

**В. В. Шмелёв\***

доктор технических наук, доцент

**А. М. Попов\***

адъюнкт

**А. Н. Баранов\***

курсант

\*Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

## МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОТЛАДКА АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Представлен подход к верификации и отладке алгоритмов обработки телеметрической информации. На практическом примере показано поведение телеметрируемых параметров (ТМП) при возникновении в алгоритме обработки телеметрической информации (ТМИ) различного рода ошибок. Продемонстрировано, каким образом осуществляются поиск и коррекция возникающих ошибок с использованием формальных математических инструментов сетей Петри. Рассмотрены два типа ошибок, а также интерпретация этих ошибок в поведении свойств сети Петри.

**Ключевые слова:** алгоритмы обработки телеметрической информации, ошибки в алгоритмах обработки, сети Петри, анализ свойств сетей Петри, верификация, коррекция, моделирование вычислительных процессов.

**V. V. Shmelev\***

Dr. Sc., Tech., Associate Professor

**A. M. Popov\***

Adjunct

**A. N. Baranov\***

Cadet

\*A. F. Mozhaysky Military-Space Academy, St. Petersburg, Russia

## SIMULATION AND DEBUGGING OF ALGORITHMS FOR PROCESSING MEASUREMENT INFORMATION

The paper presents an approach to verification and debugging of algorithms for processing telemetry. The practical example shows the behavior of telemetry parameters when various kinds of errors occur in the algorithm for processing telemetry information. It is shown how the search and correction of the arising errors are carried out using formal mathematical tools of Petri nets. Two types of errors are considered, as well as an interpretation of these errors in the behavior of the properties of the Petri net.

**Keywords:** algorithms of processing of telemetry information, errors in the processing algorithms, Petri nets, analysis of properties of Petri nets, verification, correction, simulation of computed processes.

### Введение

Стандарт ISO 9000:2000 определяет процесс верификации изготавливаемого продукта следующим образом. Верификация – подтверждение на основе представления объективных свидетельств того, что установленные требования были выполнены.

Верификация (от лат. verus – верный) – это проверка того, что продукт удовлетворяет сформулированным требованиям.

Формальная верификация программ – это приемы и методы формального доказательства (или опровержения) того, что модель программной системы удовлетворяет заданной формальной спецификации.

Отладка (в широком смысле) – процесс поиска, локализации и исправления ошибок.

Отладка алгоритма – совместные процессы:

– приближения представлений наладчика о правильной работе алгоритма к действиям «идеального» алгоритма;

– поиска дефектов в алгоритме, не имеющем достоверного образца, на основании этих представлений.

В настоящее время проверка функционирования алгоритмов обработки результатов телеизмерений осуществляется в простейшем варианте: по ожидаемому поведению эталонных параметров с тестовых записей или аналогичных изделий ракетно-космической техники. Данный способ имеет набор прикладных недостатков, заключающийся в сложности подготовки алгоритмов обработки результатов телеизмерений новых или модифицированных изделий, в низкой оперативности изменения алгоритмов, практически полном доверии оператору в принятии решения о достоверности результата обработки. С теоретической позиции причиной указанного факта служит несовершенство научно-методического аппарата формализации алгоритмов обработки ТМИ.

Поскольку что-то доказать формально можно только относительно формальной модели, анализируемая система (реализация) должна быть представлена для верификации и отладки формальной моделью.

Процесс обработки ТМИ состоит из разнообразных компонентов, различающихся физическими свойствами, функциональным назначением, сложностью внутренней структуры. Для того чтобы сконструировать адекватный математический аппарат, предназначенный для моделирования требуемого процесса, необходимо установить круг вопросов, которые должны решаться с помощью моделей, и осуществить переход от физических сущностей к их абстракциям, сначала в форме некоторого (ограниченного) набора концептуальных понятий, затем – в точных математических терминах.

В работе [1] произведен подробный анализ подходов к моделированию алгоритмов обработки ТМИ. Из него следует, что использование вычислительных сетей Петри для анализа и верификации алгоритмов обработки ТМИ наиболее предпочтительно ввиду наличия формальных способов проверки алгоритма на желательные или нежелательные свойства.

### Представление алгоритмов обработки телеметрической информации сетями Петри

Сеть Петри состоит из четырех элементов: множество позиций  $P$ , множество переходов  $T$ , входная функция  $I$  и выходная функция  $O$ . Входная и выходная функции связаны с переходами и позициями. Входная функция  $I$  отображает переход  $t_j$  в множество позиций  $I(t_j)$ , называемых входными позициями перехода. Выходная функция  $O$  отображает переход  $t_j$  в множество позиций  $O(t_j)$ , называемых выходными позициями перехода. Структура сети Петри определяется ее позициями, переходами, входной и выходной функциями [2–3].

Сеть Петри  $S$  является четверкой  $S = (P, T, I, O)$ .  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  – конечное множество позиций,  $n \geq 0$ .  $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$  – конечное множество переходов,  $m \geq 0$ . Множество позиций и множество переходов не пересекаются,  $P \cap T = \emptyset$ .  $I: T \rightarrow P^\infty$  является входной функцией – отображением из переходов в комплекты позиций.  $O: T \rightarrow P^\infty$  есть выходная функция – отображение из переходов в комплекты позиций.

Мощность множества  $P$  есть число  $n$ , а мощность множества  $T$  есть число  $m$ . Произвольный элемент  $P$  обозначается символом  $p_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , а произвольный элемент  $T$  – символом  $t_j$ ,  $j = 1, \dots, m$ .

Маркировка  $\mu$  есть присвоение фишек позициям сети Петри. Фишка – это примитивное понятие сетей Петри (подобно позициям и переходам). Фишки присваиваются (можно считать, что они принадлежат) позициям. Количество и положение фишек при выполнении сети Петри могут изменяться. Фишки используются для определения выполнения сети Петри.

Маркировка  $\mu$  сети Петри  $S = (P, T, I, O)$  есть функция, отображающая множество позиций  $P$  в множество неотрицательных целых чисел  $N$ .  $\mu: P \rightarrow N$ . Маркировка  $\mu$  может быть также определена как  $n$ -вектор  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n)$ , где  $n = |P|$  и каждое  $\mu_i \in N$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Вектор  $\mu$  определяет для каждой позиции  $p_i$  сети Петри количество фишек в этой позиции. Количество фишек в позиции  $p_i$  есть  $\mu_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ . Связь между определениями маркировки как функции и как вектора очевидным образом устанавливается соотношением  $\mu(p_i) = \mu_i$ . Обозначение ее в виде функции является несколько более общим и поэтому употребляется гораздо чаще.

Маркированная сеть Петри  $M = (S, \mu)$  есть совокупность структуры сети Петри  $S = (P, T, I, O)$  и маркировки  $\mu$  и может быть записана в виде  $M = (P, T, I, O, \mu)$ .

Структурно-функциональная модель обработки телеметрической информации представлена на рис. 1.

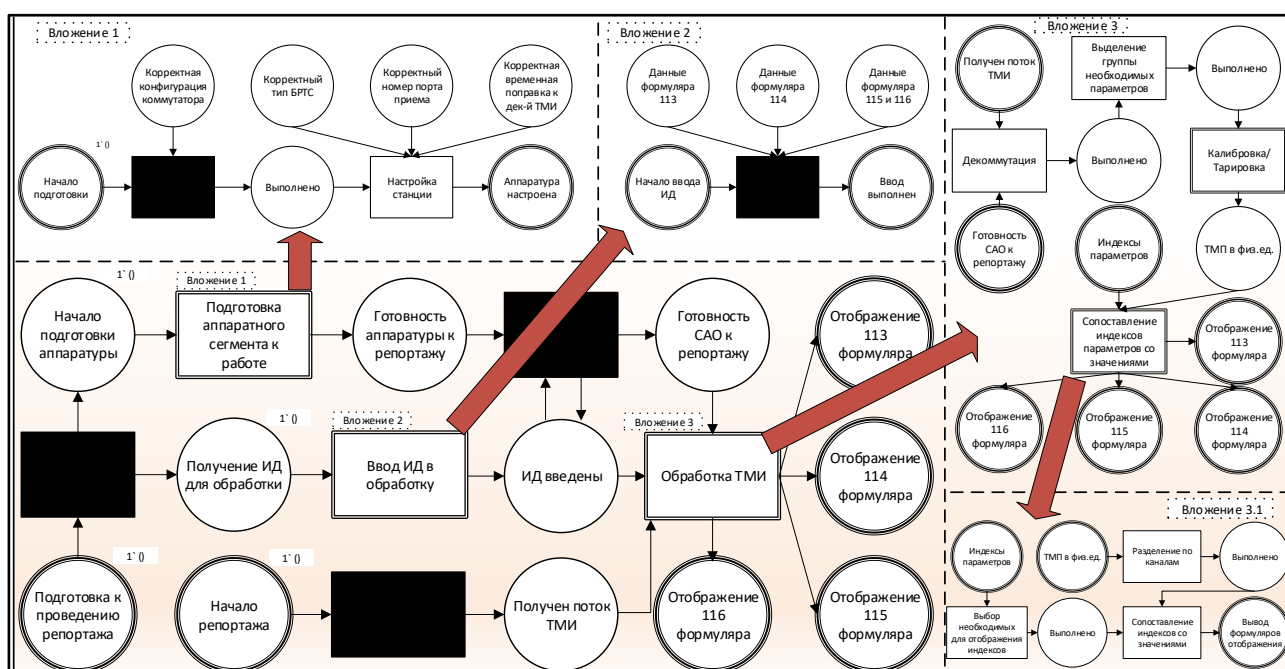


Рис. 1. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ

В качестве примера рассмотрим случай неправильного внесения в массив исходных данных для обработки значения масштабного коэффициента. Поскольку модель, представленная на рис. 1 достаточно громоздкая, произведем ее декомпозицию до части внесения исходных данных в обработку. Тогда искомая часть может быть представлена в виде сети Петри, как показано на рис. 2.

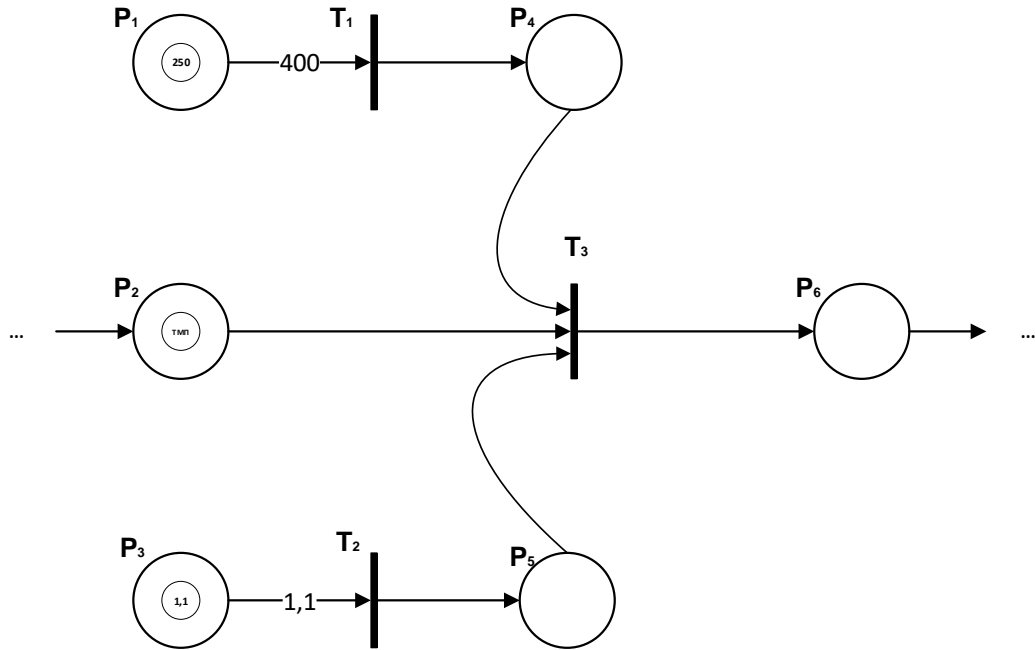


Рис. 2. Декомпозированная сеть Петри ввода исходных данных для обработки ТМИ

Необходимо составить матрицу инцидентности полученной сети и решить уравнение достижимости;

$$D = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -400 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} ; \quad (1)$$

$$(0,0,0,0,0,1) = (250,1,1,0,0,0) + \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -400 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} ; \quad (2)$$

$$\begin{cases} 400x_1 = 250 \\ x_3 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_1 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases} . \quad (3)$$

Система линейных уравнений (3) не имеет корректного решения, необходимо осуществить переход к этапу коррекции начальной маркировки.

Сведя (3) к каноническому виду, получим:

$$J = \begin{pmatrix} 400 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 250 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Используя предлагаемый в работах [4; 5] подход, получим скорректированную систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} 400x_1 = 400 \\ x_3 = 1 \\ x_2 = 1 \\ x_1 - x_3 = 0 \\ x_2 - x_3 = 0 \\ x_3 = 1 \end{cases}. \quad (5)$$

Для алгоритма обработки ТМИ корректировка системы линейных уравнений означает, что ошибочное значение масштабного коэффициента, введенное в массив исходных данных на обработку, исправилось на корректное (исправлено значение масштабного коэффициента с 250 на 400) (рис. 3).

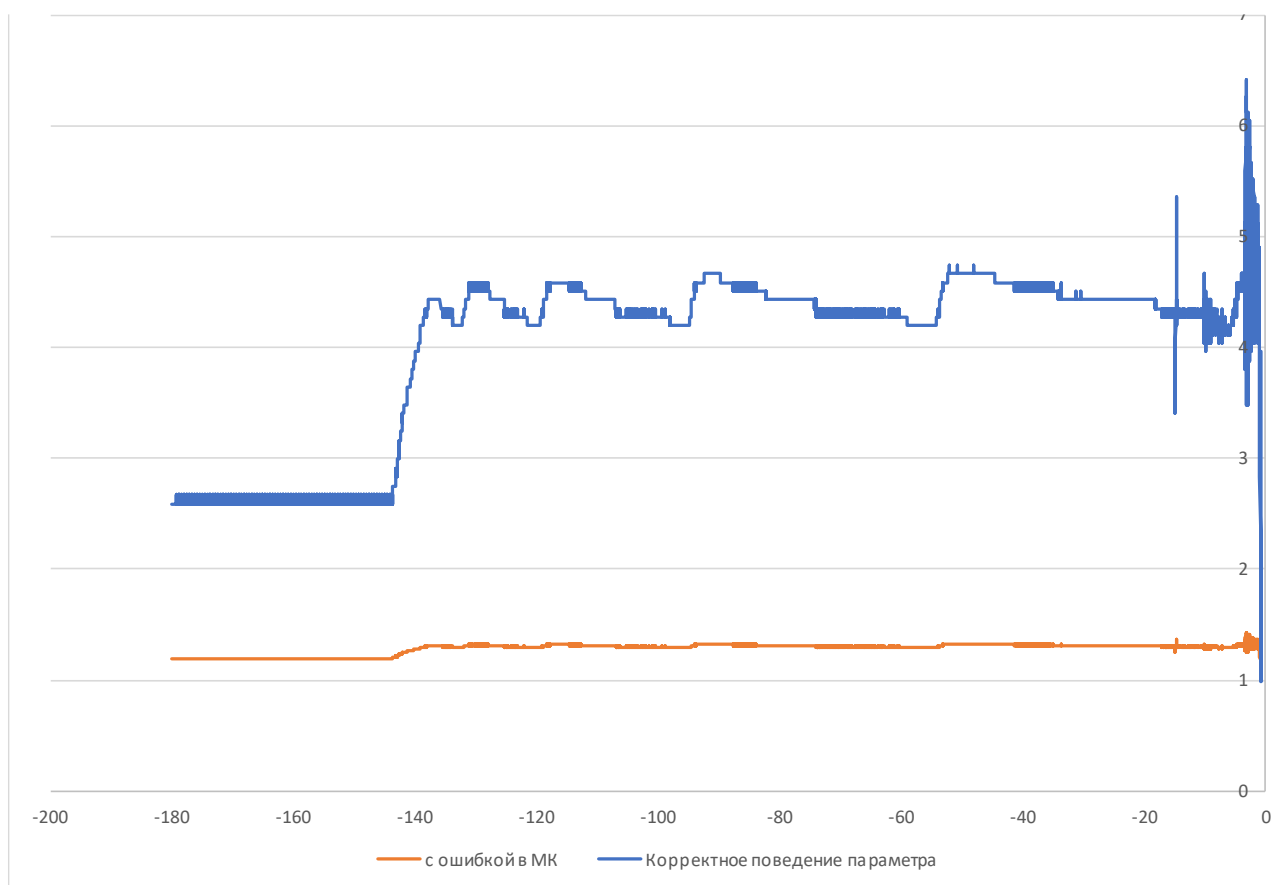


Рис. 3. Поведение параметра с ошибкой в значении масштабного коэффициента и после исправления

В качестве второго примера рассмотрим случай возникновения заикливания в алгоритме обработки телеметрической информации. Декомпозированная сеть Петри такого процесса представлена на рис. 4.

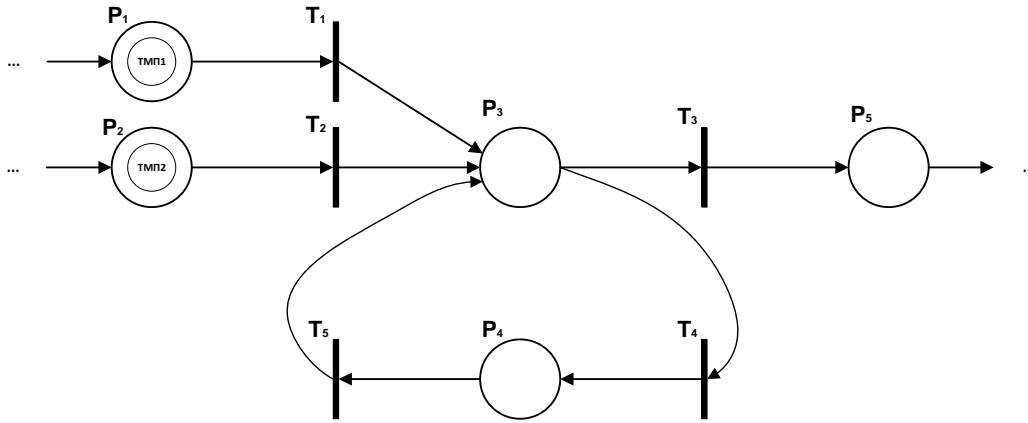


Рис. 4. Устойчивая сеть Петри процесса обработки ТМИ

Физический смысл такого заикливания может быть выражен: неосвобождением буфера от предыдущего значения на этапе сравнения значений телеизмерений при повышении достоверности, нереализацией в алгоритме обработки приоритетных предикатов, неочищением буфера от разностных характеристик и т. п.

Для поиска заикливаний в сети, представленной на рис. 4, необходимо составить матрицу инцидентности и решить уравнение устойчивости [6]. 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 будет единичным:

$$D = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}; \quad A = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Сеть будет устойчива, если произведение матрицы инцидентности на вектор срабатываний переходов даст нулевое решение:

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

Для поиска и устранения заикливания в алгоритме обработки ТМИ необходимо проанализировать матрицу входных инцидентий на «неединичные вхождения» и внести изменения в сеть, исправив отношения между позициями и переходами в ручном режиме, или последовательно «занулять» отношения между позициями и переходами до решения уравнения достижимости в автоматизированном режиме [6].

Анализ матрицы входных инцидентий показывает, что позиция  $P_3$  входит в несколько переходов, образуя цикл, и является началом заикливания алгоритма:

$$D^- = \begin{matrix} & P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & P_5 \\ \begin{matrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \\ t_5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (8)$$

Возможное поведение параметра при наличии заикливания в алгоритме обработки ТМИ представлено на рис. 5.

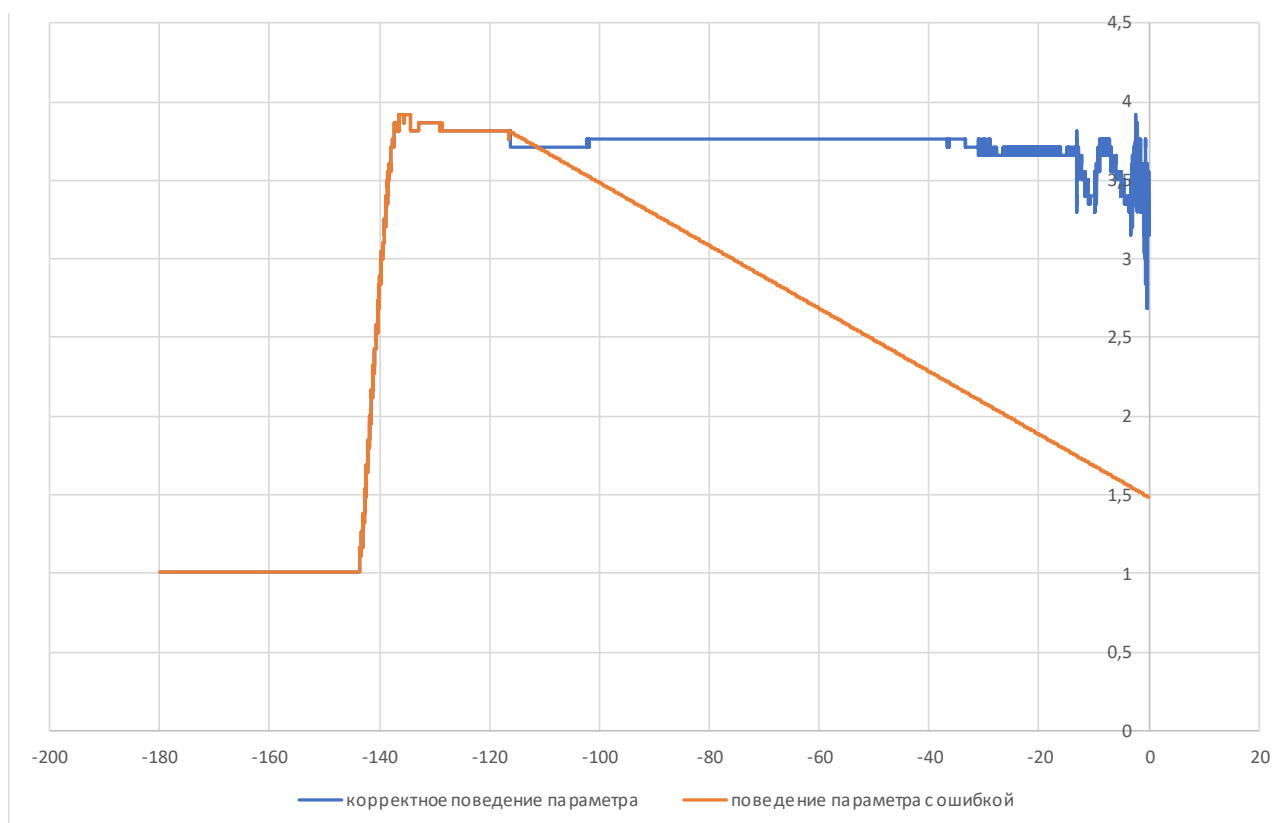


Рис. 5. Поведение параметра при заикливании и после коррекции

### Заключение

Представленный подход описания алгоритмов обработки ТМИ позволяет, используя математический аппарат сетей Петри задавать и проверять формальные требования к моделям на их основе. Интерпретация этих требований для алгоритмов обработки ТМИ дает возможность создавать методическое и программное обеспечение для поиска и коррекции ошибок в подобных алгоритмах. В докладе на практических примерах показано, какие ошибки при обработке ТМИ могут быть допущены, поведение значений ТМП при допущенных ошибках, а также порядок их поиска и устранения.

### Библиографический список

1. Николаев А. Ю., Шмелёв В. В., Попов А. М. Поиск путей решения задачи моделирования алгоритмов обработки телеметрической информации для их дальнейшей верификации // Труды НППАП. Системы и приборы управления. 2023. № 2. С. 12–20.
2. Котов В. Е. Сети Петри. М.: Наука. Глав. ред. физ.-мат. лит. 1984. 160 с.
3. Веретельникова Е. Л. Теоретическая информатика. Теория сетей Петри и моделирование систем: учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 82 с.
4. Павлов Д. А., Попов А. М., Ткаченко В. В. Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования // Труды МАИ. 2023. № 131.
5. Павлов Д. А., Попов А. М., Шмелёв В. В. Модель верификации исходных данных в процессе обработки телеметрической информации на основе решения задачи линейного целочисленного программирования // Авиакосмическое приборостроение. 2023. № 7. С. 3–10.
6. Попов А. М. Алгоритм автоматизированной верификации структурно-функциональной модели обработки телеметрической информации на основе вычислительной сети Петри // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2023. Вып. 11. С. 251–257.