

# АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ВЕРИФИКАЦИИ СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ ПЕТРИ

А.М. Попов

Рассматривается задача обоснования подхода к автоматизированной верификации алгоритмов обработки телеметрической информации. В основе подхода лежит структурно-функциональное представление процесса обработки телеметрической информации, построенное с помощью вычислительных сетей Петри. Целью такого представления является использование формальных правил анализа свойств сетей Петри и транспонирование результатов полученного анализа на реальный алгоритм обработки телеметрической информации. Предлагается достичь автоматизации процедуры поиска и коррекции ошибок для решения задачи достижимости за счет сведения уравнения достижимости к решению задачи линейного целочисленного программирования и анализу матриц входных и выходных инцидентов на «нулевые» вхождения. Для свойства устойчивости предлагается анализировать матрицу выходных инцидентов на наличие неединичных отношений и их последовательное зануление до решения уравнения достижимости. Новизна предлагаемого подхода заключается в возможности автоматизированного поиска и коррекции различного рода ошибок в алгоритмах обработки информации.

**Ключевые слова:** структурно-функциональная модель, двудольный граф, сеть Петри, автоматизированная обработка информации, телеметрическая информация, ошибки обработки, верификация.

**Представление процесса обработки телеметрической информации с помощью вычислительной сети Петри.** Структурно-функциональная модель представляет собой композицию функциональной модели, связи между которой описываются структурной моделью. На связях структурной модели формируются функции *соотнесения* и *измерения*. Функции соотнесения представляются помеченным, а функции измерения - взвешенным графом. Метка связи двух вершин графа представляет собой имя отношения, в котором находятся эти вершины. По степени отвлеченности от предмета рассмотрения отношения делятся на *предметные* и *отвлеченные* (абстрактные). Модели с предметными отношениями называют семантическими сетями. По существу, семантическая сеть является разновидностью онтологической модели.

Функции измерения представляются *взвешенным* графом. Вес связи количественно характеризует либо расстояния между вершинами графа, либо *пропускную способность* его ребер. Модели с весами ребер в роли пропускной способности относятся к потоковым моделям. Первичной характеристикой потока через дугу графа является величина непрерывного потока либо интенсивность дискретного потока, например, потока заявок. Вторичными характеристиками потока являются, например, время достижения им смежной вершины или стоимость транспортировки [1].

Сформированная модель сбора и обработки ТМИ представлена упорядоченным набором последовательностей проводимых операций и условий, необходимых для их выполнения, что в сути своей отражает алгоритм обработки ТМИ. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ, реализованная вычислительной сетью Петри, представлена на рисунке 1.

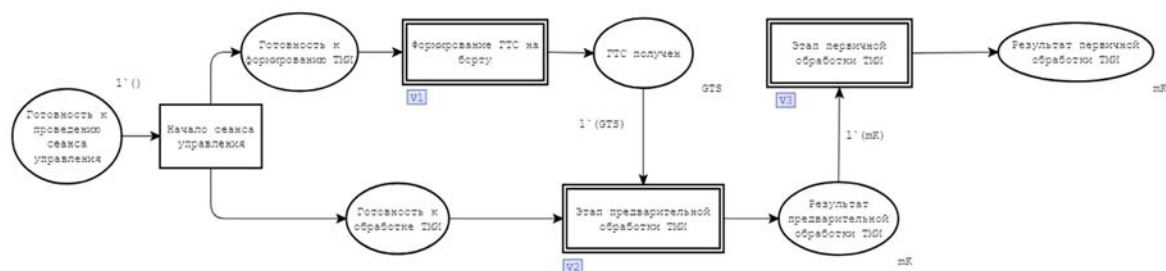


Рис. 1. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ

Данная модель реализована в среде CPN IDE [3] и отражает выполнение основных процедур сбора и обработки ТМИ, свойственных всем изделиям РКТ.

Модель является сложной иерархической вычислительной сетью Петри, поскольку маркерами данной сети являются переменные различного типа, переходы включают в себя [4,5] различные функции (математические, логические и т.п.), а также состоят из *вложенных* переходов, т.е. переходов, которые внутри сами являются сетью ( $V_1, V_2, V_3$ ). Как реализованы вложенные процессы в данной модели представлено на рисунках 2-5.

Поскольку сформированная модель достаточно громоздка для визуального представления всех ее элементов, (на рисунках 2-5 представлена некоторая часть модели рисунка 1) целесообразно представить ее в виде матрицы инцидентности, которая отражает взаимосвязи между элементами сети.

Матрица инцидентности сформированной структурно-функциональной модели представлена на рис. 6.

Матричное представление сформированной структурно-функциональной модели обработки ТМИ позволит проводить ее формальную верификацию с помощью анализа свойств сетей Петри [6], благодаря чему появится возможность не только проверять модель на наличие требуемых или нежелательных свойств, но и производить ее исправление, находить конкретное место возникновения ошибки в модели обработки ТМИ и прилагать меры по их компенсации.

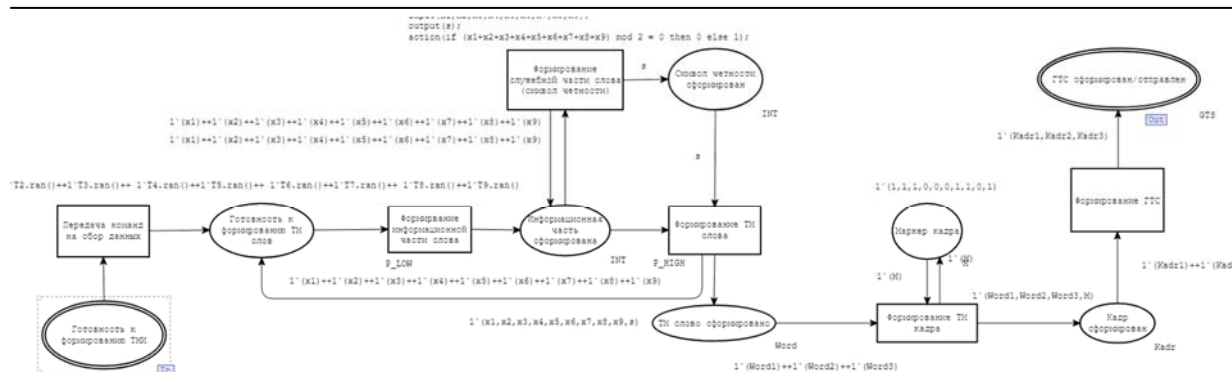


Рис. 2. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ ( $V_1$ )

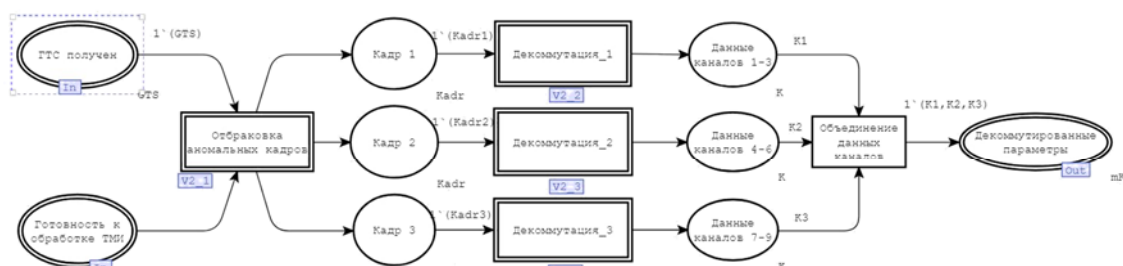


Рис. 3. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ ( $V_2$ )

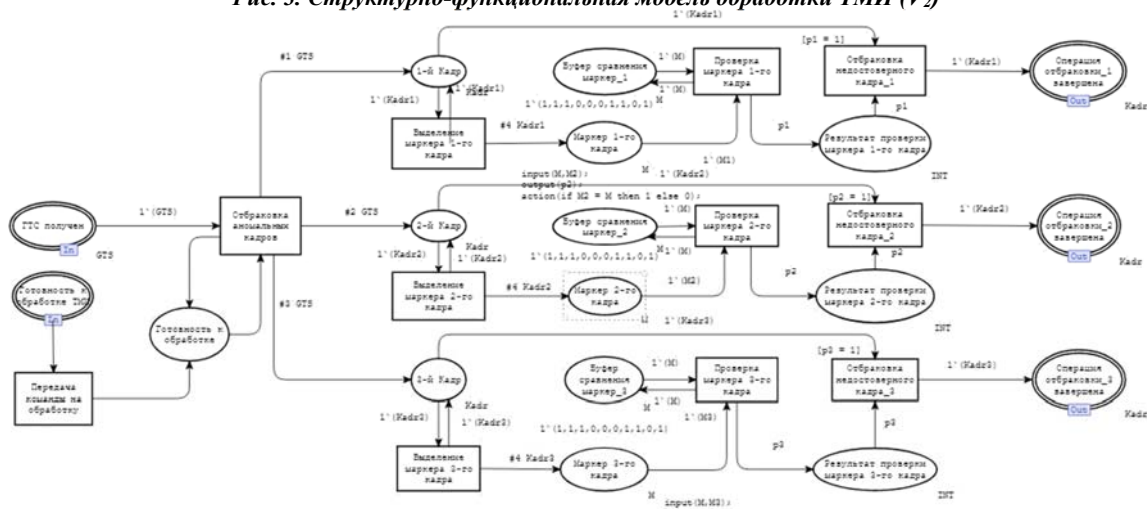


Рис. 4. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ ( $V_{2_1}$ )

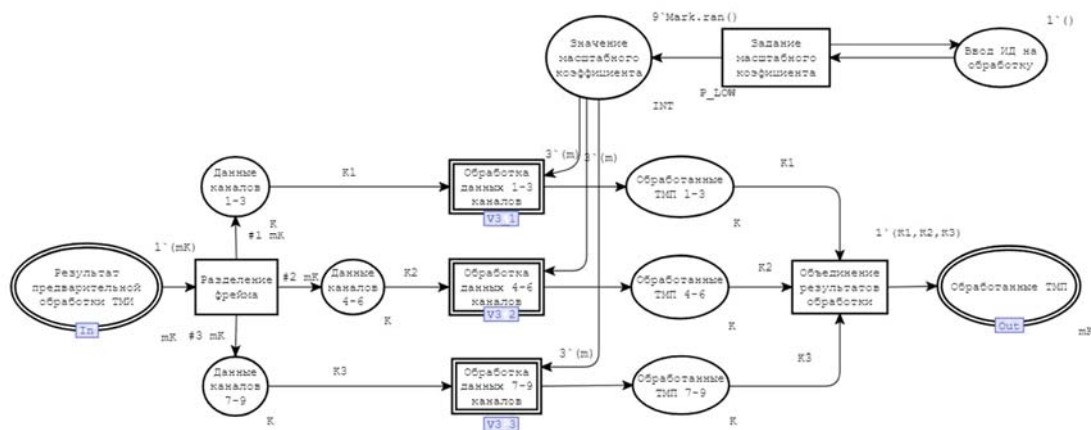


Рис. 5. Структурно-функциональная модель обработки ТМИ ( $V_3$ )





- 1) Имеется алгоритм обработки ТМИ, необходимо сформировать его модель в вычислительной сети Петри (ВСП).
- 2) Модель алгоритма обработки ТМИ в ВСП сформирована.
- 3) На основании данной модели сформирована эквивалентная сеть Петри для проведения формального анализа ее свойств.
- 4) Построена матрица инцидентности сети Петри.
- 5) На этом шаге решается уравнение свойства достижимости [6]

$$\mu'^T = \mu^T + e^T[i] \cdot D \quad (1)$$

где  $\mu'^T$  – вектор-строка, характеризующая требуемую (конечную) маркировку сети (будем считать ее известной априорно, т.к. она характеризует успешное окончание процедуры обработки ТМИ);  $\mu^T$  – вектор-строка, характеризующая начальную маркировку сети (будем понимать набор условий, исходных данных и т.п., необходимых для успешного сбора и обработки ТМИ);  $e^T[i]$  – вектор-строка, значения которой определяют номера и количество срабатываний переходов, переводящих сеть из  $\mu^T$  в  $\mu'^T$  (будем понимать операции проводимые с ТМИ при обработке и их последовательность) [6,7];  $D$  – матрица инцидентности (отношения между элементами процесса).

- 6) При решении возможно 2 исхода:
  - а) уравнение достижимости решается корректно, т.е. система линейных уравнений имеет целые неотрицательные решения;
  - б) система не имеет решений. Если система корректна, переходим к шагу 21, если нет, к шагу 7.
- 7) Сводим полученную систему уравнений к задаче линейного программирования, для проверки правильности исходного состояния сети (начальной маркировке сети) и ее коррекции [8,9].
- 8) Задаем ограничения на целочисленность «корректировок» или «добавок»

$$d_j^+, d_j^- \in \mathbb{Z}, \forall j \in [1, k] \quad (2)$$

$d_j^+$  – «положительная» поправка для  $i$ -го уравнения;  $d_j^-$  – «отрицательная» поправка для  $i$ -го уравнения.

- 9) Вводим целевую функцию, которая будет минимизировать количественное значение «корректировки» или «добавки» [9]. Это необходимо для того, чтобы алгоритм смог выявить минимальную меру коррекции для достижения требуемого состояния процесса, что позволит определить место коррекции

$$J = \sum_{j=1}^k (d_j^+ + d_j^-) \rightarrow \min \quad (3)$$

где  $J$  – поправка, необходимая для решения системы уравнений с учетом ограничений на целочисленность  $X \in \mathbb{Z}^n$ ,  $X = \left\| x_i : i \in \overline{1, n} \right\|, \left\| (d_j^+, d_j^-) : j \in \overline{1, k} \right\|$ ;

- 10) Производим необходимые вычисления в соответствии со следующей моделью:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} x_i + d_1^+ - d_1^- = -b_1 \\ \sum_{i=1}^n \alpha_{i2} x_i + d_2^+ - d_2^- = -b_2 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \alpha_{ik} x_i + d_k^+ - d_k^- = -b_k \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n \alpha_{in} x_i = -b_n \end{cases} \quad (4)$$

где  $k$  – количество входных уравнений в системе (т.е.  $k$  уравнений соответствует количеству входных позиций сети) [10-12];  $\alpha_{in}$  – коэффициент перед  $x$  в системе уравнений;  $b$  – свободный коэффициент в системе уравнений;  $n$  – количество уравнений в системе.

Другими словами, решается система целиком, но «корректировка» производится только для первых  $j$ -входных уравнений [13].

- 11) После выполнения процедуры коррекции начальной маркировки возможны 2 исхода:
  - а) коррекция дала решение, т.е. показала, где и на сколько необходимо исправить начальную маркировку для корректного решения уравнения достижимости. В этом случае корректируется маркировка следующим образом (шаг 20):  $\Delta\mu = e^T[i] \cdot D$ ,  $\Delta\mu = \mu'^T - \mu^T$ ,  $\mu'^T = \mu^T - \Delta\mu$ . (необходимо из конечной маркировки (принятой известной априорно) вычесть разность маркировок, полученную в результате коррекции) и перейти в шаг 21.
  - б) коррекция маркировки не дала решения. В этом случае делается вывод об ошибке в матрице инцидентности (ошибка в графе сети Петри соответственно).
- 12) Переходим к поиску ошибок в инцидентностях матрицы.
- 13) Матрицу  $D^-$  необходимо проверить на наличие в ней «нулевых» строк переходов.
- 14) Матрицу  $D^+$  необходимо проверить на наличие в ней «нулевых» столбцов позиций.

15) Если такие строки существуют, необходимо на графе проверить и исправить дуги таким образом, чтобы из каждого промежуточного элемента множеств позиций и переходов выходили дуги [14], в соответствии с требованиями к последовательности операции и состояний. (делается оператором, алгоритм только показывает проблемные или «пустые» позиции и переходы)

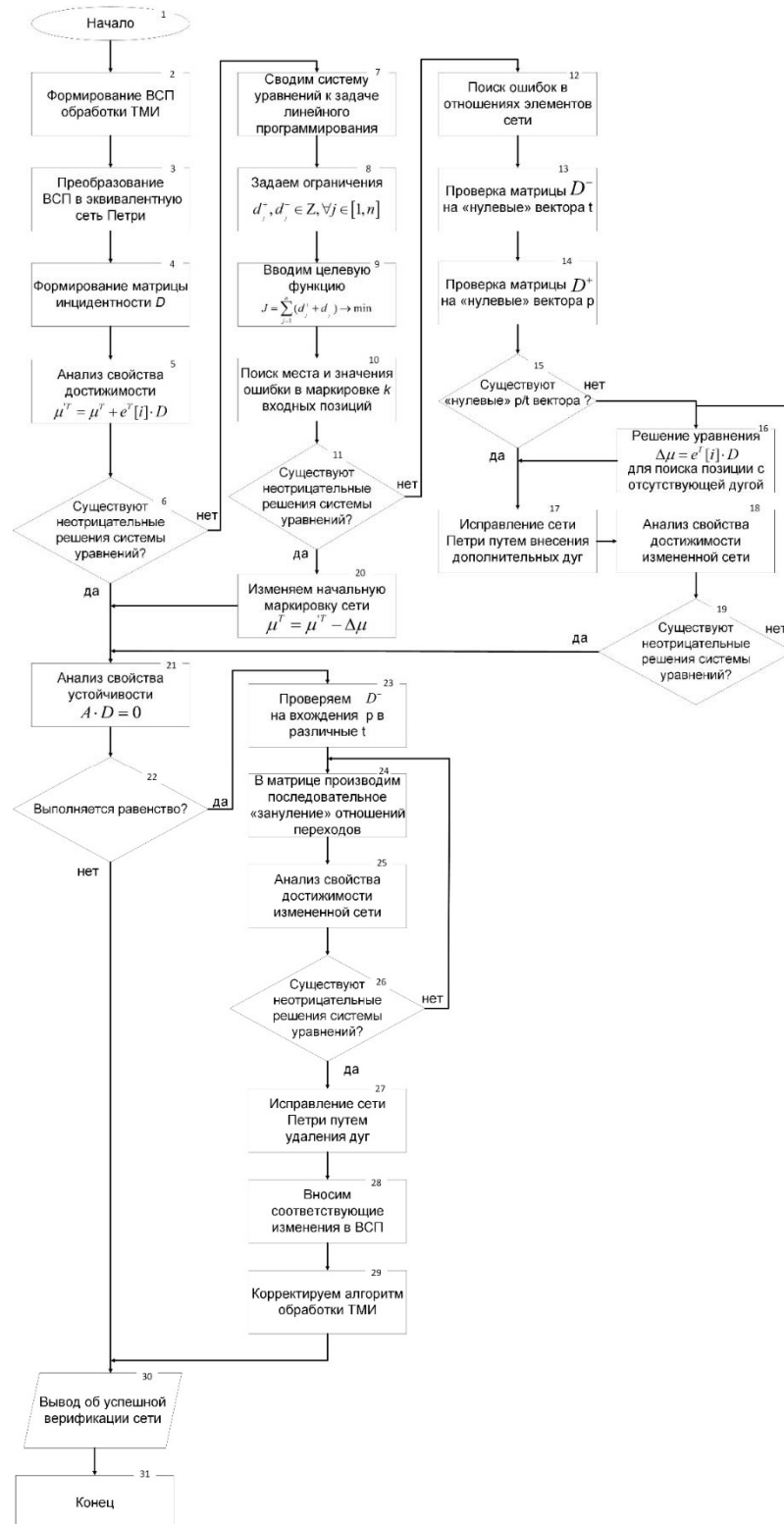


Рис. 7. Алгоритм верификации модели обработки ТМИ

16) Если таких строк и столбцов нет, тогда решаем уравнение достижимости  $\mu^T = \mu^T + e^T[i] \cdot D$  с учетом того, что  $\mu^T$  и  $\mu^T$  принимаем за «истину» (можно считать что начальная маркировка соответствует определенному тестовому набору условий и ИД, при котором однозначно определяется конечная маркировка), при этом известно что каждый переход (операция обработки ТМИ) должен выполняться хотя бы один раз, чтобы достичь требуемого

состояния ( $e^T[i]$  — единичный вектор). Тогда, в результате вычислений, получим 2 вектора  $\Delta\mu = \Delta\mu'$  ( $\Delta\mu' = e^T[i] \cdot D$ ), значения которых сравниваются поэлементно, и отличия значений в элементах вектора  $\Delta\mu'$  от  $\Delta\mu$  будет свидетельствовать об ошибке в инцидентностях в определенной позиции.

17) Оператору предлагается исправить дуги в графе сети Петри в позиции несоответствия (т.е. когда из определенного перехода пропущена дуга к нужной позиции (которая выявлена на шаге 16).

18) С учетом произведенных изменений в графе и в матрице инцидентности  $D$  решить уравнение достижимости для проверки изменений.

19) При отсутствии решения вернуться к шагу 16.

20) см. шаг 11.

21) Далее необходимо проверить сеть Петри на устойчивость, т.е. на наличие «вредных» зацикливаний. Для этого необходимо выполнение выражения

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

где  $A$  — ненулевой вектор срабатываний переходов (в смоделированном алгоритме обработки ТМИ конечное состояние процесса достигается при срабатывании каждого перехода хотя бы один раз, поэтому вектор «единичный»),  $D$  — матрица инцидентности сети Петри алгоритма обработки ТМИ.

22) При анализе свойства устойчивости возможно 2 исхода:

а) если выражение не выполняется, тогда делается вывод о неустойчивости сети, следовательно отсутствия зацикливаний [14-15] и осуществляется переход к шагу 30.

б) если выражение выполняется, значит в алгоритме допущены зацикливания, влияющие на достижение требуемого состояния, необходимо выявить место зацикливания.

23) Проверяем матрицу  $D^-$  на возбуждения нескольких переходов одним состоянием системы (вхождением одним  $p$  в несколько  $t$ ).

24) Производим последовательное «зануление» отношений переходов из одной позиции (т.е. последовательно «зануляем»  $t$  в столбце (строке)  $p$ ).

После «зануления» решаем уравнение достижимости.

25)

26) При наличии некорректного решения уравнения достижимости возвращаемся к шагу 24.

27) При корректном решении уравнения достижимости исправляем граф сети Петри (предлагается оператору удалить одну из дуг для выхода из возможного зацикливания).

28) На основании изменений, внесенных в сеть Петри исправляем модель в ВСП.

29) Производим интерпретацию изменения в ВСП на алгоритм обработки ТМИ и вносим соответствующие изменения.

30) Вывод об успешной верификации алгоритма обработки ТМИ.

31) Конец.

**Заключение.** Таким образом, предложен подход к автоматизированной верификации алгоритмов обработки телеметрической информации, основанный на структурно-функциональном представлении процесса обработки вычислительной сетью Петри. Суть подхода заключается в формальном анализе уравнений достижимости и устойчивости сети Петри на желательные и нежелательные свойства. Подход также позволяет проводить автоматизированную коррекцию ошибок, за счет использования в сети инструментов линейного целочисленного программирования.

Данный алгоритм может использоваться для поиска синтаксических и семантических ошибок в алгоритмах обработки телеметрической информации, а также для поиска и коррекции исходных данных на обработку, проверку логики работы алгоритмов.

### Список литературы

1. Микони С. В., Соколов Б. В. Юсупов Р. М. Квалиметрия моделей и полимодельных комплексов : монография С. В. Микони, Б. В. Соколов, Р. М. Юсупов. М. : РАН, 2018. – 314 с.
2. Поиск путей решения задачи моделирования алгоритмов обработки телеметрической информации для их дальнейшей верификации / В.В. Шмелев, А.Ю. Николаев, А.М. Попов // Труды ФГУП «НПЦАП». Системы и приборы управления, 2023. Вып. 2. С. 12-20.
3. Анализ задачи верификации алгоритмов обработки телеметрической информации / А.М. Попов, В.В. Шмелев, В.В. Ткаченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки, 2023. Вып. 1. С. 3-8.
4. Зайцев Т.Р. Моделирование телекоммуникационных систем в CPN Tools / Т.Р. Зайцев, Д.А. Шмелева // Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова. 2006. 68 с.
5. Систематизация требований к разработке перспективных аппаратно-программных комплексов обработки телеметрической информации ракетно-космической техники / В.В. Шмелев, В.В. Ткаченко // Труды Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского. Выпуск 646. СПб.: ВКА имени А.Ф. Можайского, 2015. С. 38-46.
6. Котов, В.Е. Сети Петри. М: Наука. Главная редакция физико-математической литературы. 1984. 160 с.
7. Веретельникова Е.Л. Теоретическая информатика. Теория сетей Петри и моделирование систем / Е.Л. Веретельникова. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. 82 с.
8. Модель верификации исходных данных в процессе обработки телеметрической информации на основе решения задачи линейного целочисленного программирования / Д.А. Павлов, А.М. Попов, В.В. Шмелев // Авиакосмическое приборостроение, 2023. № 7. С. 3-10.
9. Модель коррекции начальной маркировки классической сети Петри на основе решения задачи дискретного программирования / Д.А. Павлов, А.М. Попов, В.В. Ткаченко // Труды МАИ, 2023. № 131.
10. 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.

11. 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.
12. Применение метода ветвей и границ для решения задачи целочисленного линейного программирования / Е.А. Шиндина, Т.А. Уразаева // Научному прогрессу – творчество молодых. – 2016. – № 3. – С. 319-321.
13. Смагин Б.И. Критический анализ решения задачи целочисленного линейного программирования методом Гомори / Б.И. Смагин, В.В. Машин // Наука и Образование. 2022. Т. 5. № 1.
14. Порядок формирования требований к качеству обработки измерительной информации ракетно-космической техники / В.В. Шмелев, Е.В. Копкин, Е.Б. Самойлов // Вооружение и экономика. 2018. №2. С. 23-28.
15. 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.

Попов Антон Михайлович, адъюнкт, [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru), Россия, Санкт-Петербург, Военно-космическая академия имени А.Ф.Можайского,

AN ALGORITHM FOR AUTOMATED VERIFICATION OF A STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MODEL OF THE  
TELEMETRY INFORMATION BASED ON A PETRI NET.

A.M. Popov

*The problem of substantiating an approach to automated verification of algorithms for processing telemetric information is considered. The approach is based on a structural and functional representation of the process of processing telemetric information, built using Petri nets. The purpose of this presentation is to use formal rules for analyzing the properties of Petri nets and transpose the results of the obtained analysis to a real algorithm for processing telemetry information. It is proposed to achieve automation of the error search and correction procedure for solving the reachability problem by reducing the reachability equation to solving the linear integer programming problem and analyzing the matrices of input and output incidents for "zero" occurrences. For the stability property, it is proposed to analyze the matrix of output incidents for the presence of nonunit relations and their sequential zeroing until the solution of the reachability equation. The novelty of the proposed approach lies in the possibility of automated search and correction of various kinds of errors in information processing algorithms.*

*Key words: structural and functional model, bipartite graph, Petri net, automated information processing, telemetry information, processing errors, verification.*

Anton Mikhailovich Popov, adjunct, [vka@mil.ru](mailto:vka@mil.ru), Russia, St. Petersburg, Military Space Academy named after A.F.Mozhaisky

УДК 004.72

DOI: 10.24412/2071-6168-2023-11-257-258

АНАЛИЗ МЕТОДОВ И ПОДХОДОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРИЗНАКОВОГО ПРОСТРАНСТВА  
ДЛЯ РАЗРАБОТКИ МОДЕЛИ ВЫЯВЛЕНИЯ АТАКУЮЩИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОСНОВЕ GNN-СЕТЕЙ

С.А. Веревкин, Н.А. Трофимова

*В статье рассмотрена актуальная задача необходимости формирования признакового пространства для выявления фактов использования эксплойтов, описаны основные подходы к формированию показателей, а также рассмотрены популярные модели, на основе которых основаны современные средства защиты информации. В рамках данной работы, предложена математическая модель, описывающая задачу выявления аномальных воздействий на основе GNN-сетей. Предложенная модель позволяет использовать сформированное ранее признаковое пространство в качестве обучающей выборки для последующего выявления фактов использования вредоносного кода.*

*Ключевые слова: нейронные сети, защита информации, анализ данных, GNN-сети, кибербезопасность.*

**Введение.** В современном мире, где информационные технологии стали неотъемлемой частью нашей жизни, вопросы информационной безопасности становятся все более актуальными. Гетерогенность современных сетей значительно увеличивает сложность оперативного выявления атакующих воздействий (эксплойтов).

Проблема выявления фактов применения вредоносного кода заключается в том, что эксплойты часто используются злоумышленниками для взлома систем или получения несанкционированного доступа к данным, что создает серьезную угрозу для безопасности и конфиденциальности информации.

Причина сложности выявления подобных инцидентов заключается в том, в постоянном совершенствовании и модификации исходного кода эксплойтов, с целью обхода существующих средств защиты информации.

Кроме того, эксплойты могут иметь различные цели и методы их достижения, благодаря чему существуют как распространенные версии вредоносного кода, так и уникальные решения с узкой направленностью.