

УДК 623.764 (7.3)

© Цыплаков Ю.В., Ульянов С.В., Арцивенко В.В., Несмачный С.В.

## СТОХАСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДЕРЕВА ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Для ракетных и космических комплексов и вообще технических систем со значимым ущербом от их возможных аварий предлагается математическая модель механизма стохастического взаимодействия элементов дерева опасных явлений системы. Элементы такого дерева – случайные явления специального класса случайных реализаций случайных величин. Модель предназначена для определения вероятностей различных типов аварий, которые могут случиться при эксплуатации системы, и рисков ущерба от этих аварий. Данная модель устраняет неопределенность дерева опасных явлений системы и позволяет находить количественные показатели ее безопасности, включая показатели, учитывающие и характеризующие ущерб от аварий.*

### Введение

Вряд ли предлагаемая стохастическая модель станет для безопасности технических систем схожа с прорывом, каким, к примеру, явилась в свое время для атомной физики математическая модель, известная как модель Бора [6]. Однако можно надеяться, что данная модель существенно сдвинет с места проблемы, без решения которых невозможно находить удовлетворительные ответы на многие вопросы оценивания и прогнозирования безопасности технических систем, не говоря уже об управлении безопасностью [9]. Чего уж греха-то таить, в настоящее время для большинства технических систем и объектов, в том числе ракетных и космических комплексов, определение вероятностей аварий частенько смахивает на полотно Малевича «Черный квадрат».

Дерево опасных явлений, которое учитывает и характеризует ущерб от аварий и которому соответствует разрабатываемая модель, рассмотрено в работе [8]. Каждый его элемент (не в пример дереву опасных событий, любой элемент которого – одно и только одно опасное явление), представляет собой одно или совокупность двух опасных явлений, а именно, если следовать терминологии введенных понятий, потенциального опасного воздействия и потенциального ущерба от аварии. Оба на-

званные случайные явления принадлежат специальному классу так называемых случайных реализаций случайных величин [7]. Явления данного класса имеют двойственную природу случайности и проявляют себя и как случайное событие, и как случайная величина. Как случайное событие, ибо априори неизвестно, произойдет или нет в опыте случайная реализация – событие, заключающееся в получении соответствующей случайной величиной одного из своих возможных значений. Как случайная величина, потому что неизвестно, какое именно значение получит случайная величина, если в опыте состоится ее реализация.

Для полного вероятностного описания случайной реализации случайной величины надо знать вероятность случайной реализации и условный закон распределения этой случайной величины при условии, если апостериорная вероятность ее реализации равна единице. В качестве числовой характеристики случайной реализации случайной величины можно использовать произведение вероятности случайной реализации и математического ожидания случайной величины, реализация которой имеется в виду [3,7].

В согласии с этим в качестве числовой характеристики *потенциального опасного воздействия*  $s$ -го элемента (если элементы пронумеровать по  $s$ ) дерева опасных явлений рассматриваемого класса на другие элементы, подвергаемые непосредственному воздействию  $s$ -го элемента, будем использовать риск опасного воздействия  $Q_s$ , выражаемый формулой

$$Q_s = P(B_s) M[V_s], \quad (1)$$

где  $P(B_s)$  – вероятность события  $B_s$  – опасного воздействия  $s$ -го элемента дерева опасных явлений на другие элементы;

*Цыплаков Юрий Васильевич – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник 4 ЦНИИ МО РФ;*

*Ульянов Сергей Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела 4 ЦНИИ МО РФ;*

*Арцивенко Валерий Владимирович – заместитель начальника отдела 4 ЦНИИ МО РФ;*

*Несмачный Станислав Валерьевич – начальник лаборатории 4 ЦНИИ МО РФ.*

$M[V_s]$  – математическое ожидание случайной величины  $V_s$  уровня опасного воздействия  $s$ -го элемента.

Числовой характеристикой *потенциального ущерба от аварии системы*, рассматриваемой без разделения ее аварии на типы, является риск ущерба  $R$ , равный

$$R = P(A) M(U), \quad (2)$$

где  $P(A)$  – вероятность аварии  $A$  системы,

$M(U)$  – математическое ожидание случайной величины  $U$  ущерба от аварии  $A$ .

Для системы, имеющей  $k$  типов аварии с номерами  $j=1, \dots, k$ , величина риска ущерба  $R$  находится как

$$R = \sum_{j=1}^k R_j, \quad (3)$$

где  $R_j$  – слагаемые риски общего риска  $R$ , определяемые по формуле

$$R_j = P(A_j) M[U_j], \quad (4)$$

в которую для каждого  $j$  входят:  $P(A_j)$  – вероятность аварии  $A_j$  (аварии  $j$ -го типа),  $M[U_j]$  – математическое ожидание случайной величины  $U_j$  ущерба от аварии  $A_j$ .

Но вернемся к нашему дереву опасных явлений. Данное дерево можно графически представить в виде его элементов, краткие названия которых совпадают с названиями опасных событий – исходных опасных воздействий и различных типов аварий, которые могут случиться с технической системой – расположенных на своих иерархических уровнях. Непосредственные причинно-следственные связи между элементами, носящие случайный характер, изображены стрелками, направленными от события-причины к событию-следствию. Каждый элемент дерева имеет не меньше одной такой связи.

Нижний иерархический уровень дерева опасных явлений технической системы занимают элементы, представляющие собой исходные потенциальные опасные воздействия. К основным из них для подвижного грунтового ракетного комплекса (ПГРК) относятся ошибки личного состава, отказы техники, ошибки системы контроля безопасности, дорожно-транспортные происшествия, лесные пожары, пожары горючих материалов, грозовые разряды, короткие замыкания в электроцепях, падения на пусковые установки линий электропередач, воздействия обычным оружием, аварии на продуктопроводах.

Единственным элементом верхнего иерархического уровня дерева опасных явлений ПГРК с ядерным боевым оснащением является потенциальный ущерб от аварийного ядерного взрыва.

Каждый из элементов промежуточных иерархических уровней характеризуется двумя опасными случайными явлениями: потенциальным опасным воздействием

на элементы более высоких уровней, а также потенциальным ущербом от аварии определенного типа.

### Принятые допущения и условия

При построении математической модели механизма стохастического взаимодействия элементов рассматриваемого дерева опасных явлений используются следующие допущения и условия.

1. Принимается, что для технической системы, имеющей конечное число  $k$  типов аварии, каждый из однородных потоков исходных опасных воздействий является простейшим пуассоновским потоком событий на интервале  $\tau$  времени  $t$ . Все названные однородные потоки не зависят друг от друга.

Вследствие этого и на основании одной из теорем теории вероятностей [5] суммарный разнородный поток исходных опасных воздействий и суммарный разнородный поток аварий различных типов также представляют собой на интервале  $\tau$  простейшие потоки событий.

Интенсивность  $\lambda$  суммарного разнородного потока аварий равна сумме интенсивностей  $\lambda_j$  слагаемых однородных потоков аварий  $j$ -х типов

$$\lambda = \sum_{j=1}^k \lambda_j. \quad (5)$$

Напомним, что формула, связывающая параметр  $a$  распределения Пуассона с интенсивностью  $\lambda$  потока событий и интервалом  $\tau$ , на котором этот поток считается простейшим, имеет, как известно [1, 2, 4], вид

$$a = \lambda \cdot \tau. \quad (6)$$

За верхнюю границу параметра  $a$ , при которой поток еще считается простейшим, обычно принимаются значения, принадлежащие интервалу  $(5 \cdot 10^{-2}, 10^{-1})$ .

2. Условимся, что длительность интервала  $\tau$  постоянна и равна одному году, который в дальнейшем принимается в качестве используемой единицы времени, а начало интервала  $\tau$  совпадает с началом года.

Тогда из формул (6), (5) для данного частного случая следует

$$a = \lambda = \sum_{j=1}^k \lambda_j, \quad (7)$$

Условия 2 не являются допущениями, влекущими за собой какие-либо погрешности, и вызваны соображениями, которые проясняются после формулировки следующего допущения.

3. Если в эксплуатации одновременно находятся  $n$  одинаковых образцов технической системы, как это бывает с находящимися на боевом дежурстве группировками однотипных ракетных комплексов, то опасные

события, возникающие в разных образцах, считаются независимыми событиями. Если, кроме того, при  $j \neq const$  интенсивности  $\lambda_j$  принимаются одинаковыми для всех эксплуатируемых образцов, то параметр пуассоновского распределения увеличивается пропорционально числу образцов  $n$  и может существенно выходить за оговоренные «привычные» максимальные значения, при которых поток считается простейшим на интервале времени  $\tau$ .

Из (5), (6), (7) следует, что при допущениях 1, 3 и выполнении условий 2

$$a_n = na = n\lambda = n \sum_{j=1}^k \lambda_j, \quad (8)$$

где  $a_n$  – параметр пуассоновского распределения для группировки, состоящей из  $n$  одинаковых образцов.

К примеру, когда  $n=500$ , число типов аварии  $k=3$ , а  $\lambda_1=10^{-1}$ ,  $\lambda_2=10^{-2}$ ,  $\lambda_3=10^{-3}$ , параметр  $a_n$ , найденный по (8) и равный интенсивности суммарного разнородного потока аварий различных типов, составляет 55,5, что во много раз больше установленных для обычных случаев (когда не принимаются допущения, подобные рассматриваемому) максимальных значений данного параметра. Ничего страшного в этом нет, ибо с точно таким же основанием, что и для слагаемых однородных потоков аварий одного образца, суммарный разнородный поток аварий группы технических систем, состоящей из  $n$  образцов, можно считать простейшим потоком событий.

Эту особенность простейших потоков надо иметь в виду, в том числе и в разрабатываемой модели.

4. Для каждого элемента с номером  $s$  дерева опасных явлений, кроме занимающих верхний иерархический уровень, условный закон распределения случайной величины  $V_s$  уровня опасного воздействия при условии, что в опыте произошло событие  $B_s$  (состоялась реализация величины  $V_s$ ), считается собственной характеристикой данного элемента, которая не изменяется при стохастическом взаимодействии элементов дерева.

5. Аналогичное допущение принимается для элементов дерева, кроме занимающих низший уровень, относительно условных законов распределения случайных величин  $U_s$  ущерба от аварий  $A_s$ : они, эти законы, также являются собственными характеристиками своих элементов.

6. Принимается, что для элементов дерева, расположенных на промежуточных иерархических уровнях, соблюдается равенство

$$A_s \neq B_s. \quad (9)$$

7. Принимается, что для любой пары элементов (с номерами  $s, q$ ), между которыми существует непосредственная стохастическая связь (изображенная на дереве

стрелкой), условная вероятность  $P(A_q/B_s)$  зависит только от случайной величины  $V_s$  уровня опасного воздействия

$$P(A_q/B_s) = \varphi_{sq}(V_s), \quad (10)$$

где  $s$  соответствует воздействующему элементу дерева, а  $q$  – элементу, подвергаемому воздействию  $s$ -го элемента.

8. Предполагается, что погрешности аппроксимации зависимости (10) функцией  $\varphi_{sq}^*(V_s)$ , показанной на рис. 1, не выходят за приемлемые значения.

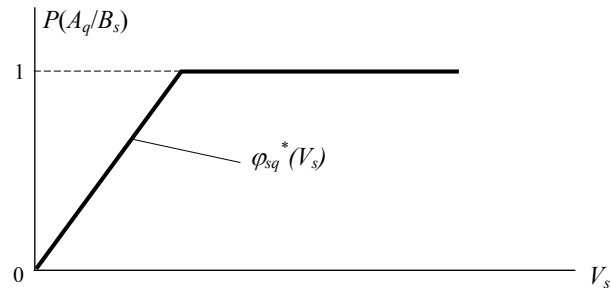


Рис. 1. «Пропорциональная» аппроксимация величины  $P(A_q/B_s)$

Область определения аппроксимирующей функции  $\varphi_{sq}^*(V_s)$  занимает всю положительную полуось и включает точку  $V_s=0$ . Когда значения этой функции принадлежат интервалу  $(0, 1)$ , она пропорциональна величине  $V_s$

$$\varphi_{sq}^* = k_{sq} V_s, \quad (11)$$

а после того, как величина  $k_{sq} V_s$  (при возрастании  $V_s$  от нуля) достигнет единицы, для последующих значений  $V_s$  остается равной единице.

Если данное предположение для каких-то пар элементов дерева не проходит по точности аппроксимации, надо испробовать другие аппроксимирующие функции, например, функцию вида, изображенного на рис. 2, при  $b_{sq} > 0$ .

Использование других аппроксимирующих функций практически не усложняет как определения вероятностей  $P(A_q/B_s)$ , так и модели в целом.

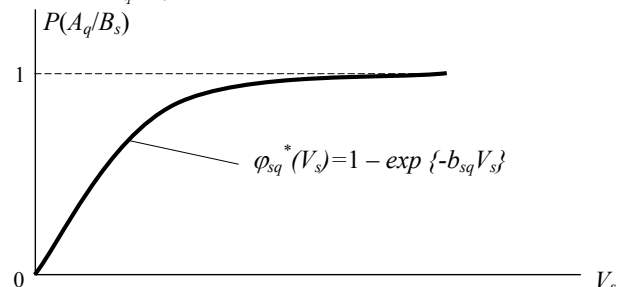


Рис. 2. Аппроксимация  $P(A_q/B_s)$  с использованием экспоненты

9. Условная вероятность  $P(A_q/B_s)$  события  $A_q$  при случившемся событии  $B_s$  для каждой  $(s-q)$ -й (читается «эскутой») непосредственно взаимодействующей пары

элементов дерева не зависит от взаимодействия элементов других пар. Эта вероятность, и в частности  $k_{sq}$ , являются собственными характеристиками  $(s-q)$ -й пары.

### Постановка и декомпозиция задачи

Постановка решаемой задачи не может обойтись без ключевого для нее понятия вероятностной определенности разрабатываемой стохастической модели, заключающейся в достаточности данной модели для отыскания неизвестных, изменяющихся при взаимодействии элементов дерева опасных явлений технической системы детерминированных (неслучайных) вероятностных характеристик этих элементов по заданным собственным характеристикам элементов дерева и их непосредственно (напрямую) взаимодействующих пар.

К собственным характеристикам этих пар относятся коэффициенты  $k_{sq}$  функций, аппроксимирующих зависимости  $P(A_q/B_s)$  от  $V_s$  для всех непосредственно взаимодействующих  $(s-q)$ -х пар элементов дерева.

Собственными характеристиками элементов дерева являются условные законы распределения случайных величин  $V_s$  уровней опасных воздействий элементов дерева на другие элементы и случайных величин  $U_j$  ущерба от аварий различных типов (или вместо законов распределения моменты этих законов, в первую очередь математические ожидания); вероятности  $B_s$  исходных опасных воздействий.

Неизвестными характеристиками являются вероятности  $P(A_j)$  аварий  $A_j$  различных типов и величины  $R_j$  рисков ущерба от этих аварий.

Принятые в предыдущем разделе допущения и условия существенно облегчают построение модели взаимодействия элементов дерева опасных явлений. Они, с одной стороны, делают перечисленные собственные характеристики дерева неизменными при стохастическом взаимодействии элементов. С другой стороны, появляется возможность декомпозиции решаемой задачи, и эта возможность также будет использована, но, разумеется, не в постановке.

Для постановки задачи предлагается следующая редакция.

В рамках принятых допущений и условий построить для технической системы, безопасность которой исследуется, вероятностно определенную стохастическую модель механизма взаимодействия элементов рассматриваемого дерева опасных явлений данной системы, предназначенную для однозначного отыскания значений вероятностей аварий различных типов и рисков ущерба от

этих аварий по известным или заданным собственным вероятностным характеристикам дерева опасных явлений.

Что касается декомпозиции, то она позволяет разделить поставленную задачу на частные, число которых равно числу непосредственно взаимодействующих пар элементов дерева. Попросту говоря, задача с конечным множеством неизвестных в результате такой декомпозиции сводится к эквивалентному (по числу элементов) множеству последовательно решаемых задач, для каждой из которых число неизвестных резко сокращается до нескольких единиц. Современные технические системы могут, пожалуй, насчитывать в своем дереве опасных явлений десятки, а то и сотни пар непосредственно взаимодействующих элементов. Поэтому применение декомпозиции в данном случае можно считать вполне оправданным.

Рассмотрим более детально эту декомпозицию.

Пусть номер  $s$  воздействующего элемента  $(s-q)$ -й пары меньше номера  $q$  элемента, подвергаемого воздействию  $s$ -го элемента. (Условие  $s < q$  легко выполнить путем выбора соответствующего ему порядка нумерации элементов дерева.) И пусть на каждом иерархическом уровне дерева могут располагаться, что очевидно, не более одного элемента этой пары. Тогда, если различать низший, промежуточные и верхний иерархические уровни дерева опасных явлений системы, возможны следующие исчерпывающие несовместные случаи расположения элементов  $(s-q)$ -х непосредственно взаимодействующих пар:

- первый случай –  $s$  принадлежит низшему уровню (уровню I),  $q$  – верхнему;
- второй –  $s$  принадлежит низшему уровню,  $q$  – промежуточному;
- третий –  $s$  и  $q$  принадлежат разным промежуточным уровням;
- четвертый –  $s$  принадлежит промежуточному уровню, а  $q$  – верхнему.

Каждому из перечисленных случаев соответствует свое двухэлементное с единственной связью дерево опасных явлений. Эти деревья, как и алгоритмы для определения их неизвестных характеристик, пронумерованы в соответствии со случаями расположения  $(s-q)$ -х пар.

Самое простое из четырех деревьев – дерево 1, но и оно имеет свои нюансы. На рис. 3, изображающем это дерево, показаны два элемента:  $W_s$  – воздействующий элемент и  $Y_q(s)$  – элемент, подвергаемый воздействию элемента  $W_s$ .

Как было условлено, рис. 3 использует краткие названия элементов дерева опасных явлений, совпадающие с названиями опасных событий  $B_s$  и  $A_q(s)$ . На самом деле

$W_s$  и  $Y_q^{(s)}$  представляют собой более сложные явления:  $W_s$  – это случайная реализация  $B_s$  случайной величины  $V_s$  уровня  $s$ -го исходного опасного воздействия, которая согласно принятой терминологии является  $s$ -м исходным потенциальным опасным воздействием; а  $Y_q^{(s)}$  – случайная реализация  $A_q^{(s)}$  случайной величины  $U_q$  ущерба от аварии  $A_q$  верхнего иерархического уровня, которая будет потенциальным ущербом от аварии  $A_q^{(s)}$ .

дания  $M[U_q]$  величины  $U_q$  ущерба от аварии  $A_q$ .

Данная задача решается элементарно с применением алгоритма 1, состоящего всего из двух формул

$$P(A_q^{(s)}) = k_{sq} P(B_s) M[V_s], \quad (12)$$

$$R_q^{(s)} = P(A_q^{(s)}) M[U_q]. \quad (13)$$

Деревья 2, 3, 4 опасных явлений для остальных случаев расположения элементов, непосредственно взаимодействующих пар, изображены на рис. 4.

Краткие названия элементов  
дерева по опасным событиям

Иерархические уровни  
дерева опасных явлений

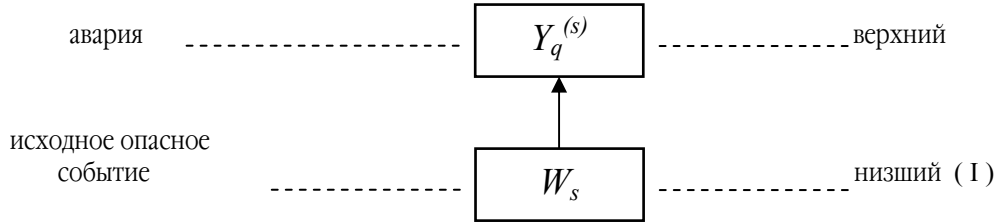


Рис. 3. Двухэлементное дерево 1 опасных явлений  $(s-q)$ -й пары ( $s$  принадлежит низшему уровню,  $q$  – верхнему)

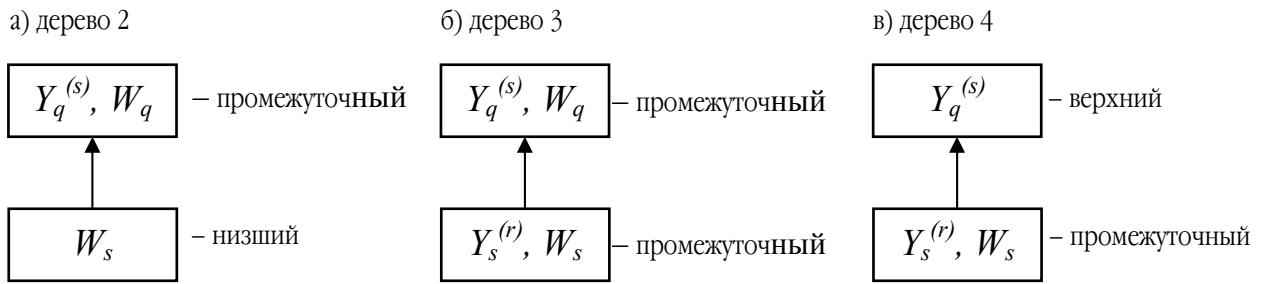


Рис. 4. Двухэлементные деревья 2, 3, 4 опасных явлений для остальных случаев расположения элементов на уровнях

Во избежание недоразумений поясним величину  $A_q^{(s)}$ .  $A_q^{(s)}$  – это авария  $A_q$  верхнего иерархического уровня, единственной причиной которой, если она произойдет, будет потенциальное исходное опасное воздействие  $W_s$ . Согласно принятым допущениям, распределение  $U_q$  не зависит от причин, вызывающих аварию  $A_q$ , в частности от  $W_s$ . Это распределение принимается в качестве известной или заданной характеристики дерева 1.

В дальнейшем ограничимся определением неизвестных числовых характеристик дерева опасных явлений по известным или заданным числовым характеристикам дерева, в том числе включающих в свой состав вместо условных законов распределения случайных величин их математические ожидания.

Для дерева 1 надо будет найти вероятность  $P(A_q^{(s)})$  аварии  $A_q^{(s)}$  и риск ущерба  $R_q^{(s)}$  от этой аварии по заданным значениям коэффициента  $k_{sq}$ , вероятности  $P(B_s)$  и математического ожидания  $M[V_s]$  величины  $V_s$  уровня  $s$ -го исходного опасного воздействия; математического ожи-

Как видно из рис. 3, 4, эти деревья имеют более сложные, чем дерево 1, элементы. Заглядывая чуть-чуть вперед, отметим, что для расчета неизвестных характеристик дерева 1 и дерева 2 достаточно знать их собственные характеристики. Этого нельзя сказать о деревьях 3 и 4, для которых неизвестны поначалу числовые характеристики нижних элементов. Эти характеристики надо определить до того, как придет пора использовать дерево 3 или 4.

Для дерева 2 (рис. 4а) искомыми числовыми характеристиками являются  $P(A_q^{(s)})$ ,  $R_q^{(s)}$ ,  $P(B_q)$ ,  $Q_q$ , а необходимыми для их расчета –  $k_{sq}$ ,  $P(B_s)$ ,  $M[V_s]$ ,  $M[U_q]$ . Алгоритм 2 для расчета неизвестных характеристик дерева 2 формируется следующим образом.

Определение  $P(A_q^{(s)})$ ,  $R_q^{(s)}$  производится по формулам (12), (13), для чего используются собственные числовые характеристики дерева 2.

$P(B_q)$  находится по формуле

$$P(B_q) = P(A_q(s)). \quad (14)$$

Значение  $Q_q$  риска опасного воздействия  $q$ -го элемента равно

$$Q_q = P(B_q) M[V_q]. \quad (15)$$

Перейдем к дереву 3 (рис. 4б). Особенностью алгоритма 3 для расчета неизвестных характеристик дерева 3 (эта особенность относится и к алгоритму 4) является необходимость учета предыстории стохастического взаимодействия до начала взаимодействия элементов данного дерева. Дело в том, что вероятность  $P(B_s)$ , используемая алгоритмом 3 как известная величина (а она – таки может быть определена по предыдущим результатам расчетов для деревьев вида 2 или 3), зависит от числа непосредственных воздействий на  $s$ -й элемент данного дерева. Если это число равно единице, то  $P(B_s) = P(A_s^{(r)})$ , где  $r$  – номер элемента, непосредственно воздействующего на  $s$ -й элемент изучаемого дерева 3. Если таких воздействий несколько, то в качестве  $P(B_s)$  принимается сумма соответствующих вероятностей.

С учетом сказанного для дерева 3 известными, заданными или заранее рассчитанными являются  $k_{sq}$ ,  $P(B_s)$ ,  $M[V_s]$ ,  $M[U_s]$ ,  $M[V_q]$ ,  $M[U_q]$ ; неизвестными –  $P(A_q^{(s)})$ ,  $R_q^{(s)}$ ,  $P(B_q)$ ,  $Q_q$ . Алгоритм 3 для расчета перечисленных неизвестных должен предусмотреть сначала определение  $P(B_s)$ , а затем – остальных неизвестных по формулам (12) – (15), которые используют собственные и найденные числовые характеристики дерева 3.

Последнее дерево из рассматриваемых «двухэтажек» – дерево 4 (рис. 4в). Оно похоже на дерево 3 структурой своих элементов, в нем только отсутствует потенциальное опасное воздействие  $W_q$ . Поэтому в алгоритме 4 расчета неизвестных числовых характеристик нет необходимости определять величины  $P(B_q)$ ,  $Q_q$ . Так что построение данного алгоритма при имеющемся алгоритме 3 не вызывает вопросов, надо лишь при расчете использовать собственные характеристики дерева 4 и характеристику  $P(B_s)$  воздействия его  $s$ -го элемента, найденную аналогичным алгоритму 3 образом.

Подведем некоторые итоги. Спрашивается, какая же польза получена от осуществленной декомпозиции. Представляется, эта польза «имеет быть».

Декомпозиция задачи определения неизвестных числовых характеристик стохастического взаимодействия элементов дерева опасных явлений технической системы по числовым характеристикам этого дерева, которые считаются заданными, позволяет:

- разделить эту задачу без внесения дополнительных погрешностей на частные задачи, каждая из которых соответствует своей  $(s-q)$ -й паре непосредственно стохастически взаимодействующих элементов дерева

опасных явлений системы;

- разделить множество таких пар в зависимости от их расположения на иерархических уровнях дерева системы на четыре возможных подмножества с идентичными структурами элементов;

- построить для найденных подмножеств пар двухэлементные деревья опасных явлений, отличающиеся структурами своих элементов;

- сформировать для каждого из четырех видов построенных деревьев полный набор известных (или заданных) и поначалу неизвестных числовых характеристик, обеспечивающих вероятностную определенность этого вида дерева;

- разработать для построенных двухэлементных деревьев алгоритмы расчета неизвестных числовых характеристик по известным (или заданным);

- выявить необходимость включения коэффициентов  $k_{sq}$  функций, аппроксимирующих зависимости условных вероятностей  $q$ -х аварий при условии, что произошло одно  $(s-e)$  из опасных непосредственных воздействий, от его уровня в состав собственных характеристик деревьев опасных явлений системы. Эти коэффициенты, как и другие собственные характеристики дерева системы, также считаются известными или заданными и тоже не изменяются при взаимодействии элементов.

Основным результатом осуществленной декомпозиции является методический аппарат, предназначенный для заготовки, если можно так сказать, тех «кирпичей», из которых будет построена модель стохастического взаимодействия элементов дерева опасных явлений технической системы. Декомпозиция свое дело сделала – она просто спасла общую задачу, обеспечив возможность ее решения. И теперь можно, не мудрствуя особо, собирать плоды этой декомпозиции.

«Композицию» общей задачи, понимая под этими словами использование решений частных задач, полученных в результате декомпозиции, для общего решения, в нашем случае удобно осуществлять в два этапа. На первом этапе строятся модели взаимодействия элементов ветвей дерева опасных явлений системы. Каждая такая ветвь – это часть общего дерева, соответствующая одному исходному воздействию. Задача второго этапа – построение вероятностно определенной модели взаимодействия всех элементов дерева опасных явлений технической системы.

Напомним – низший иерархический уровень дерева занимают элементы, каждый из которых является потенциальным исходным опасным воздействием. Промежуточные уровни занимают элементы, представляю-

щие комбинации двух опасных явлений специального класса случайных явлений, а именно потенциального опасного воздействия данного элемента на другие элементы и потенциального ущерба от определенного типа аварии системы. Верхний уровень занимает потенциальный ущерб от аварии, приносящей наибольший ущерб.

**Модели взаимодействия элементов ветвей дерева опасных явлений системы и всего дерева**

Ввиду того, что при построении модели взаимодействия элементов дерева необходимо перебрать все его ветви, построение моделей для отдельных ветвей можно начать с произвольно выбранного исходного опасного воздействия. При этом целесообразно использовать заготовленные двухэлементные деревья 1-4 и вероятностно определенные модели взаимодействия элементов этих деревьев, построенные при помощи своих алгоритмов.

Принимается следующий общий для всех ветвей дерева порядок нумерации по  $s$  элементов ветвей, при

который возводится по этажам снизу вверх. «Фундаментом» такой модели является исходное потенциальное опасное воздействие  $W_1$ .

Для того, чтобы построить первый «этаж» модели, нужно из множества  $(s-q)$ -х пар элементов ветви выделить подмножество, для которого  $s=1$ ; сопоставить выделенное подмножество с  $(s-q)$ -ми парами элементов деревьев 1, 2 на предмет выявления идентичности структур их элементов; для каждого выявленного случая идентичности рассчитать значения неизвестных величин по алгоритму 1 и (или) алгоритму 2.

Аналогичным образом строятся второй и следующие «этажи» модели. Разница будет в том, что, во-первых, используется свой номер  $s$  воздействующего элемента; во-вторых, сопоставление выделенного подмножества производится с деревьями 3, 4 (а не 1, 2); в-третьих, алгоритм расчета должен иметь номер 3 или 4.

Возьмем для примера ветвь дерева опасных явлений ППРК, соответствующую исходному воздействию грозовых разрядов (рис. 5).

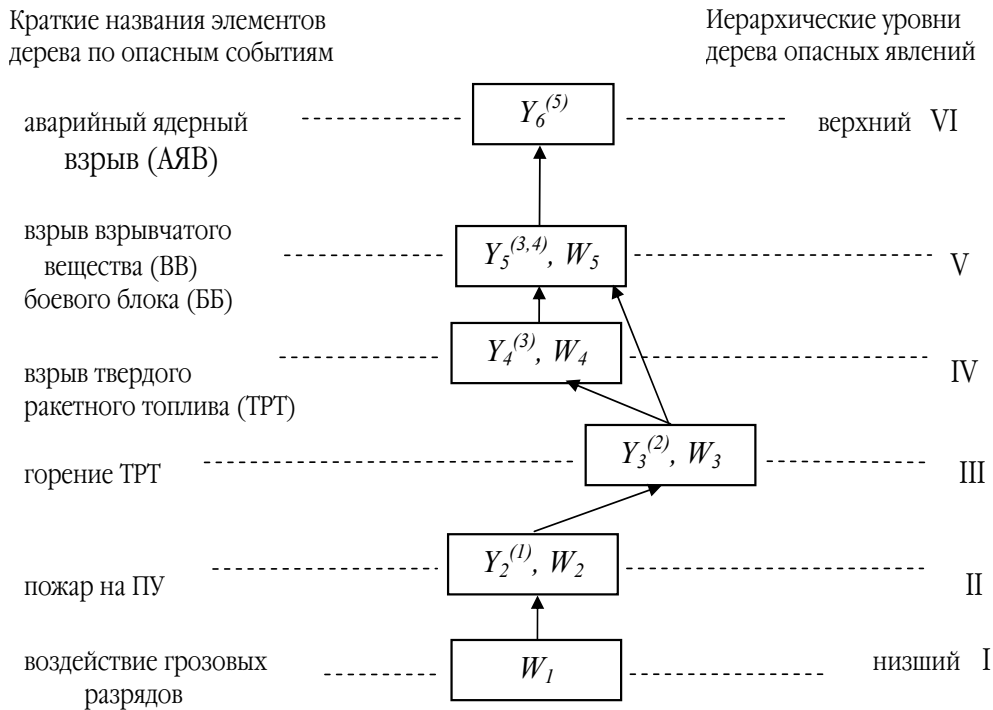


Рис.5 Ветвь дерева опасных явлений ППРК, соответствующая исходному воздействию грозовых разрядов

котором выполняется неравенство  $s < q$ . Для элемента, соответствующего выбранному исходному воздействию, номер  $s$  равен единице. Нумерация элементов ветви продолжается слева направо в ближайшем к низшему иерархическому уровню «непустом» уровне дерева ветви и т.д.

Построение модели взаимодействия элементов ветви напоминает строительство многоэтажного дома,

Согласно предложенному порядку нумерации элементов ветви требуется вычислить вероятности  $P(A_s^{(r)})$  и риски ущерба  $R_s^{(r)}$  для  $s=2, \dots, 6$ ;  $r \neq s-1$  по заданным значениям  $P(B_1), k_{12}, k_{23}, k_{34}, k_{35}, k_{45}, k_{56}$ , а также  $M[V_s]$  для  $s=1, \dots, 5$  и  $M[U_s]$  для  $s=2, \dots, 6$ . Перечисленные значения, начиная с  $P(B_1)$ , являются собственными числовыми характеристиками безопасности элементов рассматриваемой ветви дерева системы.

Изготовление модели взаимодействия элементов данной ветви не требует особых усилий. Множество  $(s-q)$ -х пар элементов ветви содержит единственную пару, для которой  $s=1$ . Структура элементов дерева этой пары, у которой  $q=2$ , идентична структуре элементов дерева 2. Поэтому при построении первого «этажа» модели, т.е. при определении неизвестных величин дерева 2 для  $s=1, q=2$ , следует использовать алгоритм 2.

В качестве заданных выступают значения величин  $k_{12}, P(B_1), M[V_1], M[V_2], M[U_2]$ ; в качестве неизвестных –  $P(B_2), P(A_2^{(1)}), Q_1, Q_2, R_2^{(1)}$ .

Применение алгоритма 2 для построения первого «этажа» модели приводит к формулам

$$\left. \begin{aligned} P(A_2^{(1)}) &= k_{12} P(B_1) M[V_1]; \\ R_2^{(1)} &= P(A_2^{(1)}) M[U_2]; \\ Q_1 &= P(B_1) M[V_1]; \\ P(B_2) &= P(A_2^{(1)}), \\ Q_2 &= P(B_2) M[V_2]. \end{aligned} \right\} (16)$$

Чтобы ненароком не сбиться, заметим – для всех «этажей» модели номер «этажа» на единицу меньше номера иерархического уровня дерева опасных явлений системы. Этим уровням должны быть строго равны уровни ветви, даже если среди них имеются «пустые».

Из рис. 5 хорошо видно, что при построении 2-го, 3-го и 4-го «этажей» модели взаимодействия элементов рассматриваемой ветви необходимо использовать по одному разу для каждого «этажа» алгоритм 3, а при построении 5-го – алгоритм 4. Полученные формулы для определения неизвестных числовых характеристик элементов перечисленных «этажей» модели имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \text{для второго «этажа» модели} \\ P(B_2) &= P(A_2^{(1)}); \\ P(A_3^{(2)}) &= k_{23} P(B_2) M[V_2]; \\ R_3^{(2)} &= P(A_3^{(2)}) M[U_3]; \\ Q_2 &= P(B_2) M[V_2]; \\ P(B_3) &= P(A_3^{(2)}), \\ Q_3 &= P(B_3) M[V_3]; \end{aligned} \right\} (17)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{для третьего «этажа»} \\ P(B_3) &= P(A_3^{(2)}); \\ P(A_4^{(3)}) &= k_{34} P(B_3) M[V_3]; \\ R_4^{(3)} &= P(A_4^{(3)}) M[U_4]; \\ Q_3 &= P(B_3) M[V_3]; \\ P(B_4) &= P(A_4^{(3)}); \\ Q_4 &= P(B_4) M[V_4]; \end{aligned} \right\} (18)$$

для четвертого «этажа»

$$\left. \begin{aligned} P(B_4) &= P(A_4^{(3)}); \\ P(A_5^{(4)}) &= k_{45} P(B_4) M[V_4]; \\ R_5^{(4)} &= P(A_5^{(4)}) M[U_5]; \\ Q_4 &= P(B_4) M[V_4]; \\ P(B_5) &= P(A_5^{(4)}); \\ Q_5 &= P(B_5) M[V_5]; \end{aligned} \right\} (19)$$

наконец, для пятого «этажа»

$$\left. \begin{aligned} P(B_5) &= P(A_5^{(3)}) + P(A_5^{(4)}); \\ P(A_6^{(5)}) &= k_{56} P(B_5) M[V_5]; \\ R_6^{(5)} &= P(A_6^{(5)}) M[U_6]; \\ Q_5 &= P(B_5) M[V_5]. \end{aligned} \right\} (20)$$

Построенная модель механизма стохастического взаимодействия элементов ветви дерева опасных явлений технической системы использовала все перечисленные выше, начиная с  $P(B_1)$ , собственные числовые характеристики элементов ветви и все обозначенные на рис. 5 стохастические причинно-следственные связи дерева ветви.

Данная модель является вероятностно определенной.

Изготовление по аналогии с построенной моделью моделей взаимодействия элементов остальных ветвей дерева завершает первый этап «композиции».

Второй этап «композиции», являющийся заключительной частью построения вероятностно определенной модели взаимодействия элементов всего дерева опасных явлений системы, выполняется еще проще.

Если через  $i$  обозначить номер иерархического уровня дерева опасных явлений системы, а через  $A_i$  – аварию определенного типа, которая может случиться на  $i$ -м уровне, то для вычисления значений вероятности  $P(A_i)$  можно использовать формулу

$$P(A_i) = \sum_{(r_i)} P(A_i^{(r_i)}), (21)$$

где  $P(A_i^{(r_i)})$  – значения вероятностей  $P(A_i^{(r_i)})$ , найденные на первом этапе «композиции» и отсортированные по  $r_i$

$r_i$  – номера элементов разных ветвей дерева опасных явлений системы, непосредственное воздействие которых способно вызвать аварию  $A_i$ .

Суммирование под знаком  $\sum_{(r_i)}$  производится по всем  $r_i$

$$R_i = P(A_i) M[U_i]. (22)$$

Общий риск  $R$  ущерба от аварии  $A$  системы принимается равным

$$R = \sum_{i=2}^k R_i, (23)$$

Формула (23) является видоизменением формулы



(4) для случая, когда все «этажи» модели, начиная со второго, имеют по одному элементу, соответствующему аварии определенного типа.

### Заключение

В настоящей работе объектом исследований являлись технические системы, для которых необходимо считаться с ущербом от их возможных аварий и уже нельзя обойтись без показателей безопасности, учитывающих и характеризующих этот ущерб. Для них явно недостаточно «наглядной агитации» в виде деревьев опасных событий, хотя они и бывают полезны при установлении причинно-следственных связей между элементами этих деревьев, представляющих собой исходные опасные воздействия и аварии разных типов. Вместо таких деревьев, не пригодных для определения вероятностей аварий и числовых характеристик ущерба от этих аварий, были предложены более сложные деревья опасных явлений, каждый элемент которых принадлежит специальному классу случайных явлений, а именно классу случайных реализаций случайных величин. Однако и они из-за присущей им остаточной – по сравнению с деревьями опасных событий – неопределенности не могут ответить на вопрос, каковы же значения упомянутых характеристик. И только модель механизма стохастического взаимодействия элементов дерева опасных явлений специального класса позволяет разработать алгоритмы вычисления искомых характеристик.

Постановка задачи построения такой модели использует понятие вероятностной определенности модели, заключающейся в ее достаточности для вычисления требующихся неизвестных, изменяющихся при взаимодействии элементов дерева опасных явлений системы, вероятностных характеристик по известным или заданным значени-

ям так называемых собственных характеристик элементов дерева и их непосредственно взаимодействующих пар.

Методический подход к построению такой модели определила обнаруженная возможность декомпозиции общей задачи на частные по числу непосредственно взаимодействующих пар элементов дерева опасных явлений системы. Использование частных решений для общего позволило определить и разделить полный набор неизвестных и задаваемых числовых характеристик исходных опасных воздействий аварий различных типов и ущерба от них и разработать простые алгоритмы расчета неизвестных характеристик по заданным.

Необходимым условием правомерности подходов, утверждений и полученных рабочих формул является приемлемость принятых допущений. Если они изменятся, то это в конечном счете повлияет на сложность разрабатываемой стохастической модели, но никак не скажется на ее вероятностной определенности. Вероятностная определенность модели взаимодействия элементов дерева опасных явлений специального класса – изначальное свойство данной модели, предусмотренное постановкой задачи. Для конкретной технической системы такая вероятностно определенная модель или разработана, или ее нет. Третьего не дано. Однако сохраняется принципиальная возможность разработки подобных моделей для технических систем при любых принятых допущениях.

Нельзя в то же время забывать, что необходимое условие адекватности дерева опасных явлений специального класса технической системы, для которой оно построено, заключается в обеспечении точности исходных данных для определения его собственных вероятностных числовых характеристик дерева, включающих характеристики элементов дерева и характеристики их непосредственно взаимодействующих пар.

### Литература

1. Волков Л.И. Управление эксплуатацией летательных комплексов. - М.: Высшая школа. 1987.
2. Волков Л.И. Безопасность ракетных и ракетно-космических комплексов. - М.: Издательство СИП РИА. 2002.
3. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. - М.: Мир. 1990.
4. Пугачев В.С. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Наука. 1979.
5. Климов Г.П. Теория вероятностей и математическая статистика. - М.: Изд-во Московского университета. 1983.
6. Математическая энциклопедия. Том 3. - М.: Советская энциклопедия. 1982.
7. Цылаков Ю.В., Шлеев С.К., Горин В.С. Определение потенциального ущерба от аварии технической системы // Двойные технологии. - 2001. - № 1.
8. Цылаков Ю.В., Ульянов С.В., Несмачный С.В., Иванов Д.В. Деревья опасных явлений для ракетных и космических комплексов // Двойные технологии. - 2007. - № 2.
9. Цылаков Ю.В., Ульянов С.В., Арцивенко В.С., Несмачный С.В. Проблемы концепции приемлемых рисков ущерба от аварий эксплуатируемых технических систем // Двойные технологии. - 2008 (в печати).

Материал поступил в редакцию 12. 03. 2008г.

При этом выбор шкалы телеизмерений производится в условиях следующего противоречия: ее расширение приводит к повышению достоверности ТМИ в аварийных и нештатных ситуациях, но сопровождается ухудшением точностных характеристик.

Существующая теория телеметрии чрезмерно обеднена и состоит из набора примитивных сведений [17]. В действительности современная телеметрия – это наука компромиссов, где наилучшие решения формируются в результате адаптивного выбора наиболее подходящих альтернатив. Поэтому ее будущее связано с проектированием и эксплуатацией адаптивных телеметрических систем. Этой проблематике посвящен ряд статей [4-16]. В них показано, что определяющая роль в повышении эффективности всего телеметрического комплекса (ТК) принадлежит бортовым системам. Реальный вклад в эффективность ТК модернизированных бортовых систем примерно в 9 раз больше по сравнению с тем, когда совершенствуется его наземная составляющая. Тем не менее совершенствованию бортовых систем телеизмерений уделяется недостаточно внимания.

Это свидетельствует также о том, что недостаточно внимания уделяется системному анализу перспектив совершенствования ТК. К числу общих методологических проблем следует отнести стремление к универсальности разрабатываемых комплексов на основе прежних примитивных принципов телеизмерений. При этом забывают (а многие просто не знают) об одном из основных законов природы, суть которого заключена в том, что «за универсальность необходимо расплачиваться потерей эффективности». Поэтому так много ошибок при проектировании ТК и определении основных направлений его совершенствования.

Наши предки-крестьяне хорошо понимали, что зимой необходимо телегу менять на сани, а с наступлением лета надо было все сделать наоборот. Таким образом, они приспосабливались к изменяющимся внешним условиям. Парадокс заключается в том, что этого не понимают многие организации промышленности, занимающиеся отработкой ракетно-космической техники (РКТ): разрабатываемые ими образцы, образно говоря, либо ориентированы на «телегу», либо на «сани». И это притом, что условия, в которых осуществляются испытания и штатная эксплуатация (ШЭ) РКТ, меняются значительно более разнообразно и быстро. Многие из них случайны по природе, поэтому их нельзя заранее спрогнозировать. Наиболее сложная обстановка в плане определения того, что же необходимо предпринять для управления летными испытаниями (ЛИ) РКТ и обеспе-

чения безопасности пусков складывается при возникновении нештатных и аварийных ситуаций.

### 1. Зарубежный и отечественный опыт решения проблем построения адаптивных систем и комплексов телеизмерений

Неопределенность, приводящая к ошибкам идентификации ТМИ и причин отклонений функционирования систем и агрегатов РКТ от «нормы», не только связана с эффектом «зашкаливания» значений ТМП. Она возникает также из-за недостаточной частоты опроса датчиков, а также из-за помех в каналах «борт-Земля». Проведенные исследования показали, что потери ТМИ из-за недостаточной частоты опроса датчиков касаются, прежде всего, параметров двигательной установки (ДУ). Они проявляются в процессе развития аварийной ситуации в ДУ, исходом которой является разрушение конструкции испытываемого изделия.

Доля телеметрируемых параметров ДУ в общем объеме медленно-меняющихся параметров (ММП) ракетносителей (РН) составляет примерно 15% ÷ 40%. Причем датчики ДУ опрашиваются обычно с частотой 50 Гц и 100 Гц. Однако для того, чтобы получить информацию о поведении параметров ДУ в аварийной ситуации, частота опроса соответствующих датчиков должна быть увеличена до 200 Гц ÷ 400 Гц.

Нельзя утверждать, что об этой проблеме ранее ничего не было известно. На рис. 2 приведена диаграмма, иллюстрирующая процесс подбора наиболее подходящих в метрологическом отношении шкал измерений.

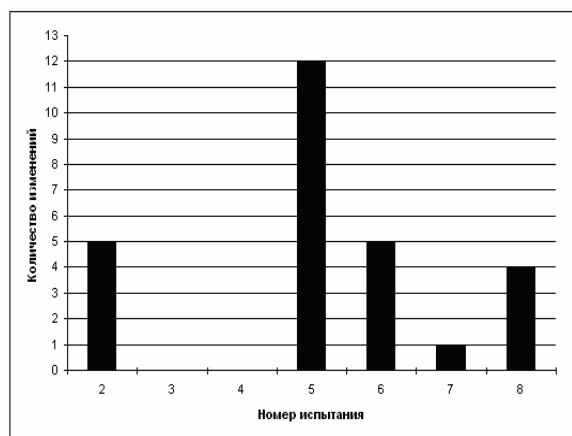


Рис. 2. Диаграмма, иллюстрирующая процесс подбора наиболее подходящих в метрологическом отношении шкал измерений (минимизирующих появление случаев «зашкаливания» значений ТМП, с одной стороны, и максимизирующий показатели точности телеизмерений) при решении оптимизационной задачи, заключающейся в адаптации системы телеизмерений к группе из двадцати вибропараметров (БМП), с другой стороны

Из диаграммы, прежде всего, следует, что эффект «зашкаливания» значений ТМП присутствует также и в условиях нормального (штатного) пуска. При этом во втором пуске этот эффект наблюдался у 5 БМП. Затем после коррекции шкал измерений эффект «зашкаливания» отсутствовал в 3 и 4 пусках, но при ЛИ №5 «зашкаливали» уже 12 датчиков из 20. В восьмом пуске их было 4. На операцию подбора шкал телеизмерений на основе метода «проб и ошибок» ушло 3 года, а процесс адаптации нельзя было признать удовлетворительным.

При этом представляет особую научную и практическую значимость системно-информационный анализ того, как проблема обеспечения информационной безопасности пусков и получения достоверных телеизмерений в нештатных и аварийных ситуациях решается в других странах, например, в США. В США и на французском полигоне «Куру» подстройка шкал телеизмерений осуществляется по мере необходимости в ходе ЛИ на основе оперативной обработки принимаемой ТМИ автоматизированным комплексом анализа данных и передачи команд управления с использованием командной радиолинии (КРЛ). Реальный пример подобного управления шкалами телеизмерений проиллюстрирован на рис. 3 и 4. При этом на рис. 3 приведен случай аварийной ситуации и изображены ТМП «угла тангажа» и «рыскания», а на рис. 4 те же параметры, но полученные в условиях «нормального» пуска.

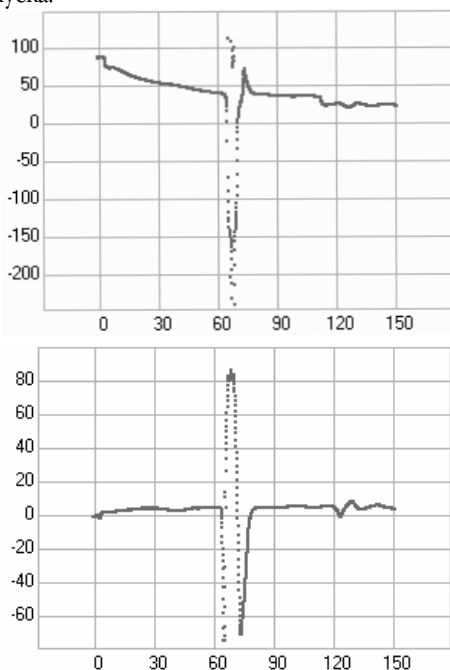


Рис. 3. Изменение угла тангажа и рыскания при нештатном пуске БРПЛ «Трайидент-1» [аварийная ситуация вызвана «недорубом» соединительного отсека (СО1) первой и второй ступени (не разорвался один из соединительных пироболтов)]

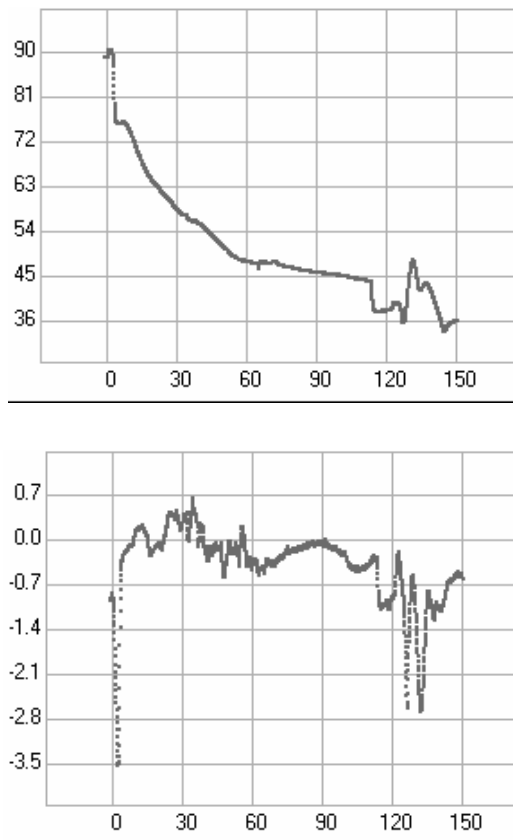


Рис.4. Изменение угла тангажа и рыскания при штатном пуске БРПЛ «Трайидент-1»

При аварии шкала телеизмерений «угла тангажа» была расширена со значения  $D_n = (91 - 35) = 56$  ед до величины  $D_a = (130 - (-250)) = 380$  ед, т.е. более чем в 6,7 раза. По законам метрологии при этом во столько же раз была увеличена погрешность телеизмерений (уменьшены точностные показатели).

При этом были сформированы дополнительные команды: вначале на повторный «разрыв» пироболта, а затем (после того, как она не была исполнена и пироболт продолжал удерживать отработавшую первую ступень) на совершение маневра ракетой из стороны в сторону. В результате ступень оторвалась, и пуск завершился успешно.

Адаптивное информационно-телеметрическое обеспечение (ИТО) испытаний и ШЭ РКТ, таким образом, должно быть ориентировано на множество возможных различных ситуаций, которые могут привести к аварии и предполагает наличие дополнительных команд, формирующих программу адекватных контрмер.

В существующей отечественной практике наличие КРЛ предусмотрено только при управлении КА. На уровне НИР прорабатываются вопросы создания системы управления полетом разгонных блоков (РБ). Но хуже всего дело обстоит с испытаниями ракетных комплексов (РК). А количество аварийных пусков растет.

## 2. Адаптация телеметрических систем и комплексов к нештатным и аварийным ситуациям как основа информационно-измерительного обеспечения безопасности пусков и управления летными испытаниями РКТ

Прежний экстенсивный подход к повышению эффективности ИТО испытаний и ШЭ РКТ отличался стремлением к универсальности, в том числе и в вопросах оценивания точности и достоверности измерений. На прошедшем этапе совершенствования техники телеизмерений это было оправдано необходимостью определения пределов обобщения и универсальности.

Дальнейшее повышение эффективности ТК должно быть основано на использовании отличительных особенностей процессов телеизмерений, связанных с отличиями целей и задач испытаний РКТ. Этот новый интенсивный этап модернизации ТК требует разработки адаптивных телеметрических систем. Теория адаптивных ТК предполагает наработку как можно большего множества различных вариантов организации телеизмерений, имеющих конечной целью получение наилучших показателей точности и достоверности при всех других показателях эффективности, не хуже заданных.

Ранее элементы адаптации систем телеизмерений присутствовали. Но они были ограничены господствовавшим представлением о необходимости реализации универсального подхода к проектированию телеметрических комплексов. Это означало, что спроектированная система ориентировалась либо только на «телегу», либо только на «сани». Поэтому на многих объектах РКТ, признавая необходимость адаптации, одновременно устанавливались несколько бортовых телеметрических систем (БРТС), разработанных различными организациями. Например, при запусках РН «Протон» с разгонным блоком (РБ) «Бриз» использовались и БРТС «Сириус» и бортовая информационно-телеметрическая система (БИТС) «Пирит» (разработчик НПО ИТ), и БРТС телеметрической системы (ТМС) РТС-9 (разработчик РНИИ КП). Поэтому при авариях на РН «Протон» имелась ТМИ, полученная с использованием различных ТМС. Однако жесткие массово-габаритные ограничения для размещения бортового оборудования не позволяют воспользоваться данным подходом.

Невозможность адаптации телеметрических систем и комплексов к изменяющейся обстановке проявилась также в том, что вся предшествовавшая практика проектирования телеметрических комплексов (ТК) была ориентирована на самые сложные режимы получения ТМИ. Поэтому в ранее использовавшихся бортовых ра-

диотелеметрических системах семейства БРС-4 - БРТС «Сириус», «Скут» и Скиф» была выбрана высокая частота смены основного телеметрического кадра (ОТК) - 8 КГц и малое число телеметрических каналов (слов) измерений основного (малого) телеметрического кадра - 40. Благодаря этому был реализован быстрый алгоритм вхождения в синхронизм (время вхождения с составило 1- 2 мксек). В результате этого прием ТМИ мог быть реализован в условиях быстроменяющейся модулирующей помехи, порождаемой плазмой. Но для начального активного участка полета ракеты такая структура формирования и передачи данных была наихудшей. Основным недостатком заключался в том, что для того, чтобы понизить частоту опроса ТМП до 1 Гц и менее необходимо было иметь своеобразный «редуктор» понижения частоты от 8 КГц до 1 Гц в виде трехступенчатой схемы последовательного подключения локальных коммутаторов (ЛК).

У вновь спроектированной БРТС «ОРБИТА-ИВМО» все наоборот: частота смены телеметрических кадров 4 Гц, число слов измерений в кадре - 65656. Поэтому и время вхождения в синхронизм при сбоях - 160 мксек. Из этого краткого анализа следует, что структура данных БРТС «ОРБИТА-ИВМО» является лучшей для начального участка полета ракеты и наихудшей для условий приема ТМИ в районе 43 ОНИС.

Таким образом, одна и та же БРТС, установленная на ракете и БО, является наилучшей для одного участка полета и наихудшей для другого. Это еще раз является свидетельством того, что без адаптивных методов и методик не представляется возможным существенно повысить эффективность ПИК. Ранее специалисты, занимающиеся разработкой ТК, такими системными знаниями владели, сейчас этого нет.

Количество примеров адаптации примитивного уровня ограничено. Но их ценность и значимость заключается в том, что была подготовлена научно-методическая основа для разработки теории адаптивных систем. Поэтому теоретическую основу построения адаптивных систем телеизмерений составляют нетрадиционные подходы. Это не означает, что не должны совершенствоваться ранее использовавшиеся решения. Но для того, чтобы одновременно использовать несколько различных ТМС, необходима значительная работа по миниатюризации бортовых систем.

Также при создании телеметрии, рассчитанной на обеспечение телеизмерениями «аварийных пусков», должна быть использована продуманная система автономных регистраторов ТМИ («черных ящиков»). В СССР НПО ИТ и другие промышленные организации были в

числе мировых лидеров по их разработке. Однако заключение Договора о СНВ-1 и запрещение «капсулирования» ТМИ автономных регистраторов привело к тому, что подобного рода работы были остановлены. Но никто не запрещал их использовать для обеспечения безопасности запусков РКТ, не подпадающей под действие Договора о СНВ-1. Кроме того, в декабре 2009 года заканчивается действие Договора о СНВ-1, поэтому уже сейчас необходимо думать о включении системы автономных регистраторов ТМИ в состав создаваемой телеметрии «аварийных пусков».

### 3. Основные положения создаваемой теории адаптивного информационно-телеметрического обеспечения испытаний и штатной эксплуатации ракетно-космической техники

Адаптация предполагает наработку большого множества альтернативных методик, которые, в свою очередь, являются проблемно-ориентированными по решаемым задачам и взаимосвязанным по принципам их реализации программно-математическими методами. Возможность наилучшего приспособления к сложившейся при испытаниях РК ситуации достигается путем выбора наиболее подходящей альтернативы. Но для этого необходимо разработать как можно большее множество проблемно-ориентированных моделей, методик и алгоритмов. Чем их больше, тем лучше будет приспособление. Их количество, таким образом, оказывает определяющее влияние на превращение адаптивных систем и комплексов в интеллектуальные. В настоящее время много НИР и ОКР начинаются словами: «разработка интеллектуальных методов (систем, комплексов...». При этом авторы таких определений часто не отдают себе отчета в том, что нельзя сразу перейти к «интеллектуальным системам и комплексам» без реализации промежуточного этапа, связанного с адаптивными системами и комплексами.

Научно-методическую основу технических решений, принимаемых в условиях жестких ограничений, составляют компромиссы. По своей сути вся теория измерений представляет собой множество методов передачи, сбора, обработки и анализа измерительной информации (ИИ), основанных на компромиссах. Поэтому разработка адаптивных систем предполагает введение и учет еще большего, чем прежде, числа ограничений. В этом заключается принципиальное отличие адаптивного подхода к совершенствованию ПИК от традиционного экстенсивного. Создаваемое при этом множество различных альтернативных решений требует расширения количества

оптимизационных задач. При этом принципиальное отличие от того, что предлагалось ранее, заключается в их проблемной ориентированности.

Чистая математика предназначена для упражнения ума, а именно там встречаются оптимизационные задачи в классической интерпретации. Прикладная математика – это, прежде всего, работа с ограничениями. Чем больше ограничений и чем они жестче, тем выше уровень, характеризующий знание прикладной области математиком.

Основу синтеза в большом количестве различных нетрадиционных подходов и решений составляют новые прикладные теории. К их числу можно отнести:

- модернизированный морфологический анализ (ММА) [2,17], представляющий собой методологическую базу генерации новых идей и синтеза новых технических решений;
- дискретную математику и конструктивную теорию конечных полей (КТКП) [2, 4-16], позволяющих наиболее адекватно описать процессы преобразования измеряемых параметров в цифровую форму, сокращения естественной избыточности измерительной информации, ее передачи по каналам связи с ограниченной пропускной способностью, идентификации полученных экспериментальных данных, искаженных помехами;
- модернизированный матричный анализ измерительной информации [14,15], повышающий устойчивость оценивания летно-технических характеристик (ЛТХ) РКТ;
- теорию замещающих математических и структурно-кодовых конструкций [2, 16-18], использование которой позволяет обойти многочисленные «препятствия» и «преграды» при решении задач создания адаптивных измерительных систем и комплексов;
- методы анализа групповых телеметрических сигналов (ГТС) и синтеза их оптимальных структур [16];
- компьютерную математику и графику [9,10], позволяющую в наибольшей степени учесть специфические особенности современного информационно-измерительного обеспечения (ИИО) испытаний и ШЭ РКТ, такие, как огромные объемы анализируемых и обрабатываемых результатов измерений, высокая степень автоматизации процессов получения измерительной информации, расширяющееся количество деструктивных факторов и повышение уровня неопределенностей различного толка.

Предлагаемые нетрадиционные подходы к созданию адаптивных систем телеизмерений реализованы в бортовой адаптивной телеметрической системе (БАТС) «Крона», которая успешно прошла летные испытания

(ЛИ) 7.10.98 г. на космодроме «Байконур», а также в ее модернизированном варианте «Асон», разработанном в 2003 году в НПО Маш. При ЛИ БАТС «Крона» в 1998 году были получены следующие новые результаты:

- на один-два порядка были улучшены показатели достоверности по показателю вероятность искажения бит;

- по отдельным информационно-ценным ТМП погрешность квантования была уменьшена в 256 раз за счет того, что данные телеизмерений, имеющие 16-разрядное представление слов-измерений, были переданы только 8 разрядами, представляющими собой образ-остаток исходного значения;

- на основе матричной обработки данных, представленных в системе остаточных классов (СОК), существенно повышена устойчивость оценивания ЛТХ испытываемой РКТ.

Нетрадиционное представление данных измерений в СОК составляет основу перехода к адаптивным системам нового поколения. Это связано не только с возможностью решения задач повышения эффективности передачи измерительной информации по каналам связи с шумами. Принципиальное новое решение при этом также получают и другие проблемные вопросы сбора, обработки, анализа измерительной информации, такие, как борьба с помехами, повышение устойчивости анализа летно-технических характеристик (ЛТХ) испытываемых изделий. Кроме того, значительно расширяются возможности аналитического решения проблемно-ориентированных задач, составляющих основу построения адаптивных систем и комплексов.

Новизна при решении оптимизационных задач заключена в следующих возможностях, реализуемых при использовании математического аппарата конструктив-

ной теории конечных полей:

- существенного упрощения математического аппарата линейного программирования, разработанного академиком Л.В.Канторовичем на основе перехода от систем алгебраических неравенств к системам сравнений по выбранным модулям-числам;

- оптимизации на уровне образов-остатков (класс-оптимизации), при которой гарантируется достижение экстремальных значений всей функциональной зависимости в целом.

Особое прикладное значение второго положения заключено в том, что вначале могут быть решены частные задачи оптимизации, такие, как достижение максимумов объемов содержательной информации, точности и достоверности результатов измерений, оперативности обработки ИИ и устойчивости оценивания ЛТХ. Математическая теория оптимизации гомоморфных отображений, а к числу таковых относится и представление данных образами-остатками, гарантирует, что при этом будет оптимальным и общее решение.

Нарабатываемое при проектировании адаптивных систем и комплексов множество проблемно-ориентированных задач определяется требуемым количеством различных технических решений (альтернатив), ориентированных на определенную ситуацию. Поэтому при планировании летного эксперимента рассматриваются различные ситуации, при испытаниях определяется момент их наступления, после чего реализуется та программа действий, которая является наиболее адекватной. При этом, чем больше будет на этапе обучения наработано различных альтернатив, тем ближе будет адаптивная система к интеллектуальной и тем выше будет эффективность ИТО испытаний и ШЭ РКТ.

#### Литература

1. Налимов В.В., Мульченко З.М. *Наукометрия. Изучение развития науки как информационного процесса.* – М.: Наука, 1969. 192 с.
2. Кукушкин С.С. *Теория конечных полей и информатика. Т.1.*, М.: Минобороны России, 2003. – 278с.
3. *Методы анализа характеристик летательных аппаратов / Б.И.Сухорученков, В.А.Меньшиков.* – М.: Машиностроение, 1995.–368с.
4. Кукушкин С.С. *Конструктивная теорема об остатках и ее прикладное использование // Радиотехнические и телевизионные системы и устройства /Труды МЭИ. №643. М.: 1991.- С.34-42.*
5. Кукушкин С.С. *Повышение эффективности передачи телеметрической информации на основе представления результатов телеизмерений в системе остаточных классов/ Измерительная техника. М.: Стандарты. №7. 1995. – С.11–15.*
6. Кукушкин С.С. *Использование конструктивной теоремы об остатках для повышения эффективности вычислений в системах передачи и обработки информации/ Измерительная техника. М.: Стандарты. №4. 1997. – С.13-17.*
7. Кукушкин С.С. *Повышение точности оценивания летно-технических характеристик летательного аппарата на основе векторных моделей обработки данных измерений в системе остаточных классов/ Измерительная техника. М.: Стандарты. №10. 2007. – С.11-17.*
8. Кукушкин С.С. *Синтаксическое сжатие передаваемых данных /Двойные технологии. 2005. №1. С.34–38.*

9. Кукушкин С.С. Математические методы полиномиального исчисления, основанные на использовании нетрадиционной теории конечных полей. М.: Двойные технологии, №1 2005, с.6 – 11.
10. Кукушкин С.С. Матричная алгебра системы остаточных классов. М.: Двойные технологии, №3 2005, с.2 – 9.
11. Кукушкин С.С. Информационные технологии единой системы передачи и обработки результатов измерений. М.: Двойные технологии, №1 2006, с.15 – 22.
12. Кукушкин С.С. Математические модели формирования оптимальных структур передаваемых данных телеизмерений. М.: Двойные технологии, №4 2006, с.18 – 27.
13. Кукушкин С.С., Захаров В.Н. Математические и методические основы использования конструктивной теории конечных полей при обработке результатов измерений. М.: Измерительная техника, №10, 2006. с 18-22.
14. Кукушкин С.С., Баранов А.А. Методики упрощения математических моделей на основе использования нетрадиционной теории конечных полей. М.: Двойные технологии, №1 2007, с.42 – 49.
15. Кукушкин С.С. Модели векторного представления и нетрадиционного преобразования данных в системе остаточных классов. М.: Измерительная техника, №3, 2007. с 15–20.
16. Кукушкин С.С. Двумерные технологии модуляции сигналов, как основа реформирования и развития систем связи и передачи информации/Двойные технологии. 2008. №1. С.34-38.
17. Захаров В.Н. Основные положения модернизированного морфологического анализа как методической базы системных исследований//Сборник трудов, выпуск 14 /Российская инженерная академия. – М.: СИП РИА, 2006. – с. 139–156.
18. Кукушкин С.С. Абстрактный алгебраический подход к синтезу алгоритмов обратного преобразования данных из области образов в область исходного традиционного представления/Двойные технологии. 2004. №1. С.27–30.
19. Современная телеметрия в теории и на практике /Назаров А.В., Козырев Г.И. и др. – Санкт-Петербург, 2007.

Материал поступил в редакцию 14. 03. 2008г.

УДК 621.454.

© Ермолаев И.В.

## РАСЧЕТ ПОПЕРЕЧНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ ТЯГИ ДВИГАТЕЛЯ

*Приводится эмпирическая зависимость для расчета поперечной составляющей тяги двигателя при вдуве (впрыске) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла.*

С появлением потребностей в двигательных установках большой мощности особо остро встал вопрос об ограничении их весовых характеристик, особенно с появлением двигателей высотных ступеней, работающих на водородном топливе, вес которых значительно возрастает за счет сопел с большой степенью расширения. Используемые способы управления по тангажу и рысканию путем применения специальных рулевых двигателей значительно увеличивают пассивный вес ступеней ракет и уменьшают выигрыш за счет применения высокоэффективных топлив. В эти годы начался активный поиск новых способов управления вектором тяги. Казалось, что одним из наиболее эффективных способов является способ создания управляющего усилия путем вдува (впрыска) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла. Исследования этого способа активно и в больших объемах проводились как внутри страны, так и за рубежом. Подавляющее большинство этих исследований проводилось на моделях, значительно отличающихся от натуральных двигателей, и поэтому позволяют судить только о возможности создания поперечной составляющей тяги. Это обусловлено отсутствием данных по сложному и недостаточно изученному характеру взаимодействия сверхзвуковых потоков не только на криволинейных поверхностях, но и на плоскости.

В свое время автор принял активное участие по исследованию данного способа управления вектором тяги с целью получения обобщенной зависимости для определения поперечной составляющей тяги двигателя.

Опыты проводились на соплах, устанавливаемых на экспериментальных жидкостных и твердотопливных двигателях. Двигатели имели тягу по 1000 кг. Жидкостный ракетный двигатель работал на горючем ТМ-185

и окислителе АК-27И при давлении в камере сгорания, равном 31–32 атмосферы. В качестве рабочего тела вдува использовался газогенераторный газ, получаемый из горючего НДМГ и окислителя АК-27И. Эксперименты на твердотопливном двигателе, работающем на порохе НМЗ-13, проводились на тех же соплах, что и на ЖРД. В качестве рабочего тела вдува использовался газ, отбираемый из камеры сгорания двигателя, а в дополнительных опытах для этой цели использовался воздух. Результаты опытов позволили определить границы области возмущенного течения, которые определялись по отложению продуктов неполного сгорания топлива на стенках сопла РДТТ. Сравнительные данные, полученные в опытах на ЖРД и РДТТ, позволили понять характер формирования возмущенной зоны при взаимодействии сверхзвуковых потоков в сопле и оценить влияние возмущенной зоны на величину поперечной составляющей тяги двигателя.

Анализ имеющихся результатов отечественных и зарубежных исследований позволил установить, что наибольший удельный импульс поперечной силы достигается в сечении, площадь которого равна 3/4 площади выходного сечения сопла. Правильность этого вывода необходимо было подтвердить, обработав все имеющиеся результаты отечественных и зарубежных опытов, подобрав соответствующий критерий. Такой критерий был найден – это  $R_y^*/R_{y\max}^*$ , где  $R_y^* = P_y / m_{\text{вд}}^*$ ;  $P_y^*$  – относительная поперечная составляющая тяги двигателя;  $m_{\text{вд}}^*$  – относительный массовый расход вдуваемого газа;

$$P_y^* = P_y / P^\infty; m_{\text{вд}}^* = m_{\text{вд}} / m_{\text{ос}};$$

$P_y$  – поперечная составляющая тяги двигателя;

$P^\infty$  – тяги двигателя в пустоте при  $P_y = 0$ ;

$m_{\text{вд}}$  – массовый секундный расход вдуваемого газа;

$m_{\text{ос}}$  – массовый расход газа основного потока.

Этот критерий позволил объединить все имеющиеся данные отечественных и зарубежных опытов и подобрать эмпирическую формулу, позволяющую с до-

*Ермолаев Иван Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент МГУЛа.*



статочной точностью производить расчет управляющего усилия для ЖРД и РДТТ в зависимости от местоположения узла вдува на сопле, угла наклона стенки сопла к его оси, геометрических размеров сопла и параметров взаимодействующих потоков газа.

Данные зависимости относительного удельного импульса в сечении сопла, площадь которого равна 3/4 выходного сечения сопла при угле вдува  $\Psi=120^\circ$ , позволили аппроксимировать их эмпирической формулой

$$\frac{R_y^*}{R_{y \max}^*} = 1 - 2.4 \left( \frac{f_i}{f_a} - 0.75 \right)^2,$$

где  $f_i$  – площадь поперечного сечения сопла в потоке местоположения узла вдува;

$f_a$  – площадь выходного сечения сопла двигателя.

Данные, полученные по зависимости  $R_{y \max}^*$  при оптимальном местоположении узла вдува от угла наклона стенки сопла двигателя к его оси ( $\theta$ ), угла вдува ( $\Psi$ ) и параметров основного и вдуваемого потоков газа, позволили подобрать формулу для определения  $R_{y \max}^*$ :

$$R_{y \max}^* = (2 - e^{52\theta^4}) (1 + C_*^2) + \Psi/2 - 1,$$

где  $C_*$  – относительная характеристическая скорость

$$C_* = \left( \frac{p_{вд}}{p_k} \right) \left( \frac{f_{вд}}{f_{кр}} \right) \left( \frac{m_{ос}}{m_{вд}} \right);$$

$p_k$  – давление в камере сгорания двигателя;

$p_{вд}$  – давление газа на входе в сопло вдува;

$f_{вд}$  – площадь отверстия для вдува;

$f_{кр}$  – площадь критического сечения сопла двигателя;

$m_{ос}$  – массовый секундный расход основного потока газа;

$m_{вд}$  – массовый секундный расход вдуваемого газа.

Таким образом, расчетная формула для определения управляющего усилия при вдуве (впрыске) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла имеет следующий вид:

$$R_y^* = \left[ 1 - 2.4 \left( \frac{f_i}{f_a} - 0.75 \right)^2 \right] (2 - e^{52\theta^4}) (1 + C_*^2) + \frac{\Psi_{вд}}{2} - 1.$$

Других расчетных зависимостей управляющего усилия при вдуве (впрыске) рабочего тела в сверхзвуковую часть сопла к моменту получения данной формулы ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не встречалось.

Данная формула впервые была опубликована в 1971 г. в журнале «Оборонная техника» N1.

Материал поступил в редакцию 20. 03. 2008г.

УДК 621.371

© Омельчук А.В.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В БИОЛОГИЧЕСКИ ОПАСНОЙ ЗОНЕ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ РАДИОВОЛН ДЕЦИМЕТРОВОГО И САНТИМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНОВ

*Приводится методический аппарат расчета действующего значения электромагнитного поля с учетом свойств подстилающей поверхности при распространении радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов для определения биологически опасной зоны. Нормирование размеров биологически опасной зоны СВЧ излучений осуществляется исходя из значения напряженности электромагнитного поля и времени его воздействия в освещенной зоне.*

Определение действующего значения электромагнитного поля в биологически опасной зоне относится к классу задач, при котором высота поднятия передающей антенны  $h_1 > \lambda$ , где  $h_1$  – высота поднятия передающей антенны,  $\lambda$  – длина волны. В этом случае говорят о так называемых высокоподнятых антеннах, что на практике имеет место при распространении радиоволн дециметрового и сантиметрового диапазонов.

Область расстояний для расчета действующего

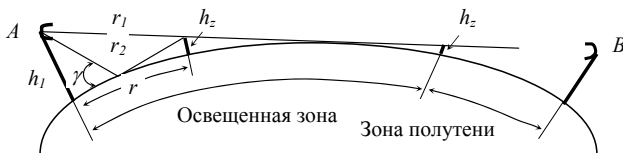


Рис.1. Определение освещенной зоны

значения электромагнитного поля в освещенной зоне при высокоподнятых антеннах определяется по соотношению между высотой поднятия антенны  $h$ , и расстоянием прямой видимости  $r$  до расчетной точки (рис. 1).

Определение поля в освещенной зоне проводится с учетом влияния земной поверхности, т.е. когда поле волны в расчетной точке представляется в виде суммы прямой волны напряженностью  $E_{np}$  и отраженной волны напряженностью  $E_{omp}$ :

$$E_{\Sigma} = E_{np} + E_{omp} \quad (1)$$

В свободном пространстве прямая волна распространяется по пути  $r_1$  (рис.1). Тогда действующее значение напряженности поля прямой волны в освещенной зоне определяется [1]:

$$E_{np} = E_{0np} \cdot \exp\left(-\frac{j(2\pi r_1)}{\lambda}\right) = \frac{\sqrt{30P_1 G_1}}{r_1} \exp\left(-\frac{j(2\pi r_1)}{\lambda}\right) \quad (2)$$

Отраженная волна, согласно отражательным свойствам земной поверхности, возбуждаясь зеркальным источником и распространяясь по пути  $r_2$ , создает в освещенной зоне напряженность поля

$$E_{omp} = E_{0omp} \cdot R \cdot \exp\left(-\frac{j(2\pi r_2)}{\lambda}\right) = \frac{\sqrt{30P_1 G_1}}{r_2} \exp\left(-\frac{j(2\pi r_2)}{\lambda} - j\Theta\right) \quad (3)$$

где  $R$  и  $\Theta$  – модуль и фаза коэффициента отражения от земной поверхности соответственно.

В общем виде коэффициент отражения от земной поверхности можно представить в виде

$$\dot{R} = \frac{\dot{E}_{omp}}{\dot{E}_{nao}} = R \cdot \exp(-j\Theta) \quad (4)$$

При падении волны на земную поверхность с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$  под углом  $\gamma$  коэффициент отражения  $R$  определяется [18, 79]: для волны горизонтальной поляризации

$$R_{\parallel} = \frac{\epsilon \sin \gamma - \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma}}{\epsilon \sin \gamma + \sqrt{\epsilon - \cos^2 \gamma}} = R_{\parallel} \exp(-j\Theta_{\parallel}), \quad (5a)$$

Омельчук Александр Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 4 ЦНИИ МО РФ.