..T_3). Каждой позиции соответствует определенное состояние (условие), а каждому переходу – операция:

P_1 – готовность системы сбора и обработки ТМИ;

P_2 – наличие значения ТМП в телеметрических единицах;

P_3 – наличие значения масштабного коэффициента;

P_4 – наличие свободного буфера обработки;

P_5 – получение значения ТМП в физических единицах;

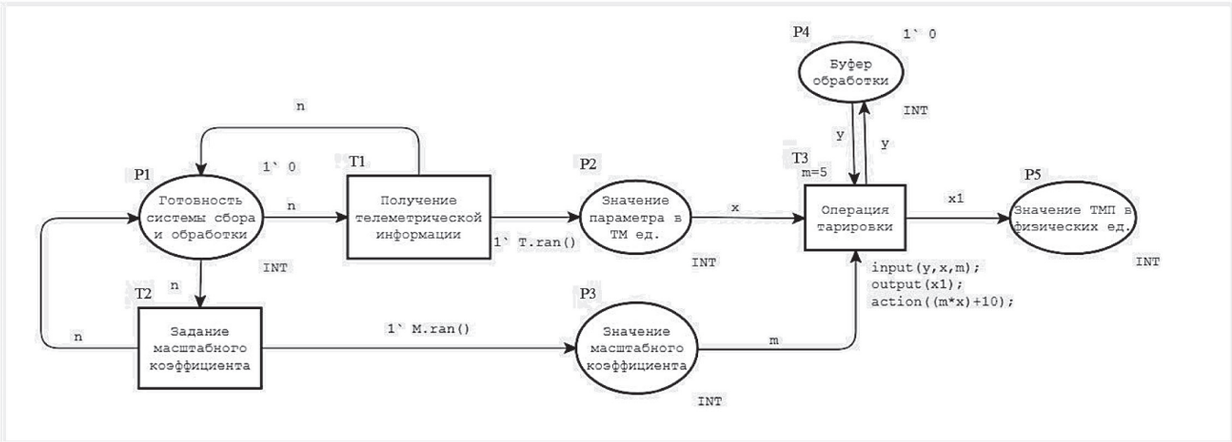

Рис. 2. Процедура тарировки в среде CPN IDE

3 2023.indd 55 02.10.2023 12:32:07

T_1 – оператор получения значения ТМП (производится при готовности системы сбора и обработки ТМИ и передает случайным образом сформированное от 0 до 100 значение ТМП в P_2);

T_2 – оператор задания масштабного коэффициента (производится при готовности системы сбора и обработки ТМИ и передает случайным образом сформированное от 0 до 5 значение масштабного коэффициента в P_3);

T_3 – оператор тарировки (функция перевода из телеметрических единиц в физические задана автором условно).

Обратим внимание на переход T_3 «Операция тарировки 1». Над блоком в левом верхнем углу мы увидим конструкцию вида «m=5», что означает предикат перехода. Другими словами, переход T_3 «Операция тарировки 1» выполнится только в том случае, если во всех входящих в него позициях: P_2, P_3 и P_4, будет «фишка», а в позиции «Значение масштабного коэффициента» будет требуемая «фишка», значение которой равно 5.

Необходимо пояснить, что в действительности значение масштабного коэффициента задается оператором, что является потенциальным местом возникновения ошибки. В случае задания неправильного масштабного коэффициента перевод значения параметра из телеметрических единиц в физические осуществится некорректно.

Для поиска такого рода ошибок необходимо перевести сформированную вычислительную сеть Петри в эквивалентную ей классическую сеть Петри [7]. Переход будем производить по следующему алгоритму:

– Преобразование операторов в классические переходы сети Петри. При этом операторы, стоящие перед операторами с условиями, (т. е. те операторы, которые задают значение фишки) будут делится на два перехода: удовлетворяющий условию переход и неудовлетворяющий условию переход.

– Преобразование позиций в классические позиции сети Петри.

– Преобразование дуг в классические дуги, функции и цвета удаляются. При этом, если есть количественное условие перехода, т. е. значение фишки или количество фишек должно соответствовать определенному числу, тогда в классической сети Петри будем ставить в соответствие количество дуг при переходе между элементами вершин.

– Преобразование входных переменных в классические фишки, значения переменных удаляется. При необходимости значению переменной будет соответствовать количество фишек в классической сети Петри.

Тогда в классической сети Петри конструкция рис. 2 примет вид, представленный на рис. 3. Обратим внимание, что оператор T_2 из сети, представленной

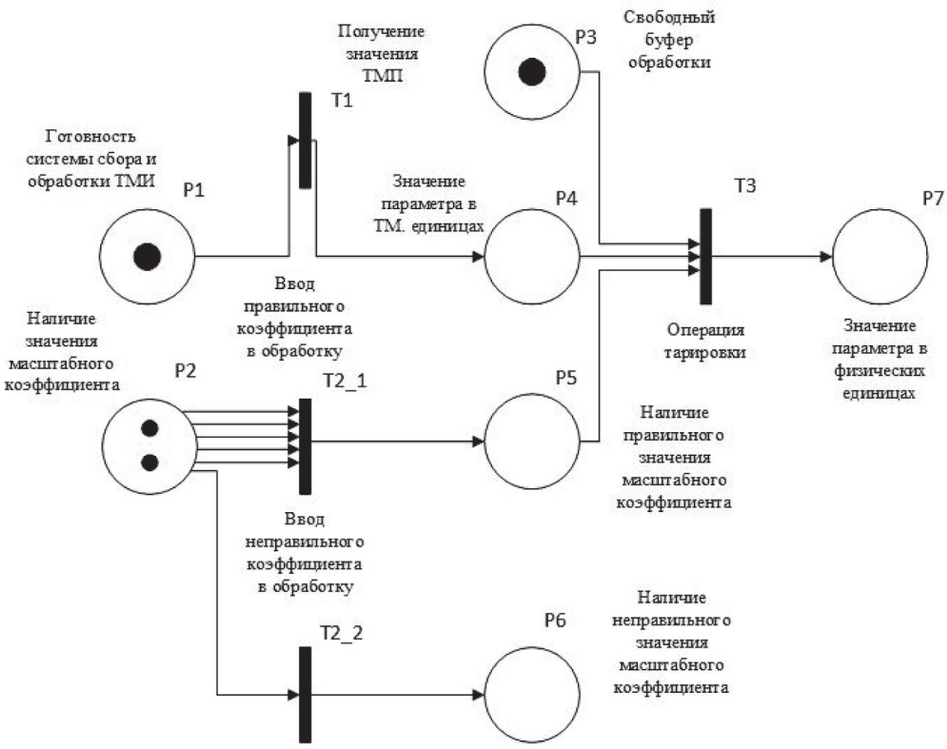

Рис. 3. Операция тарировки в классической сети Петри с ошибкой в исходных данных

3 2023.indd 56 02.10.2023 12:32:10

на рис. 2, находится перед оператором с условием T_3 и в соответствии с пунктом 1 приведенного алгоритма преобразования T_2 из рис. 2 делится на два перехода T_{2_1} и T_{2_2} на рис. 3.

Перевод в классическую сеть Петри необходим для проведения анализа свойств полученной сети посредством построения матрицы инцидентности.

В рамках сформированной модели необходимо получить корректное значение телеметрируемого параметра в физических единицах, а следовательно, получить требуемую конечную маркировку сети, вектор которой будет равен (0,0,0,0,0,0,1) (вектор показывает наличие фишки в позиции P_7). При этом начальная маркировка будет иметь ошибку, из-за которой требуемой маркировки достичь не удастся (корректной является начальная маркировка (1,5,1,0,0,0,0), на рис. 2 начальная маркировка представлена вектором (1,2,1,0,0,0,0), ошибка в позиции P_2 «Значение масштабного коэффициента»).

Поскольку речь идет о требуемой конечной маркировке сети, будем анализировать сформированную модель на свойство достижимости [8].

Для анализа свойств сети, представленной на рисунке 3, построим матрицы входных и выходных инциденций [9–10], которые будут иметь вид:

$$D^- = \begin{array}{c|ccccccc} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 \\ \hline t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_{2_1} & 0 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_{2_2} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_3 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \quad (1)$$

$$D^+ = \begin{array}{c|ccccccc} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 & p_7 \\ \hline t_1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ t_{2_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ t_{2_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \quad (2)$$

На основании полученных матриц вычислим матрицу инцидентности по формуле:

$$D = D^+ - D^- \quad (3)$$

$$D = \begin{matrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{matrix} \quad (4)$$

Для анализа свойства достижимости сети, представленной на рис. 3, решим следующее уравнение:

$$\mu'^T = \mu^T + e^T[i] \cdot D\,, \quad (5)$$

где μ'^T – вектор-строка, характеризующая требуемую (конечную) маркировку сети;

μ^T – вектор-строка, характеризующая начальную маркировку сети;

$e^T[i]$ – вектор-строка, значения которой определяют номера и количество срабатываний переходов, переводящих сеть из μ^T в μ'^T;

D – матрица инцидентности.

Заранее зная требуемую, интересующую нас маркировку, запишем уравнение:

$$(0,0,0,0,0,0,1) = (1,2,1,0,0,0,0) + (x_1, x_2, x_3, x_4) \cdot$$

$$\cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (6)$$

Сводя (6) к системе линейных уравнений, получим следующие выражения:

$$(-1,-2,-1,0,0,0,1) = (-x_1, -5x_2 - x_3, -x_4, x_1 - x_4, x_2 - x_4, x_3, x_4) \quad (7)$$

$$\begin{cases} -x_1 = -1 \\ -5x_2 - x_3 = -2 \\ -x_4 = -1 \\ x_1 - x_4 = 0 \\ x_2 - x_4 = 0 \\ x_3 = 0 \\ x_4 = 1 \end{cases}, \begin{cases} x_1 = 1 \\ 5 \cdot 1 + 0 - 2 = 0 \\ x_4 = 1 \\ x_1 = x_4 \\ x_2 = x_4 \\ x_3 = 0 \\ x_4 = 1 \end{cases}, \begin{cases} x_1 = 1 \\ 3 \neq 0 \\ x_4 = 1 \\ x_1 = x_4 \\ x_2 = x_4 \\ x_3 = 0 \\ x_4 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

Как видно из полученной системы линейных уравнений, во всех уравнениях, кроме второго, равенство соблюдается, однако данная система не имеет решения.

Поскольку в данном примере мы ищем и исправляем ошибки в исходных данных, которые в данной системе уравнений представлены свободными членами, необходимо таким образом исправить свободный коэффициент, чтобы система уравнений имела удовлетворяющее нас решение, а именно $X \in [0; +\infty)$.

Тогда, чтобы система имела решение, во втором уравнении добавим свободный коэффициент, равный -3, и решение уже измененной системы уравнений примет вид:

$$\begin{cases} -x_1 = -1 \\ -5x_2 - x_3 = -2 - 3 \\ -x_4 = -1 \\ x_1 - x_4 = 0 \\ x_2 - x_4 = 0 \\ x_3 = 0 \\ x_4 = 1 \end{cases} \quad (9)$$

3 2023.indd 57 02.10.2023 12:32:10

Последовательно проведем обратную операцию для получения выражения (5), с учетом выполненных нами изменений.

$$(-1,-5,-1,0,0,0,1) = \\ = \left(-x_1, -5x_2 - x_3, -x_4, x_1 - x_4, x_2 - x_4, x_3, x_4\right) \quad (10)$$

Далее необходимо из разности маркировок $\Delta\mu$ (левая часть выражения (10)) получить начальную путем вычета требуемой (конечной) маркировки:

$$\Delta\mu = e^T[i] \cdot D \quad (11)$$

$$\Delta\mu = \mu'^T - \mu^T \quad (12)$$

$$\mu^T = \mu'^T - \Delta\mu \quad (13)$$

Получим:

$$\mu^T = \left(0,0,0,0,0,0,1\right) - \left(-1,-5,-1,0,0,0,1\right) = \\ = \left(1,5,1,0,0,0,0\right) \quad (14)$$

$$\left(0,0,0,0,0,0,1\right) = \left(1,5,1,0,0,0,0\right) + \left(x_1, x_2, x_3, x_4\right) \cdot \\ \cdot \begin{vmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -5 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \quad (15)$$

Получаем выражение (15), где в векторе μ^T видны изменения, полученные при выполнении обратного преобразования в выражение (5). Сравнивая полученное выражение (15) с начальным выражением (6), обнаруживаем различия в векторе начальной маркировки, а именно в маркировке позиции P_2, что соответствует заданию правильного значения масштабного коэффициента.

Заключение

Таким образом, был смоделирован процесс обработки телеметрической информации при выполнении операции тарировки, смоделирована ошибка при вводе исходных данных, построена классическая сеть Петри, эквивалентная данному процессу, проведен анализ свойства достижимости полученной сети, внесены изменения в систему линейных уравнений для получения удовлетворяющего решения, выполнена операция обратного преобразования и выявлено место ошибки и ее значение.

Также проведена проверка логики вычислений сформированной сети: при задании корректных исходных данных сформированная модель обработки в классической сети Петри перейдет в требуемое (конечное) состояние, а при задании некорректных исходных данных требуемую (конечную) маркировку не достичь, что говорит о корректности используемой модели.

Данный подход можно использовать для поиска ошибок при вводе различного рода исходных данных, а также анализа системы на возможность ее перехода в требуемое состояние.

В дальнейшем необходимо развивать данный подход для поиска более сложных ошибок, заключающийся в некорректном отношении между элементами системы.

Литература

1. Николаев, А. Ю. Модель выявления семантических ошибок в алгоритмах первичной обработки телеметрической информации космических средств / А.Ю. Николаев, Е.Б. Самойлов, В.В. Шмелев // Труды ВКА им. А.Ф. Можайского. – 2022. – № 682. – С. 238–247.
2. Полимодельный комплекс оперативного диагностирования технического состояния сложных технических систем на основе функционально логических схем обработки измерительной информации / В.В. Шмелев, А.Ю. Николаев, А.Ю. Иваню, М.Н. Волков // Авиакосмическое приборостроение. – 2022. – № 1. – С. 44–53.
3. Шмелев, В. В. Методика оперативного диагностирования системы управления расходованием топлива ракетносителей типа "Союз-2" на основе функционально-логических схем обработки телеметрической информации в режиме реального времени / В.В. Шмелев, А.Ю. Николаев, Е.Б. Самойлов // Авиакосмическое приборостроение. – 2022.– № 5. – С. 34–46.
4. Зайцев, Д. А. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools / Д.А. Зайцев, Т.Р. Шмелева. – Одесса : Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова. – 2006. – 68 с.
5. Рудаков, И. В. Алгоритм верификации программного обеспечения с помощью иерархических сетей Петри / И.В. Рудаков, В.О. Медведев // Наука и бизнес: пути развития. – 2019. – № 1 (91). – С. 74–77.
6. Оленев, В. Л. Методология формализованного проектирования коммуникационных протоколов на основе сетей Петри / В.Л. Оленев // Информация и Космос. – 2022. – № 4. – С. 37–45.
7. Медведев, В. О. Верификация программного обеспечения формализованного сетью Петри / В.О. Медведев, И.В. Рудаков // Современные научные исследования и разработки. – 2017. – № 7 (15). – С. 230–233.
8. Котов, В. Е. Сети Петри / В.Е. Котов. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы. – 1984. – 160 с.
9. Шмелев, В. В. Применение модифицированных сетей Петри к моделированию процесса послеполетного анализа телеметрической информации / В.В. Шмелев, Ю.С. Мануйлов // Труды МАИ. – 2015. – № 84. – С. 29.
10. Шмелёв, В. В. Обоснование методики мониторинга технического состояния ракет-носителей с компенсацией искажений процесса телеизмерений / В.В. Шмелёв, В.Г. Зиновьев, Д.О. Зайцев // Информация и Космос. – 2019. – № 4. – С. 145–151.

3 2023.indd 58 02.10.2023 12:32:11