

УДК 629.7.017.1

ББК 39.62

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

Андриенко А. Я.¹, Тропова Е. И.²

(Учреждение Российской академии наук

*Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова
РАН, Москва)*

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 уровнемеров, 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».

Ключевые слова: бортовые системы управления, эксплуатационные аномалии, надёжность выведения.

1. Введение

Тридцать пять лет назад (18 мая 1973 г.) был произведен первый пуск трехступенчатой ракеты-носителя «Союз-У» (РН 11А511У) среднего класса [2], созданной в Филиале №3

¹ Анатолий Яковлевич Андриенко, заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор (vladguc@ipu.rssi.ru).

² Елена Ивановна Тропова, научный сотрудник (тел. (495) 334-88-71).

ЦКБЭМ¹ 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 устранять многообразные причины возникновения аварийных ситуаций в упреждающем порядке по отдельным симптомам, проявляющимся на отдельных этапах жизненного цикла РН: на этапах производства, хранения, предстартовой подготовки и пуска. Один из рядовых примеров такой работы, выполненной в 2004-2006 гг. с участием Института проблем управления (ИПУ), приводится в данной публикации.

2. Атрибутирование эксплуатационных аномалий в работе ёмкостных уровнемеров топлива на борту РН

В качестве системы управления расходом топлива (СУРТ) боковых и центрального блоков первых двух ступеней РН «Союз-У» 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,

¹ Так до 1974г. назывался Самарский ГНПРКЦ «ЦСКБ – Прогресс».

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.

Регулярные аномалии (в 6,0% пусков) – аномалии в работе уровнемеров СОБИС, многократно повторяющиеся в многолетней истории запусков РН типа Р-7А, несмотря на принимавшиеся меры по их устранению.

Эпизодические аномалии (в $\approx 0,5\%$ пусков) – весьма разнообразные, но неповторявшиеся, в частности, из-за проведенных производственно–эксплуатационных мероприятий, аномалии в работе бортовых приборов и приводов системы.

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

Тип 1. Такие аномалии, как несрабатывание 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 Δt_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. Такие аномалии, как ложные срабатывания и многократные подрабатывания ч.э., приводящие к возникновению дополнительных ошибок измерения положения уровней жидкостей без отключения уровнемерных каналов. Ложный сигнал Δt_i , поступающий в систему при реализации таких аномалий, составляет по модулю $2,0 \pm 1,5$ с.

И хотя в проведенных пусках проявившиеся в работе СОБИС аномалии никак не сказались на решениях 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 уровней использовались представленные ЦСКБ данные о замечаниях к работе СОБИС, сделанных с 1964 по 2004 г. 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:

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

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.

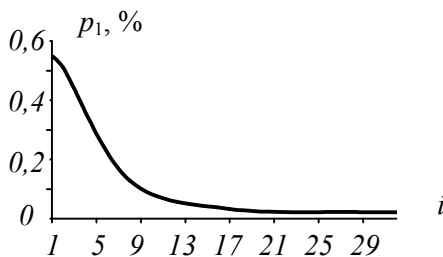


Рис. 1. Зависимость вероятности возникновения аномалии типа 1 от номера i ч.э. уровня СОБИС

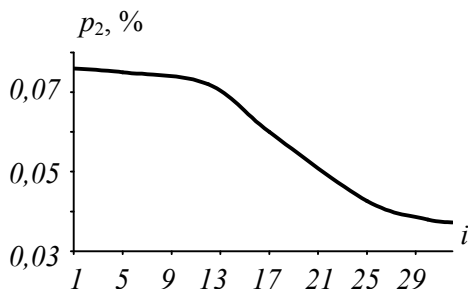


Рис. 2. Зависимость вероятности возникновения аномалии типа 2 от номера i ч.э. уровнемера СОБИС

3. 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, таких как возникновения аномалии типа 1 на i -ом ч.э. уровнемера ($i > 20$) с вероятностью 0,024% и проч. (см. рис. 1), так и частых,

необходимо при статистическом моделировании реализовать, т. е. 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.

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 равномерных 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 увеличить по сравнению с п. 2 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 Γ_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 Γ_0 определяются математическое ожидание m_0 и среднеквадратическое отклонение σ_0 каждой из регулируемых координат СОБИС;

б) первая группа Γ_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 Γ_1 определяются математические ожидания $m_1(i)$, $i = 1, 2, \dots, I$ и среднеквадрати-

ческие отклонения $\sigma_1(i)$, $i = 1, 2, \dots, I$, каждой из регулируемых координат СОБИС;

в) вторая группа Γ_2 , отличающаяся от Γ_1 тем, что в ней вместо аномалий типа 1 действуют аномалии типа 2.

В результате свертки

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

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

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

Объем каждой из используемых выборок групп Γ_0 , Γ_1 , Γ_2 может быть ограничен без заметных потерь в точности оценивания $m_k(i)$, $\sigma_k(i)$ одной тысячью реализаций случайных процессов управления, формируемых с использованием одного и того же статистически корректного [1] набора 300 тыс. псевдослучайных чисел.

Результаты статистического моделирования работы СОБИС для групп Γ_0 , Γ_1 , Γ_2 выборок случайных процессов управления представлены в таблице 1.

5. Каждая из выборок, входящих в состав групп Γ_1 и Γ_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 Γ_0 , имеют гауссово-нормальное распределение вероятностей¹. Поэтому вполне правомерно на основе оценивания статистически предельных значений остатков компонентов

¹ Однако объединение этих выборок – генеральная совокупность моделируемых с учетом проявления аномалий в работе СОБИС процессов управления – таким свойством не обладает.

топлива (см. таблицу 1) 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).

Таблица 1. Статистически предельное значение регулируемой координаты СОБИС

Регулируемая координата СОБИС	При отсутствии аномалий	При возникновении в каждом процессе регулирования аномалии из	
		группы 1	группы 2
Временное конечное рассогласование объёмов компонентов топлива, с	0,290	0,476	0,368
Временное конечное рассогласование объёмов окислителя бокового и центрального блоков, с	0,270	0,368	0,332
Относительное отклонение от номинала соотношения объёмных расходов компонентов топлива, %	6,94	8,38	7,90

Оценки вероятности возникновения аварийных ситуаций на борту РН, рассчитываемые для возможных вариантов эксплуатации РН и построения алгоритмической защиты СОБИС по формуле

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

позволяют проводить сопоставительный анализ этих вариантов.

4. Основные результаты оценивания влияния уровнемерных 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 уровнемерных аномалий удовлетворяют требованиям ТЗ, предъявляемым к точностным характеристикам системы.

2. Малозаметное изменение точностных характеристик СОБИС при действии уровнемерных аномалий сопровождается, однако, вполне ощутимым возрастанием вероятности возникновения аварийной ситуации на борту РН – на $\Delta p_{ав.} = 0,090\%$. Формально это объясняется тем, что уровнемерные 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 при модернизации элементной базы бортовых приборов СОБИС провести совершенствование алгоритмической защиты системы, так что потери в надежности выведения, вызванные уровнемерными аномалиями, снизятся до $\Delta p_{ав.} = 0,032\%$.

Литература

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

MODELS OF ABNORMAL SITUATIONS IN OPERATION OF ONBOARD CONTROL SYSTEMS: PRIVATE EXPERIENCE USING OF MODELS AT ESTIMATING OF THE LAUNCHING RELIABILITY.

Anatolii Andrienko, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Laboratory Head, Doctor of Science, professor (Moscow, Prof-soyuznaya st., 65, (495) 334-88-71, vladguc@ipu.rssi.ru).

Elena Tropova, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher ((495) 334-88-71).

Abstract: By results of the analysis statistics of operational remarks to work of the onboard control system launching vehicle "Soyuz-U" it is made specifying a stationary stream of anomalies in operation the capacitor level gauges, which are a part control system. The model of possible abnormal situations at launching generated by these anomalies is constructed. Estimation of their influence on the launching reliability is made.

Keywords: onboard control systems, operational anomalies, launching reliability.

Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р.Т. Сиразетдиновым