

А. М. Попов;
В. В. Ткаченко,
кандидат технических наук;
В. В. Шмелев,
доктор технических наук, доцент

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ И ОТЛАДКИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассматриваются различные аспекты обработки измерительной информации, полученной от ракет-носителей, включая алгоритмы анализа телеметрической информации, модели и способы организации распределенных систем сбора и обработки измерительной информации, применение интеллектуальных методов анализа и оценку характеристик телеметрируемых параметров при проведении испытаний и пусков. Приведены примеры ошибок, оказывающих влияние на представление измерительной информации о техническом состоянии бортовых систем ракет-носителей, что не позволяет адекватно оценить штатность функционирования изделий как при испытаниях, так и при штатной эксплуатации изделий.

Обоснована необходимость разработки методики, обеспечивающей повышение степени доверия к функционированию алгоритмов обработки за счет внедрения в структуру процесса обработки верификации исходных данных и логики построения специального программно-математического обеспечения (СПМО).

Приведен пример реализации методики в условиях нештатного поведения телеметрируемых параметров (ТМП) при возникновении различного рода ошибок в алгоритмах обработки телеметрической информации (ТМИ). Показано, каким образом осуществляется интерпретация ошибок в поведении свойств сети Петри. Описан пример поиска и коррекция возникающих ошибок с использованием формальных математических инструментов сетей Петри.

Ключевые слова: алгоритмы обработки информации, ошибки в алгоритмах, сети Петри, анализ свойств, верификация модели, отладка модели, моделирование вычислительных процессов.

ВВЕДЕНИЕ

Опыт эксплуатации комплексов обработки ТМИ и анализа штатности функционирования бортовых систем космических средств показал, что при подготовке СПМО проверка процесса обработки измерительной информации осуществляется визуально по предполагаемому положению значений параметров на средствах отображения на основании эмпирической выборки. Уязвимой стороной такого подхода являются:

- низкая степень возможности изменений алгоритмов обработки для перспективных изделий;
- длительные временные интервалы для внесения поправок в действующий алгоритм обработки телеизмерений;
- высокая степень доверия оценке эксперта по результату процесса.

Причины описанных недостатков могут заключаться в несовершенстве математического аппарата моделирования обработки ТМИ. Для обоснования возможности решения задачи проверки исходных данных и при необходимости коррекции алгоритмов обработки ТМИ, необходимо синтезировать формальную модель, описывающую процессы верификации исходных данных и отладки алгоритмов обработки ТМИ. Процесс обработки ТМИ состоит из разнородных компонент, и для того чтобы выбрать математическую основу для его моделирования, необходимо определить, какие задачи должны решаться с их помощью [1].

Протекции от указанных уязвимостей можно добиться за счет вычислительных сетей Петри, обладающих набором математических правил и свойств, позволяющих математически анализировать процесс обработки ТМИ [1]. Интерпретация вычислительных сетей Петри для алгоритмов обработки ТМИ позволит производить отладку процесса в автоматизированном режиме.

АНАЛИЗ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫХ СВЯЗЕЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ОШИБОК В АЛГОРИТМАХ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

При обработке телеметрической информации (ТМИ) допускаются ошибки при задании исходных данных:

- масштабных коэффициентов;
- значений коэффициентов для перевода в абсолютные величины;
- адреса каналов и портов;
- последовательности вычислительных операций и т. д.

В практике обработки ТМИ периодически возникают различные ошибки представления результатов обработки, что значительно затрудняет процесс последующего оценивания штатности функционирования бортовых систем и изделия в целом. Например, на этапе подготовки исходных данных перед пуском РКН в массив исходных данных для полной обработки телеметрической информации внесены неверные значения масштабных коэффициентов. Характеристика ТМП в таком случае имела аномальное поведение, отличающееся от поведения этого параметра при проведении предыдущих испытаний аналогичного изделия. Причину аномалии удалось установить только на заводе-изготовителе несколько месяцев спустя – значение масштабного коэффициента для данного типа параметров «250» не соответствовало заданию на обработку – «400».

При реализации алгоритмов обработки ТМИ могут не учитываться приоритеты предикатов, приводящие к заикливаниям в алгоритмах. Имели место случаи, когда при подготовке баз данных (БД) для обработки ТМИ, т. е. формуляров отображения в реальном масштабе времени (РМВ), их содержание не соответствовало требуемому. Такие ошибки приводят к подмене БД обработки ТМИ на неактуальную базу данных при загрузке оператором. Причина ошибки в неосвобождении буфера от предыдущих значений БД, что приводит к заикливанию при закладке БД на обработку. В случаях неправильного задания логических и функциональных выражений для вычисления значений параметров или нарушения очередности операций обработки ТМИ, отдельные ТМП обрабатываются несоответствующими операторами обработки. Такие ошибки приводят к нарушению семантического содержания значительной части данных о техническом состоянии отдельных агрегатов изделия.

Описанные примеры можно представить в виде табл. 1.

Таблица 1

Примеры ошибок в алгоритмах обработки ТМИ

№ п/п	Причины возникновения ошибок	Проявление ошибки	Результаты допуска ошибок в алгоритмах обработки ТМИ
1	Ошибка оператора	Получена ТМИ с некорректными значениями ТМП	Ошибка в значении масштабного коэффициента
2	Ошибка в алгоритме обработки ТМИ (нереализация приоритетных предикатов)	Невозможность внести требуемую БД на обработку	Зацикленность закладки БД
3	Ошибка в алгоритме (нарушение последовательности вычислительных операций при обработке ТМП)	Поведение полученных ТМП не соответствовало поведению подобных ТМП при предыдущих пусках	Отдельные ТМП обрабатывались несоответствующими операторами

Наличие ошибок в алгоритмах обработки ТМИ говорит о недостаточно качественной процедуре их подготовки и порождает задачу повышения степени доверия к их функционированию.

МЕТОДИКА ВЕРИФИКАЦИИ И ОТЛАДКИ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ТМИ

Для осуществления процедуры поиска и коррекции ошибок в алгоритмах обработки ТМИ предлагается методика, состоящая из последовательности шагов.

Шаг 1. Формирование структурно-функциональной модели процесса обработки ТМИ.

Шаг 2. Построение матриц входных D^- и выходных D^+ инцидентов, основанных на количественных отношениях элементов множеств модели (позиций и переходов, где под позициями понимается состояние процесса обработки ТМИ, а под переходами – операции обработки).

Шаг 3. Расчет матрицы инцидентности D структурно-функциональной модели процесса обработки ТМИ, закладка в модель начальной разметки сети Петри μ^T , эквивалентной начальному состоянию процесса обработки ТМИ, проведение анализа свойства достижимости модели.

Шаг 4. При некорректном решении уравнения провести коррекцию начальной маркировки сети μ^T , коррекцию отношений между элементами сети, необходимую для поиска места ошибки в алгоритме обработки ТМИ [4, 7].

Шаг 5. Проведение анализа свойства устойчивости (незацикленности) для поиска зацикливаний в алгоритмах обработки ТМИ [2]. Если решение уравнения устойчивости «нулевое», то алгоритм обработки ТМИ имеет зацикливание.

Шаг 6. При «нулевом» решении уравнения устойчивости провести коррекцию отношений между элементами сети в матрицах входных D^- и выходных D^+ инцидентов (упразднить циклические отношения). В процессе обработки ТМИ это отражается во внесении приоритетных предикатов в операции обработки ТМИ или в пересмотре последовательности таких операций.

Шаг 7. Осуществить проверку упразднения отношений путем решения уравнения достижимости.

Шаг 8. Вывод об успешной отладке модели.

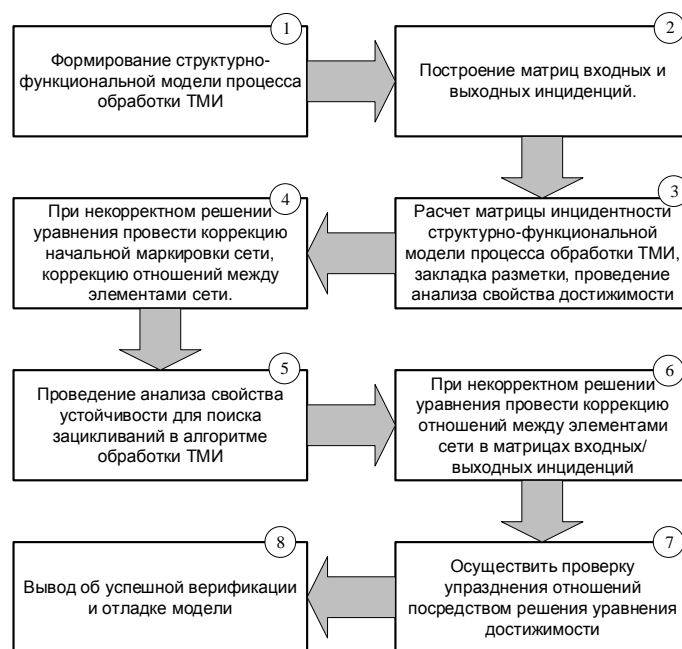


Рис. 1. Структура методики верификации и отладки алгоритмов обработки ТМИ

ФОРМАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ПРОЦЕССА ОБРАБОТКИ ТМИ

В соответствии с шагом 1 предлагаемой методики рассмотрим операции обработки ТМИ в структурно-функциональном представлении в виде вычислительной сети Петри.

Структурно-функциональная модель обработки телеметрической информации представлена на рис. 2.

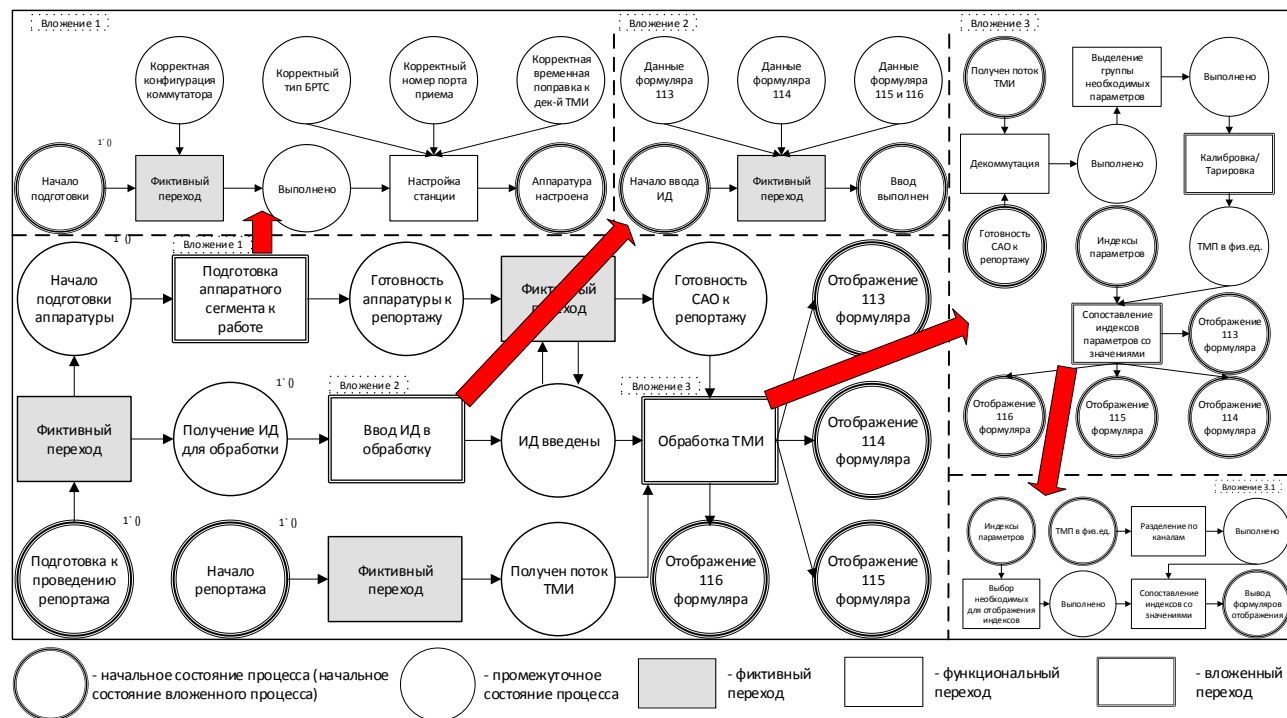


Рис. 2. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ на основе вычислительной сети Петри

Элемент модели «начальное состояние процесса (начальное состояние вложенного процесса)» моделирует наличие необходимого начального состояния (необходимых начальных условий) для запуска операций обработки ТМИ. Элемент модели «промежуточное состояние» моделирует наличие необходимых условий для выполнения промежуточных операций обработки ТМИ. Элемент «фиктивный переход» не выполняет функциональных операций: он необходим для адекватного воспроизведения процесса обработки ТМИ. Элемент «вложенный переход» сам по себе является отдельной упрощенной вычислительной сетью Петри, внутри которой могут находиться все остальные элементы, а при необходимости – и более высокой вложенности. Элемент «функциональный переход» может содержать в себе различные функции обработки ТМИ, операторы сравнения и т. д. По существу, представляет собой конкретную операцию обработки ТМИ.

В сформированную модель процесса обработки ТМИ заложим приведенные в табл. 1 ошибки и покажем, как, используя правила сетей Петри, можно производить отладку модели процесса.

ОТЛАДКА ФОРМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ТМИ

Рассмотрим первый пример из табл. 1 – неправильное внесение в массив исходных данных для обработки значения масштабного коэффициента. Поскольку модель, представленная на рис. 2, достаточно громоздкая, произведем декомпозицию этой модели до части внесения

исходных данных в обработку. Тогда искомая часть может быть представлена в виде сети Петри, как показано на рис. 3 (шаг 1 указанной методики).

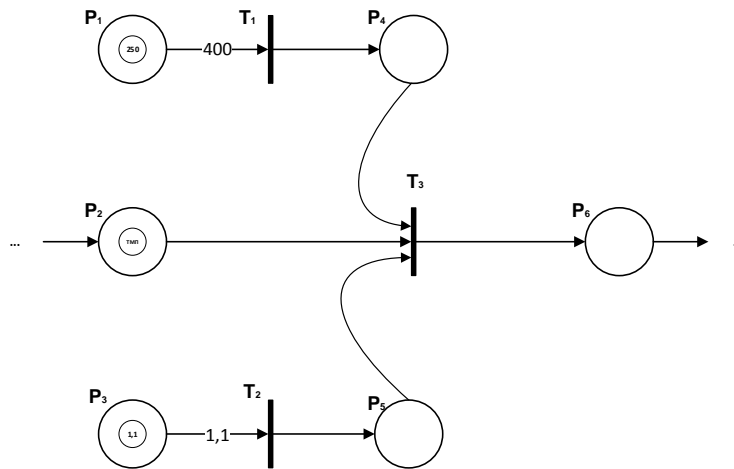


Рис. 3. Декомпозированная сеть Петри ввода масштабного коэффициента

Согласно шагам 2 и 3 рассматриваемой методики, необходимо составить матрицу инцидентности D полученной сети и решить уравнение достижимости [2]. Известен вектор начальной разметки μ^T , который характеризуется вводом в массив ИД значений масштабного коэффициента (позиция P_1 на рис. 3), наличием значения ТМЭ в телеметрических единицах (позиция P_2 на рис. 3) и значения перевода ТМЭ в абсолютные величины (позиция P_3 на рис. 3). Известен вектор конечной разметки μ^T , получены значения ТМЭ в физических единицах (позиция P_6 на рис. 3). Тогда получим:

$$(0, 0, 0, 0, 0, 1) = (250, 1, 1, 0, 0, 0) + \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -400 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{cases} 400x_1 = 250 \\ x_3 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_1 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases} \quad (2)$$

Система линейных уравнений (2) не имеет корректного решения [3, 6], необходимо осуществить переход к этапу коррекции начальной маркировки μ^T в соответствии с работами [4, 7].

Переходим к шагу 4 рассматриваемой методики.

Сведя (2) к каноническому виду, получим

$$J = \begin{bmatrix} 400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 250 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Используя предлагаемый в работах [4, 7] подход, получим скорректированную систему линейных уравнений

$$\begin{cases} 400x_1 = 400 \\ x_3 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_1 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases}. \quad (4)$$

Для алгоритма обработки ТМИ корректировка системы линейных уравнений означает, что неверное значение коэффициента, введенное в ИД для обработки, исправилось на корректное (исправлено значение масштабного коэффициента с 250 на 400). Переход к дальнейшим шагам методики нецелесообразен, потому что ошибку удалось обнаружить и исправить на шаге 4.

Таким образом, первую ошибку, приведенную в табл. 1, можно обнаружить и исправить, используя предлагаемую методику.

Поведение ТМП до и после исправления ошибки представлено на рис. 4.

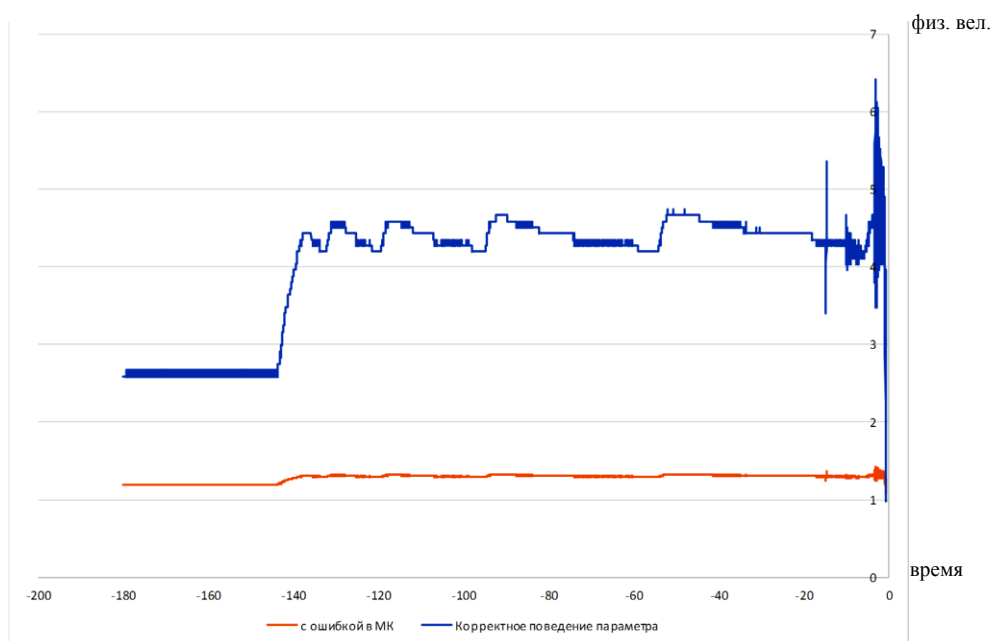


Рис. 4. Поведение ТМП с ошибкой и после коррекции

Для шагов 5–7 предлагаемой методики рассмотрим второй пример ошибки из табл. 1 – возникновение заикливания в алгоритме обработки телеметрической информации. Декомпозированная сеть Петри такого процесса представлена на рис. 5.

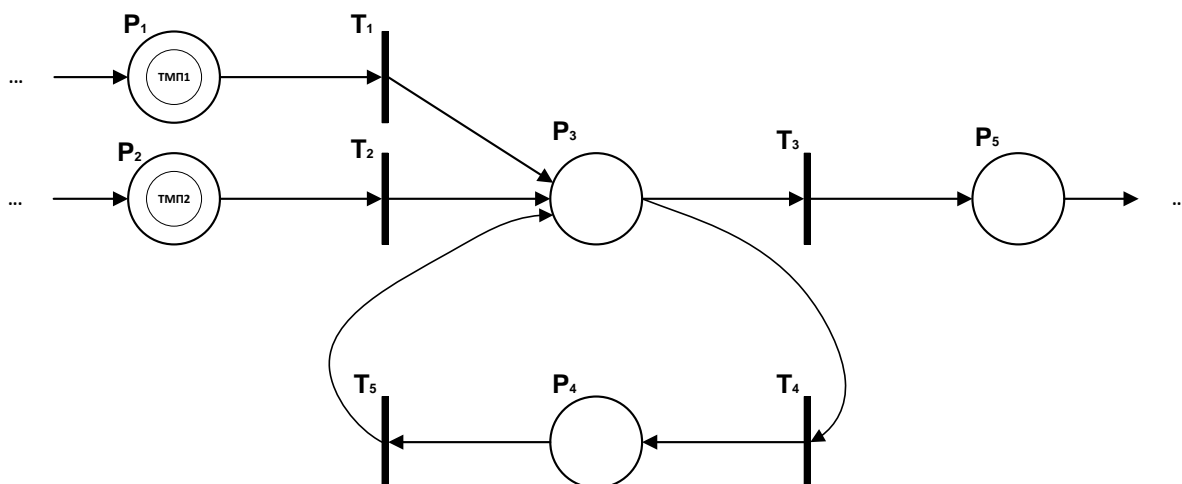


Рис. 5. Устойчивая сеть Петри процесса обработки ТМИ

Физически такое заикливание также может быть выражено в неосвобождении буфера от предыдущего значения на этапе сравнения значений телеизмерений при повышении достоверности, в нереализации в алгоритме обработки приоритетных предикатов, в неочищении буфера от разностных характеристик и т. п.

Для поиска заикливаний в сети, представленной на рис. 5, необходимо составить матрицу инцидентности D и решить уравнение устойчивости (5) [2]. Поскольку в данном случае речь идет об алгоритме обработки ТМИ, необходимо чтобы все операции над телеизмерениями выполнялись в соответствии со своей очередностью, поэтому вектор срабатываний переходов A будет единичным. Тогда

$$D \cdot A = 0 \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

Сеть будет устойчива, если произведение матрицы инцидентности D на вектор срабатываний переходов A даст нулевое решение [3, 6]. Переходим к шагу 5.

$$A \cdot D = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Для отладки заикливаний в алгоритме обработки ТМИ необходимо проанализировать матрицу входных инцидентий D^- на множественные отношения из позиций в переходы:

$$\exists I : P \rightarrow T^n \in D^-, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \forall I : P \rightarrow T^n \in D^-, n \in N, d_{pt}^- = 0, \\ \forall p \in [1, n], \forall t \in [1, m] : P \rightarrow T \in D^-. \end{aligned} \quad (9)$$

Перейдем к шагу 6. Изменяем сеть, исправив отношения между позициями и переходами в ручном режиме, или последовательно упраздняем (в матрице инцидентности D^- принимать элемент отношения за «0») отношения между позициями и переходами до решения уравнения достижимости в автоматизированном режиме [2].

Анализ матрицы входных инцидентий D^-

$$D^- = \begin{array}{c|ccccc} & p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 \\ \hline t_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ t_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ t_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ t_4 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ t_5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \quad (10)$$

показывает, что позиция P_3 входит в несколько переходов, образуя цикл, и является началом заикливания алгоритма.

Таким образом, по предлагаемой методике производят отладку заикливаний в алгоритмах обработки ТМИ, а также исправляют ошибки, подобные второй ошибке из табл. 1. Поведение ТМП при наличии заикливания в алгоритме обработки ТМИ представлено на рис. 6.

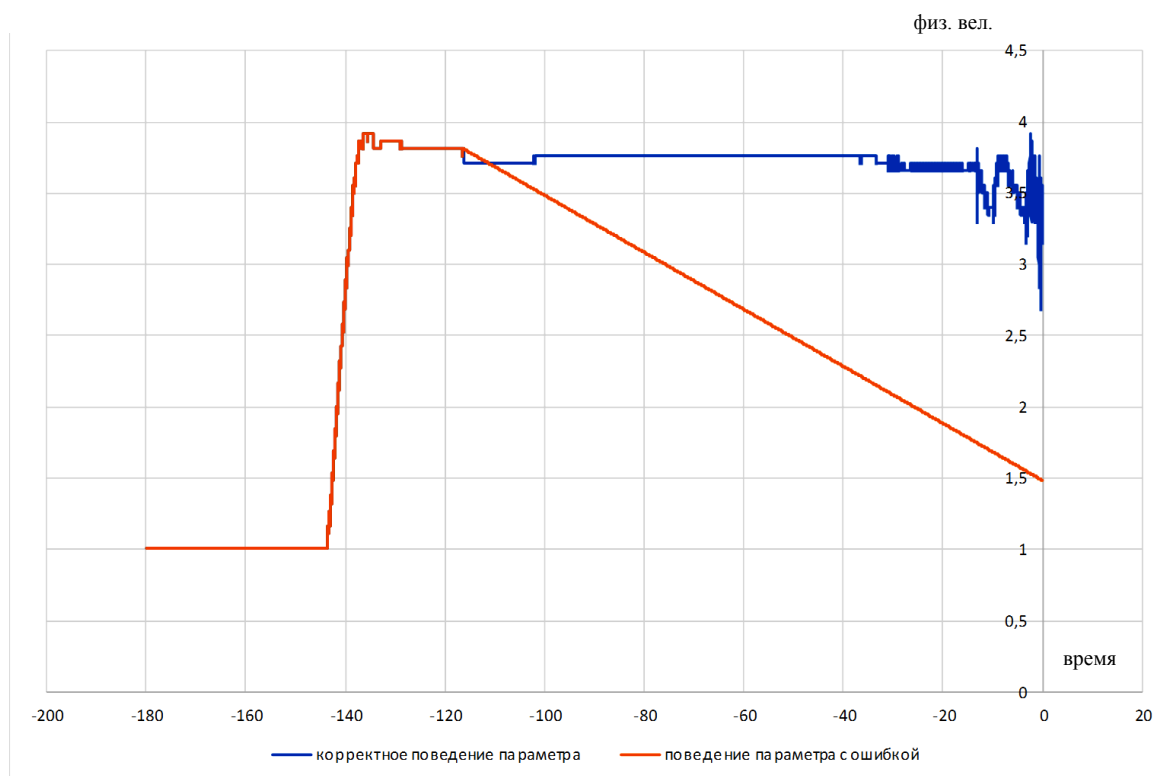


Рис. 6. Поведение ТМП при заикливании и после коррекции

Рассмотрим третий пример из табл. 1 – ошибка в функциональном выражении обработки параметра (когда значение телеизмерения обрабатывается несоответствующей функцией). Декомпозированная сеть Петри такого процесса представлена на рис. 7.

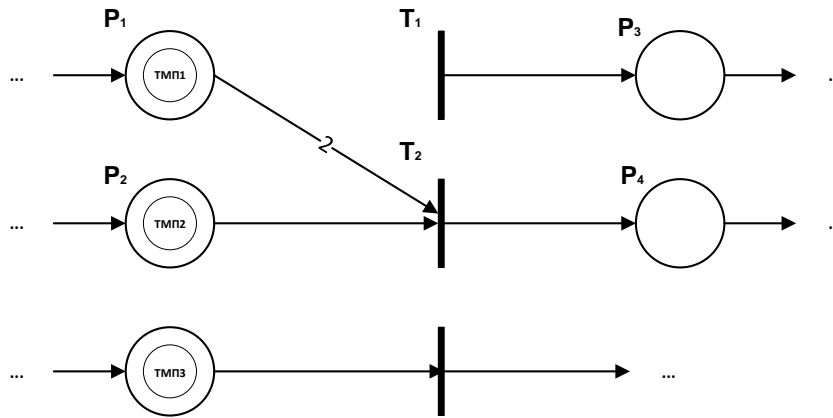


Рис. 7. Сеть Петри с ошибкой в функции обработки ТМИ

Рассчитываем соответствующую матрицу инцидентности D , для решения уравнения достижимости (шаги 2 и 3 предлагаемой методики). Известен вектор начальной разметки μ^T , который характеризуется наличием ТМП (позиции P_1 и P_2 на рис. 7). Известен вектор конечной разметки μ'^T , получены значения обработанных значений ТМП (позиции P_3 и P_4 на рис. 7). Известны соответствующие им операции обработки (переход T_1 для позиции P_1 и переход T_2 для позиции P_2 на рис. 7). Тогда получим:

$$\mu'^T = \mu^T + e^T[i] \cdot D, \quad (11)$$

$$(0, 0, 1, 1) = (1, 1, 0, 0) + (x_1, x_2) \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ -2 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_2 = \frac{1}{2} \\ x_2 = 1 \\ x_1 = 1 \\ x_2 = 1 \end{cases} \quad (13)$$

Система линейных уравнений (11) не имеет корректного решения. Корректным решением является $x_i \in N$.

Перейдем к шагу 4. В данном случае коррекция начальной маркировки [4, 7] не даст положительного решения при коррекции, поскольку она корректирует только вектор начальной маркировки μ^T в уравнении достижимости. В представленном случае ошибка будет находиться в матрице инцидентности D , поэтому, в соответствии с работой [2], необходимо анализировать матрицы входных D^- и выходных инцидентий D^+ на наличие векторов $p_i = 0$ и $t_p = 0$.

Анализ матрицы входных инцидентий D^-

$$D^- = \begin{matrix} & \begin{matrix} p_1 & p_2 & p_3 & p_4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (14)$$

показывает, что переход t_1 не активен. Для алгоритма обработки ТМИ это означает, что не выполняется определенная операция обработки, соответствующая конкретному телеметрируемому параметру, а телеизмерение обрабатывается по несоответствующему алгоритму.

Таким образом, используя приведенную методику, можно находить и исправлять ошибки в алгоритмах обработки ТМИ, подобные третьему примеру из табл. 1.

Поведение параметра с ошибкой в функциональном выражении при обработке представлено на рис. 8.

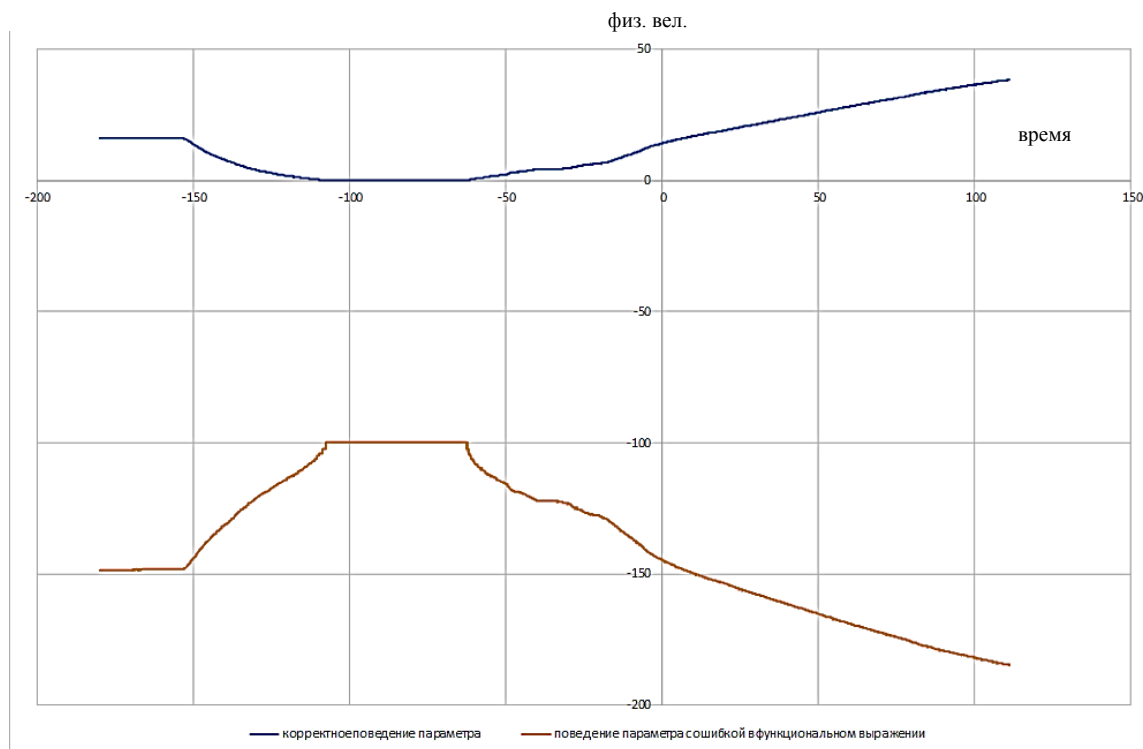


Рис. 8. Поведение ТМП с ошибкой в функциональном выражении и после коррекции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методики автоматизированной верификации и отладки структурно-функциональной модели процесса обработки телеметрической информации позволяет задавать и проверять формальные требования на основе математического аппарата сетей Петри. Интерпретация этих требований для алгоритмов обработки ТМИЮ в свою очередь, позволяет формулировать методическое и синтезировать программное обеспечение для поиска и коррекции ошибок в них. В статье приведены примеры ошибок, которые могут быть допущены при обработке ТМИ, показаны поведение значений ТМП при таких ошибках, а также порядок их поиска и устранения.

Список используемых источников

1. Шмелев В. В., Николаев А. Ю., Попов А. М. Поиск путей решения задачи моделирования алгоритмов обработки телеметрической информации для их дальнейшей верификации // Системы и приборы управления : тр. НПЦАП. – 2023. – № 2. – С. 12–20. – EDN XBKUZC.

2. *Попов А. М.* Алгоритм автоматизированной верификации структурно-функциональной модели обработки телеметрической информации на основе вычислительной сети // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – Вып. 11. – С. 251–257. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-257-258.
3. *Котов В. Е.* Сети Петри. – М. : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 160 с.
4. *Павлов Д. А., Ткаченко В. В., Попов А. М.* Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования // Труды МАИ. – 2023. – № 131. – URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=1755928&mobile=Y> (дата обращения: 01.12.2023). – DOI: 10.34759/trd-2023-131-22. – EDN VASDUG.
5. *Шмелев В. В., Попов А. М.* Алгоритм первичной обработки телеметрической информации с автоматизированной верификацией исходных данных и коррекцией ошибок // Информация и Космос. – 2023. – № 3. – С. 53–58. – URL: infokosmo.ru/ru/article/17167 (дата обращения: 01.12.2023).
6. *Веретельникова Е. Л.* Теоретическая информатика. Теория сетей Петри и моделирование систем. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2018. – 82 с.
7. *Шмелев В. В., Павлов Д. А., Попов А. М.* Модель верификации исходных данных в процессе обработки телеметрической информации на основе решения задачи линейного целочисленного программирования // Авиакосмическое приборостроение. – 2023. – № 7. – С. 3–10. – DOI: 10.25791/aviakosmos.7.2023.1347. – EDN MBFZGU.