УДК 629.78.018

М.А. ЕЛЕНЕВИЧ, И.Б. ТУРКИН, Ю.А. ШОВКОПЛЯС

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского "ХАИ", Украина

МЕТОД НЕДООПРЕДЕЛЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ВАЛИДАЦИИ ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Рассмотрена необходимость проведения контроля точности и достоверности телеметрической информации. Рассмотрены существующие методы контроля достоверности информации. Показано, что существующие методы не позволяют учитывать избыточность информации, то есть наличие функциональных зависимостей и ограничений между группами переменных. Доказана необходимость применения недоопределенных моделей и программирования в ограничениях в решении данной задачи. Сформулированы основные теоретические сведения недоопределенных моделей и методов. Описан возможный метод проверки телеметрической информации на корректность. Приведены примеры применения данного метода.

Ключевые слова: *телеметрическая информация, валидация телеметрической информации, н-модели, программирование в ограничениях*

Введение

В процессе функционирования космического аппарата (КА) контролируются различные по физической сущности и динамике процессы, происходящие как на самом объекте, так и вне его. Все контролируемые системы КА взаимосвязаны между собой и представлены совокупностью разнородных параметров. Телеметрический контроль осуществляется в режимах непосредственной передачи телеметрических параметров в реальном масштабе времени (при проведении сеансов связи и нахождении КА в зоне видимости наземных средств) или записи телеметрической информации вне зон видимости с последующим воспроизведением информации. Сложность интерпретации результатов анализа измерительной информации возрастает из-за возможных состояний системы, вызванных неисправностями или внешними возмущающими факторами.

Анализ исследований и публикаций. Как показывает практика обработки телеметрической информации (ТМИ) летных испытаний КА, результаты первичной обработки информационноценных параметров содержат как одиночные, так и группирующиеся аномальные погрешности. Использование таких результатов в качестве исходной измерительной информации для автоматизированной системы поддержки принятия решений в реальном масштабе времени приводит к ошибочным заключениям о контролируемых событиях [1].

Бортовые информационно-измерительные системы сегодня – это специализированные вычислители, средства сопряжения с объектом контроля и управления, вычислительная сеть, точность и качество которых зависит во многом от внешних по отношению к ИИС сигналов и помех, к которым в процессе обработки в каналах системы добавляются внутренние погрешности и сбои [2]. Распределенная архитектура бортовых систем сбора информации требует учета апертурных погрешностей, то есть погрешностей обусловленных несинхронностью измерений различных параметров, выполненных автономными измерителями.

Реализация сложных программ обработки ТМИ требует специальных методов контроля точности вычислений и используемых данных [3]. Использование наиболее неблагоприятных вариантов дает гарантированную, но завышенную оценку итоговой погрешности, поэтому создание адаптивных алгоритмов, самостоятельно контролирующих в процессе вычислений точность результата, представляет собой актуальную задачу.

Известные подходы, один из которых – методы интервального анализа – дают возможность выполнения доказательных (достоверных, надёжных) вычислений на ЭВМ с гарантированной точностью, когда неопределённость и неоднозначность информации возникает с момента ее получения**.** В этом случае результат каждого измерения можно рассматривать как интервальную величину с центром, соответствующим показаниям датчика, и шириной интервала, определяемой классом точности датчика. Интервальная модель данных является основой методов обработки информации, обеспечивающих контроль достоверности информации. Обеспечение достоверности – это подтверждение на основе представления объективных доказательств возможности использования результатов обработки ТМИ.

Применение данного подхода не позволяет учитывать наличие избыточности информации, то есть наличие функциональных зависимостей и ограничений между группами переменных.

Эту проблему целесообразно решать с помощью недоопределенных моделей и программирования в ограничениях.

Цель исследований. Целью этой статьи является анализ возможности использования программирования в ограничениях как метода автоматической валидации вычислений в системах обработки ТМИ космических аппаратов.

Результаты исследований

1. Основные положения концепции недоопределенности

Предлагаемый метод основан на предложенной Нариньяни А.С. [4] концепции недоопределенности и потоковых вычислений на моделях с недоопределенными значениями. Основная идея недоопределенности состоит в том, что каждому объекту сопоставляется не одно точное значение, а некоторое подмножество из множества допустимых значений. Принцип недоопределенности трактует состояние частичной определенности как решение задачи, которое возможно на данном уровне знаний о задаче. Спецификация задачи в условиях недоопределенности называется недоопределенной моделью (н-моделью).

К достоинствам н-моделей относится то, что:

– вычисления на всех н-моделях выполняются единым потоковым алгоритмом, который не зависит от класса исходной задачи, что позволяет использовать в одной и той же н-модели такие объекты и ограничения, которые традиционно относятся к задачам разных типов, например целочисленные, вещественные и логические объекты, множества и массивы, линейные, нелинейные и теоретико-множественные отношения и т.д.

– на основе аппарата н-моделей созданы высокотехнологичные программные продукты, позволяющие относительно просто настраиваться на самые разнообразные предметные области [5].

Способ представления недоопределенного значения влияет как на качество полученных результатов, так и на вид ограничений, связывающих это значение.

В зависимости от характера представляемой информации недоопределенные значения могут быть представлены в виде целочисленных и вещественных интервалов, множеств, перечислений и других, более специальных, конструкций [6].

Определение 1. Задачей удовлетворения ограничений называется пара (V,C), где V — совокупность переменных, принимающих значения из некоторых универсальных множеств (универсумов), а C — совокупность ограничений, связывающих значения переменных из V.

Каждое ограничение из C имеет вид одной из следующих формул:

$y = x$,

$y = c$,

$V = f\{xi, ..., x_n)$,

где x, x_i, y — символы переменных из V,

c – константный символ,

f – функциональный символ арности п.

Каждому константному символу приписывается некоторая константа из соответствующего универсума, каждому функциональному символу — некоторая функция, действующая на соответствующих универсумах. Более сложные ограничения распадаются на множество более простых (вышеприведенных видов) после введения дополнительных переменных [7].

Определение 2. Решением задачи удовлетворения ограничений (V, C) называется такое приписывание каждой переменной из V некоторого определенного значения из ее универсума, при котором выполняются все ограничения из C.

В общем случае все точные решения задачи, если таковые существуют, должны лежать в декартовом произведении таких н-значений.

Определение 3. Недоопределенным расширением (н-расширением) универсума X называется любой конечный набор его подмножеств *X, содержащий $\varnothing$, и являющийся замкнутым относительно пересечения.

Эти свойства гарантируют однозначное представление $*[\xi]$ любого подмножества $\xi \subseteq X$ в н-расширении *X, а именно:

$$*[\xi] = \bigcap_{\xi \subseteq \varsigma \in *X} \varsigma .$$

Таким образом, представлением множества ξ в системе *X является минимальное подмножество из н-расширения *X, содержащее ς.

Под SD(X) будем понимать совокупность всех н-расширений универсума X.

Для задания зависимостей между н-объектами строятся н-расширения функций над ними. Любая функция

$$f : X_1 \times X_2 \times ... X_m \to X_{m+1}$$

индуцирует набор функций из m+1 функций (одной прямой и m обратных):

$$\forall i \in 1...m+1;$$

$$f_i : P(X_1)\times...\times P(X_{i-1})\times P(X_{i+1})...\times P(X_m) \to P(X_i),$$

где $\forall j \in 1...m+1; P(X_j)$ – множество всех подмножеств X_j.

Определение 4. Н-расширение функции f_i, $i = 1, ..., т + 1$, представляет собой функцию:

$$*f_i : *X_1 \times ...*X_{i-1} \times *X_{i+1} \times ...\times *X_{m+1} \to *X_i,$$

где $*X_i \in SD(X_i)$, такую, что

$$*f_i(\xi_1, ..., \xi_{i-1}, \xi_{i+1}, ..., \xi_{m+1}) =$$
$$= *[f_i(\xi_1, ..., \xi_{i-1}, \xi_{i+1}, ..., \xi_{m+1})].$$

Определение 5. Для вычисления Н-модели обобщенная вычислительная модель (н-модель) М состоит из четырех множеств:

M=(V, C, W, CORK), где

V – множество н-объектов v из заданной предметной области,

С – множество ограничений на н-объектах из V,

W – множество функций присваивания,

CORR – множество функций проверки корректности.

С каждым объектом из V связаны недоопределенный тип данных (недоопределенное расширение некоторого универсума), начальное значение, функция присваивания и функция проверки корректности.

Функция присваивания — это двухместная функция, работающая при каждой попытке присваивания очередного значения н-объекту и определяющая его новое значение как пересечение текущего и присваиваемого значений.

Функция проверки корректности — это унарный предикат, который проверяет непустоту значения н-объекта.

Интерпретацией ограничения называется вычисление результатов н-расширенных функций (прямой и обратных) на текущих значениях переменных с последующим вызовом функций присваивания и проверки корректности для каждой переменной, входящей в данное ограничение.

Алгоритм вычислений, реализованный в н-моделях, является высокопараллельным процессом, который управляется потоком данных. Изменение значений переменных, располагающихся в общей памяти, автоматически влечет интерпретацию тех ограничений, для которых эти переменные являются аргументами. Процесс останавливается, когда сеть стабилизируется (то есть исполнение ограничений не приводит к изменению объектов н-модели) или хотя бы один из н-объектов становится некорректным. В последнем случае устанавливается противоречивость исходной н-модели.

В работе [7] доказана справедливость следующих утверждений.

Теорема 1. Алгоритм удовлетворения ограничений в н-моделях заканчивает работу за конечное число шагов, а установление противоречивости н-модели не зависит от порядка интерпретации ограничений.

Теорема 2. В случае непротиворечивой н-модели при одних и тех же исходных значениях н-объектов их результирующие значения также не зависят от порядка интерпретации ограничений.

Теорема 3. Если установлена противоречивость н-модели (V, C, W, CORR), то задача удовлетворения ограничений (V, C) не имеет решений.

Теорема 4. Любое решение задачи удовлетворения ограничений (V, C) лежит в области выходных значений соответствующих объектов н-модели (V, C, W, CORR).

Рассмотрим теперь различные виды недоопределенных расширений произвольного универсума X.

Тривиальное н-расширение $*X = \{\varnothing, X\}$ содержит минимум информации о потенциальном значении объекта: противоречиво оно ($\varnothing$) или нет (X).

Ниже при рассмотрении других н-расширений *X будем предполагать, что X_0 — конечное подмножество X.

Точное н-расширение $X^{Single} \in SD(X)$ имеет вид:

$$X^{Single} = \{\varnothing, X\} \cup \{\{x\} | x \in X_0\}$$

и добавляет к исходному универсуму X_0 два новых значения: “неопределено"(X) и “противоречие" ($\varnothing$).

Очевидно, что для универсума X максимальным н-расширением является множество всех подмножеств V(X). Его можно построить только в случае конечного X. В общем случае можно ввести перечислимое н-расширение

$$X^{Enum} = X \bigcup V(X_0).$$

В случае, когда X является решеткой (множеством с определенными на нем ассоциативными и коммутативными операциями, подчиняющимися законам поглощения и идемпотентности), можно задать н-расширения, основанные на интервалах [8] и мультиинтервалах [9]:

$$X^{Interval} = \left\{ [\underline{x}, \overline{x}] \;\middle|\; \underline{x}, \overline{x} \in X_0 \cup \{-\infty + \infty\} \right\},$$

$$X^{Multi\,interval} = \left\{ \xi \;\middle|\; \xi = \bigcup \xi_i, \xi_i \in X^{Interval}, i = 1, 2, ... \right\}.$$

Структурное н-расширение основано на универсуме, заданном в виде декартова произведения множеств: $X = X_1 \times X_2 \times ... \times X_n$. Как и к любому множеству, к нему применимы н-расширения X^{Single} и X^{Enum}. Более того, если каждый из X_i является решеткой, то X тоже является решеткой (как декартово произведение решеток), поэтому к X применимы также н-расширения $X^{Interval}$ и $x^{Multnnterval}$.

Некоторые свойства обычных операций существенно меняются в соответствующих недоопределенных расширениях. Пусть в качестве Н-расширения множества чисел рассматривается Н-расширение Interval, а соответствующие Н-расширения операций минус ($\tilde{*}$) и плюс (*+) определены согласно известным правилам интервальной арифметики. Таким образом, Н-расширение унарного минуса имеет вид

$$\tilde{*}:\quad [a^{Lo}, a^{Up}] = \tilde{[}a^{Up}\tilde{,}\ a^{Lo}],$$

а Н-расширение сложения (a = b *+ c) вычисляется следующим образом:

$$*+:\quad [a^{Lo}, a^{Up}] = [b^{Lo} + c^{Lo},\ b^{Up} + c^{Up}].$$

В таком случае, Н-расширение выражения (1) имеет следующий вид:

$$[a^{Lo}, a^{Up}]\ *+\ (\tilde{*}[a^{Lo}, a^{Up}]) = [a^{Lo}, a^{Up}]\ *+\ \tilde{[}a^{Up}\tilde{,}\ a^{Lo}] =$$
$$= [a^{Lo} + \tilde{(}a^{Up}),\ a^{Up} + \tilde{(}a^{Lo})] = [a^{Lo\tilde{}}\ a^{Up},\ a^{Up\tilde{}}\ a^{Lo}].$$

Достаточно очевидно, что когда нижняя и верхняя границы Н-числа не совпадают (т.е. число недоопределено), интервал $[a^{Lo\tilde{}}\ a^{Up},\ a^{Up\tilde{}}\ a^{Lo}]$ всего лишь содержит нулевой элемент, но не равен в точности ему.

Такое изменение свойста унарного минуса приводит к тому, что закон дистрибутивности для обычных аддитивных и мультипликативных операций переходит в так называемый закон субдистрибутивности:

$$*\alpha\ \ *\times\ \ (*\beta\ \ *+\ \ *\chi)\ \subseteq\ *\alpha\ \ *\times\ \ *\beta\ \ *+\ \ *\alpha\ \ *\times\ \ *\chi\,.$$

Из сказанного выше можно сделать вывод, что в Н-моделях существенно то, в каком виде представлены условия задачи: какие Н-расширения выбраны для переменных и каким образом представлены ограничения (уравнения и неравенства).

2. Метод автоматической валидации вычислений ТМИ на основе недоопределенных моделей и программирования в ограничениях

При решении задачи с использованием недоопределенных моделей необходимо определить множество н-объектов из заданной предметной области и множество ограничений на н-объектах на этих объектах.

В отличие от известных подходов в работе предложено использовать недоопределенные модели и программирование в ограничениях для автоматической валидации вычислений ТМИ.

Приведем примеры использования методов программирования в ограничениях.

Пусть требуется найти решение системы из двух линейных уравнений с двумя неизвестными:

$$y = x - 1; \qquad (F_1)$$

$$2 * y = 3 * (2 - x). \qquad (F_2)$$

Каждое уравнение можно рассматривать как неявную функцию (F_1 и F_2) от двух переменных (x и y).

Графики этих функций изображены на рис. 1.

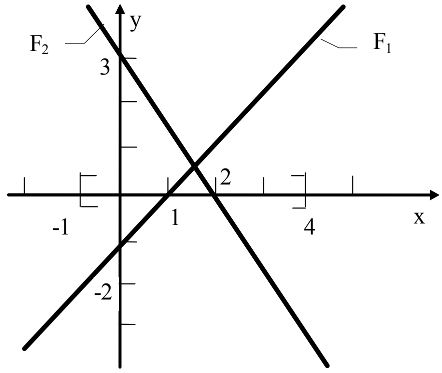

Рис. 1. Графики функций F_1 и F_2

Предположим, что известна начальная оценка значения переменной x: где–то между –1 и 4 (такую оценку можно рассматривать как интервал [–1, 4]).

Идея недоопределенных вычислений состоит в том, что по текущей оценке поочередно вычисляются проекции функций F_1 и F_2 на x и y. Например, проекция F_1 на y для x равного [–1, 4] равняется интервалу [–2, 3].

Теперь, если по y вычислять проекцию F_2 на x, то получим новое значение x равное интервалу [0, 10/3] (рис. 2).

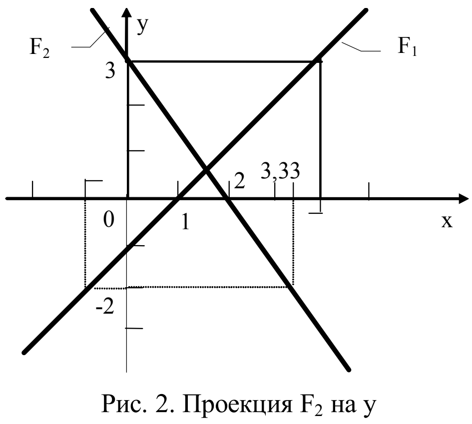

Рис. 2. Проекция F_2 на y

Продолжая этот процесс мы постепенно приближаемся к искомому решению.

На рис. 3 показаны две спирали, которые показывают, каким образом мы приближаемся к решению снизу и сверху, соответственно.

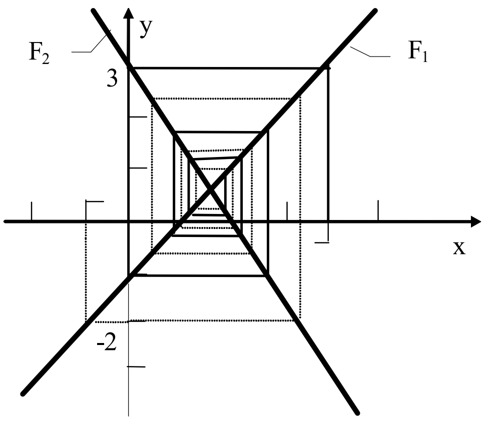

Рис. 3. Спирали

Стоит отметить, что параметры реальных задач всегда имеют начальные оценки их значений, поскольку даже в тех случаях, когда решающий задачу затрудняется в определении исходных ограничений на область значений того или иного числового параметра, оценка его значения от минус до плюс бесконечности будет представлена в машине конкретными числами.

Таким образом, в нашем примере в общем случае одновременно будут закручиваться четыре спирали - две от x и две от y.

Рассмотрим еще один пример, основанный на первом законе Кирхгофа : «Алгебраическая сумма токов в любом узле любой цепи равна нулю».

В результате измерений было получено:

$I_1 = 3 \pm 0{,}1$ А; $I_2 = -2{,}15 \pm 0{,}1$ А; $I_3 = -1 \pm 0{,}1$ А.

Проведем итерации по сужению интервалов недоопределенности (табл. 1).

Таблица 1

Итерации по сужению интервалов

№	Расчетный элемент	I1	I2	I3
0	Начальные условия	2,9 ÷ 3,1	- 2,25 ÷ - 2,05	- 1,1 ÷ - 0,9
1	I1	2,95 ÷ 3,1	- 2,25 ÷ - 2,05	- 1,1 ÷ - 0,9
	I2	2,95 ÷ 3,1	-2,05 ÷ -2,2	- 1,1 ÷ - 0,9
	I3	2,95 ÷ 3,1	-2,05 ÷- 2,2	0,9 ÷ 1,05
2	I1	2,95 ÷ 3,1	- 2,25 ÷ - 2,05	- 1,1 ÷ - 0,9
	I2	2,95 ÷ 3,1	2,05 ÷ 2,2	- 1,1 ÷ - 0,9
	I3	2,95 ÷ 3,1	2,05 ÷ 2,2	0,9 ÷ 1,05

В процессе 2-й итерации изменений не последовало. Отсюда получаем систему ограничений для заданных условий:

$$I_1 = 2{,}95 \div 3{,}1 \text{ А},$$

$$I_2 = 2{,}05 \div 2{,}2 \text{ А},$$

$$I_3 = 0{,}9 \div 1{,}05 \text{ А}$$

Таким образом, в данном примере за счет использования избыточности получено уточнение данных – уменьшение их недоопрделенности.

Несложно представить ситуацию, когда система не содержит решения. Например,

$$I_1 = 3{,}2 \pm 0{,}1 \text{ А};$$

$$I2 = -2{,}15 \pm 0{,}1 \text{ А};$$

$$I3 = -1 \pm 0{,}1 \text{ А}.$$

Тогда все три перменные должны быть помечены как неудовлетворительные.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку прототипа ПО, реализующего предложенный метод проверки корректности ТМИ и доказательство его эффективности.

Выводы

В настоящее время состав телеметрируемых параметров, необходимый для оценивания функционирования КА, значительно расширился. Этому способствуют разработка новых КА и электронно-вычислительных средств, расширение круга решаемых задач и развитие современных информационных технологий. Разрабатываемые интеллектуальные информационные технологии предъявляют высокие требования к исходной измерительной информации прежде всего из-за ограниченности времени, отводимого на решение задачи. Применение методов программирования в ограничениях решает важную задачу обеспечения достоверности результатов обработки ТМИ.

Литература

1. Каргин В.А. Особенности обработки телеметрической информации ракет-носителей в реальном масштабе времени. / В.А. Каргин, Н.В. Не-

здоровин, Д.А. Николаев // Информация и космос. – 2009. – № 4. – С. 77-82.

2. Смагин В.А. Информационный подход оценивания точности метрологических систем / В.А. Смагин, Р.О.Лавров, А.И. Пихтов // Информация и космос. – 2010. – № 1. - С. 42-44.

3. Смагин В.А. Элементарное введение в точностную теорию надежности программного обеспечения / В.А. Смагин/ / Надежность. – 2004. – № 4. – С. 33-39.

4. Нариньяни А.С. Недоопределенность в системах представления и обработки знаний / А.С. Нариньяни // Изв. АН СССР, Сер. Техн. кибернетика. – 1986. – № 5. – С. 3-28.

5. ISO/IEC 13211-1:1995. Information Technology – Programming Languages – Prolog – Part 1: General Core.

6. Телерман В.В. Удовлетворение ограничений в задачах математического программирования / В.В. Телерман, Д.М.Ушаков // Вычислительные технологии. – 1998. – Т. 3, N 2. – С. 45–54.

7. Телерман В.В. Недоопределенные модели: формализация подхода и перспективы развития/ В.В. Телерман, Д.М.Ушаков. – М., 1996. – С. 7-32.

8. Шокин Ю.И. Интервальный анализ / Ю.И. Шокин. – Н-ск: Наука, 1981. – 125 с.

9. Яковлев А.Г. Компьютерная арифметика мультиинтервалов/ А.Г. Яковлев // Пробл. кибернетики. Проблемно-ориентированные вычислительные системы. – 1987. – С. 66-81.

Поступила в редакцию 1.12.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. зав. каф. экономико-математического моделирования В.М. Вартанян, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МЕТОД НЕДОВИЗНАЧЕНИХ ОБЧИСЛЕНЬ В ПИТАННІ АВТОМАТИЧНОЇ ВАЛІДАЦИІ ДАНИХ В СИСТЕМАХ ОБРОБКИ ТЕЛЕМЕТРИЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

М.О. Єленевич, І.Б. Туркін, Ю.А. Шовкопляс

Розглянута необхідність проведення контролю точності і достовірності телеметричної інформації. Розглянуті існуючі методи контролю достовірності інформації. Показано, що існуючі методи не дозволяють враховувати надмірність інформації, тобто наявність функціональних залежностей і обмежень між групами змінних. Доведена необхідність вживання недовизначених моделей і програмування в обмеженнях в рішенні даної задачі. Сформульовані основні теоретичні відомості недовизначених моделей і методів. Описаний можливий метод перевірки телеметричної інформації на коректність. Наведені приклади вживання даного методу.

Ключові слова: телеметрична інформація, валідация телеметричної інформації, н-моделі, програмування в обмеженнях.

METHOD OF VAGUENESS CALCULATIONS IN TASK OF AUTOMATIC VALIDATION OF INFORMATION IN TREATMENT SYSTEMS OF TELEMETRIC INFORMATION OF SPACE VEHICLES

M.O. Ielenevych, I.B. Turkin, Y.A. Shovkoplyas

The necessity of the control of exactness and authenticity of telemetric information is considered. The existent methods of control of authenticity of information are considered. It is rotined that existent methods do not allow to take into account surplus of information, that presence of functional dependences and limitations between the groups of variables. The necessity of application of n-models and programming is well-proven for limitations in the decision of this task. Basic theoretical information of n-models and methods is formulated. The possible method of verification of telemetric information is described on correctness. The examples of application of this method are resulted.

Keywords: telemetric information, validation of telemetric information, n-models, programming in limitations.

Еленевич Мария Александровна аспирант кафедры инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: mari.yelen@ rambler.ru.

Туркин Игорь Борисович – д-р техн. наук, проф., зав. каф. инженерии программного обеспечения, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: .nikrutrogi@mail.ru.

Шовкопляс Юрий Анатольевич – заместитель главного конструктора ГП «КБ» Южное».