

# МОДЕЛИ НЕШТАТНЫХ СИТУАЦИЙ В РАБОТЕ БОРТОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ: ЧАСТНЫЙ ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛЕЙ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ НАДЕЖНОСТИ ВЫВЕДЕНИЯ НА ОРБИТУ

Андриенко А.Я., Тропова Е.И.

*(Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им.В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

vladguc@ipu.rssi.ru, eltro@yandex.ru

*По результатам анализа статистики эксплуатационных замечаний к работе бортовой системы управления (типа СОБИС) ракеты-носителя (РН) «Союз-У» проведено атрибутирование стационарного потока аномалий в действии емкостных уровней, входящих в состав СОБИС. Построена модель возможных нештатных ситуаций при выведении РН, порождаемых этими аномалиями, и проведено оценивание их влияния на надежность выведения РН «Союз-У».*

## **Введение**

Тридцать пять лет назад (18 мая 1973г.) был произведен первый пуск трехступенчатой ракеты-носителя «Союз-У» (РН 11А511У) среднего класса [1], созданной в Филиале №3 ЦКБЭМ<sup>1</sup> на базе предыдущих вариантов Р-7А (таких, как РН 11А57 и 11А511). Эта ракета стала самым надежным в мире средством выведения полезных грузов (ПГ) на низкие орбиты – если судить по совокупности двух показателей: частоты успешных пусков (97,5%) и количества длительных (свыше 50 пусков) серий безотказных пусков (восемь серий).

В основе высокой надежности РН «Союз-У» (и ее модификаций) лежит, в частности, удачная организация работы эксплуатационных служб РКТ, позволившая выявлять и устра-

---

<sup>1</sup> Так до 1974г. назывался Самарский ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс».

нять многообразные причины возникновения аварийных ситуаций – в упреждающем порядке, по отдельным симптомам, проявляющимся на отдельных этапах жизненного цикла РН (этапах производства, хранения, предстартовой подготовки и пуска). Один из рядовых примеров такой работы, выполненной в 2004 – 2006гг. с участием Института проблем управления (ИПУ), приводится в данной публикации.

## **1. Атрибутирование эксплуатационных аномалий в работе ёмкостных уровнемеров топлива на борту РН**

В качестве системы управления расходом топлива (СУРТ) первых двух ступеней РН «Союз-У» (боковых и центрального блоков) используется система (имеющая аббревиатуру СОБИС), практически без изменений заимствованная из прототипных Р-7А. В состав этой системы входят ёмкостные чувствительные элементы (ч.э.) уровнемеров топлива (32 ч.э. в каждом баке каждого блока), фиксирующие моменты времени прохождения поверхностями компонентов топлива заданных пороговых уровней; по информации об этих моментах производится формирование управляющих сигналов СОБИС.

В процессе многолетней эксплуатации СОБИС проявились довольно частые аномалии в работе ее серийных приборов, нашедшие отражение во вполне представительной статистике замечаний к работе системы, сделанных по результатам пусков. По физической природе своих проявлений эти аномалии разделяются на две группы.

1. Регулярные аномалии (в 6,0% пусков) – многократно повторяющиеся (в многолетней истории запусков РН типа Р-7А), несмотря на принимавшиеся меры по их устранению, аномалии в работе уровнемеров СОБИС.
2. Эпизодические аномалии (в ~ 0,5% пусков) – весьма разнообразные, но неповторявшиеся (в частности, из-за введенных производственно–эксплуатационных мероприятий) аномалии в работе бортовых приборов и приводов системы.

По характеру воздействия на процессы управления расходом топлива (на процессы внутриблочного регулирования опорожнения баков и межблочной синхронизации опорожнения) можно выделить два типа регулярных аномалий.

**Тип 1.** Аномалии (несрабатывания чувствительных элементов уровнемеров, ложные сигналы на входе уровнемерных трактов), приводящие к возникновению дополнительных ошибок измерения положения уровней жидкостей и к отключению (алгоритмической защитой) уровнемерного канала либо четных, либо нечетных ч.э. Величина ложного сигнала  $\Delta t_i$  (по текущему временному рассогласованию объемов жидкостей), пропущенного в систему перед отключением уровнемерного канала, составляет по модулю  $4,0 \pm 1,5$ с на боковых и  $5,8 \pm 2$ с на центральном блоках РН.

**Тип 2.** Аномалии (ложные срабатывания и многократные подрабатывания ч.э.), приводящие к возникновению дополнительных ошибок измерения положения уровней жидкостей без отключения уровнемерных каналов. Ложный сигнал  $\Delta t_i$ , поступающий в систему при реализации таких аномалий, составляет по модулю  $2,0 \pm 1,5$ с.

И хотя проявившиеся аномалии в работе СОБИС никак не сказались в проведенных пусках на решения задач выведения ПГ на орбиты, регулярные ее составляющие (типа 1 и 2) следует считать симптомами возможного возникновения аварийных ситуаций на борту РН «Союз-У».

Для атрибутирования регулярных аномалий в работе уровнемеров использовались представленные ЦСКБ данные о замечаниях к работе СОБИС, сделанных с 1964 по 2004гг. Учитывая уникально большой (для ракетно-космической техники) объем статистики пусков РН типа Р-7А в эти годы, в качестве вероятностей  $P_1$  и  $P_2$  проявления аномалий типа 1 и 2 можно принять статистическую частоту реализаций аномалий в проведенных пусках:

$$P_1 = 3,6\%, \quad P_2 = 2,4\%.$$

Сопоставление «выборок» замечаний, относящихся к различным (достаточно продолжительным) периодам эксплуатации

СОБИС и анализ экспериментальных зависимостей частоты возникновения аномалий в работе ч.э. от номера  $i$  этого ч.э. позволили сделать важный вывод:

– эксплуатационные потоки регулярных аномалий типа 1 и 2 оказываются вполне стационарными (по времени эксплуатации СОБИС) с вероятностными распределениями  $p_1(i)$ ,  $p_2(i)$  равномерных аномалий (по чувствительным элементам), представленными в виде графиков на рис.1 и 2.

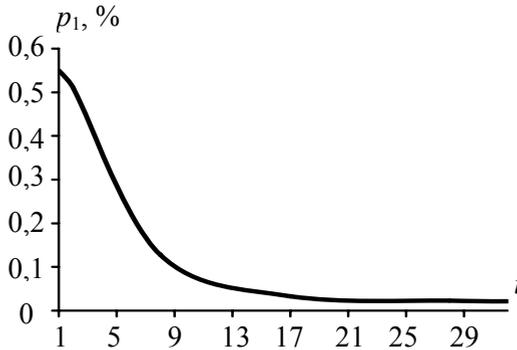


Рис. 1. Зависимость вероятности возникновения аномалии типа 1 от номера  $i$  ч.э. уровня СОБИС

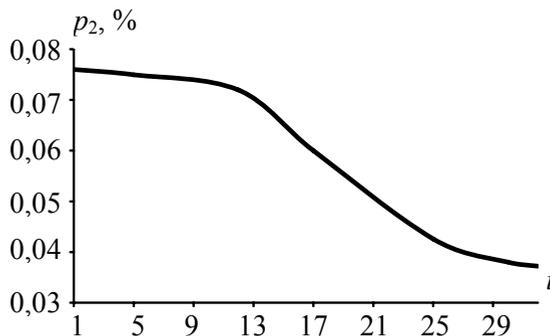


Рис. 2. Зависимость вероятности возникновения аномалии типа 2 от номера  $i$  ч.э. уровня СОБИС

## 2. Методика оценивания влияния аномалий в работе уровнемеров на точностные характеристики СОБИС и на надежность выведения РН

1. Для оценивания точностных характеристик СОБИС с учетом аномалий в работе ее бортовых приборов использовалась компьютерная программа статистического моделирования совместной работы СОБИС и системы регулирования кажущейся скорости (РКС). В состав этой программы были введены программные блоки, имитирующие, во-первых, возникновение дополнительных (внепроектных) возмущений на процесс управления из-за аномалий в работе уровнемеров, а во-вторых, действие релейно-логических средств защиты.

2. Непосредственно получить статистические оценки точности СОБИС при статистическом моделировании ее работы с использованием компьютерной программы (п.1) и с воспроизведением аномалий 1 и 2 (рис. 1 и 2) не представилось возможным. Дело в том, что для достижения удовлетворительной достоверности статистического оценивания точности СОБИС по методу Монте–Карло с имитацией как редких событий (типа возникновения аномалии 1 на  $i$ -ом,  $i > 20$ , ч.э. уровнемера с вероятностью 0,024% и проч. – см. рис.1), так и частых, необходимо при статистическом моделировании реализовать (рассчитать на ПЭВМ) не менее 100 тыс. процессов управления. Каждая реализация применительно к СОБИС требует использования около 300 случайных чисел, а статистическое моделирование – свыше 30 млн случайных чисел.

Сейчас не существует датчика (алгоритма формирования на ПЭВМ) псевдослучайных чисел, способного генерировать числовую последовательность (длиной свыше 10 млн чисел), удовлетворяющую обычным требованиям [2] к совокупности случайных чисел.

3. Положение, описанное в п.2, усугубляется при попытке непосредственного использования компьютерной программы (п.1) для определения вероятности  $p_{ав}$  возникновения аварийной ситуации на борту РН. Дело в том, что вероятностное распределение остатков топлива в баках ракеты при воздействии уров-

немерных аномалий на процессы управления расходом топлива заведомо отлично от нормального; если в качестве оценки вероятности  $p_{ав}$  принять частоту фиксируемых при моделировании случаев преждевременного (до набора заданного значения кажущейся скорости ступени РН) израсходования компонента топлива в каком-либо из баков, то для достижения необходимой точности (до 0,001%) оценивания  $p_{ав}$  следует на порядок (по сравнению с п.2) увеличить число  $S$  имитируемых пусков РН.

4. Поэтому использовался другой подход, предусматривающий выделение (из генеральной совокупности моделируемых процессов) трех групп выборок случайных процессов управления:

а) основная группа  $\Gamma_0$ , состоящая из одной выборки случайных процессов *штатного* управления расходом топлива ракетных блоков двух нижних ступеней РН – при отсутствии аномалий в работе приборов СОБИС; в результате моделирования процессов управления группы  $\Gamma_0$  определяются математическое ожидание  $m_0$  и среднее квадратическое значение  $\sigma_0$  каждой из регулируемых координат СОБИС;

б) первая группа  $\Gamma_1$ , составленная из  $I = 32$  выборок случайных процессов управления СОБИС, систематическим образом возмущаемых в каждой  $i$ -й ( $i=1,2,\dots,I$ ) выборке действием аномалий типа 1 на  $i$ -ом ч.э. уровнемера СОБИС; в результате моделирования процессов управления группы  $\Gamma_1$  определяются математические ожидания  $m_1(i)$ ,  $i=1,2,\dots,I$ , и среднее квадратическое значение  $\sigma_1(i)$ ,  $i=1,2,\dots,I$ , каждой из регулируемых координат СОБИС;

в) вторая группа  $\Gamma_2$ , отличающаяся от  $\Gamma_1$  тем, что в ней вместо аномалий типа 1 действуют аномалии типа 2.

В результате свертки

$$(1) \quad m = (1 - p_1 - p_2) m_0 + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{32} p_k(i) m_k(i) ,$$

$$(2) \quad \sigma = \sqrt{(1 - p_1 - p_2) \sigma_0^2 + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{32} p_k(i) \sigma_k^2(i) }$$

определяются – с учетом вероятностей  $p_1(i), p_2(i)$  возникновения аномалии на  $i$ -ом ч.э. (см. графики на рис.1 и 2) – точностные характеристики СОБИС в виде статистически предельных значений  $|m| + 3\sigma$  регулируемых координат СОБИС.

Объем каждой из выборок групп  $\Gamma_0, \Gamma_1, \Gamma_2$  может быть ограничен (без заметных потерь в точности оценивания  $m_k(i), \sigma_k(i)$ ) одной тысячей реализаций случайных процессов управления, формируемых с использованием одного итого же статистически корректного [2] набора 300 тыс. псевдослучайных чисел.

5. Каждая из выборок, входящих в состав групп  $\Gamma_1$  и  $\Gamma_2$ , обладает тем свойством, что ее выходные координаты (в частности, остатки компонентов топлива в момент выключения двигателей) с той же достоверностью, что и координаты выборки основной группы  $\Gamma_0$ , имеют гауссово-нормальное распределение вероятностей<sup>1</sup>. Поэтому вполне правомерно на основе оценивания первых двух вероятностных моментов остатков компонентов топлива и сопоставления их с гарантийными запасами топлива определять условные вероятности  $p_{ав.к}(i)$  преждевременного израсходования топлива в случаях проявления аномалии типа  $k$  ( $k=1,2$ ) на  $i$ -ом ч.э.,  $i=1,2,\dots,I$  (так же, как и вероятность  $p_{ав.0}$  преждевременного израсходования топлива при отсутствии аномалий в работе СОБИС).

Оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на борту РН, рассчитываемые по формуле

$$(3) \quad p_{ав} = (1 - p_1 - p_2) p_{ав.0} + \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^{32} p_k(i) p_{ав.к}(i)$$

для возможных вариантов эксплуатации РН и построения алгоритмической защиты СОБИС, позволяют проводить сопоставительный анализ этих вариантов.

---

<sup>1</sup> Однако объединение этих выборок – генеральная совокупность моделируемых (с учетом проявления аномалий в работе СОБИС) процессов управления – таким свойством не обладает.

### 3. Основные результаты оценивания влияния уровневых аномалий на точностные характеристики СОБИС и на надежность выведения РН

1. Статистическое моделирование работы серийных приборов СОБИС и РКС, проведенное на основе изложенной в разделе 3 методики, позволило установить, что статистически предельные значения  $|m| + 3\sigma$  регулируемых координат СОБИС при действии уровневых аномалий удовлетворяют требованиям ТЗ, предъявляемым к точностным характеристикам системы.

2. Малоаметное изменение точностных характеристик СОБИС при действии уровневых аномалий сопровождается, однако, вполне ощутимым возрастанием вероятности возникновения аварийной ситуации на борту РН – на  $\Delta p_{ав} = 0,090\%$ . Формально объясняется это тем, что уровневые аномалии мало сказываются на первых двух вероятностных моментах выходных координат СОБИС, но сильно деформируют нормальность распределения вероятностей этих координат.

3. По согласованию с ГосНИИП, осуществляющим совместно с ИПУ авторское сопровождение эксплуатации СОБИС, принято решение провести – при модернизации элементной базы бортовых приборов СОБИС – совершенствование алгоритмической защиты системы, так что потери в надежности выведения, вызванные уровневыми аномалиями, снизятся до  $\Delta p_{ав} = 0,032\%$ .

### ЛИТЕРАТУРА

1. ВАРФОЛОМЕЕВ Т. *Универсальный «Союз»* / Новости космонавтики, №12 (239), 2002. С. 48 – 49.
2. БУСЛЕНКО Н.П., Щрейдер Ю.А. *Метод статистических испытаний (Монте-Карло) и его реализация в цифровых машинах*. М.: Физматгиз, 1961, – 226с.