

## КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ ДРЕЙФА СТАРТОВОЙ ПЛАТФОРМЫ ВО ВРЕМЯ ПРЕДСТАРТОВОЙ ПОДГОТОВКИ РАКЕТЫ КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ «ЗЕНИТ-3SL»

При выполнении программы «Морской старт» после получения от разработчика системы управления ракетой космического назначения «Зенит-3SL» разрешения на пуск в условиях дрейфа стартовой платформы «Одиссей» от расчетной точки старта возникла задача контроля на сборочно-командном судне Sea Launch Commander параметров дрейфа (сноса) платформы. Для обеспечения точности выведения полезной нагрузки были установлены предельно допустимые значения параметров сноса платформы:

- максимальная скорость сноса – не более 0,32 м/с;
- максимальное ускорение сноса – не более  $\pm 0,05$  м/с<sup>2</sup>;
- максимальное расстояние сноса от расчетной точки старта – не более 1950 м.

В статье приведен алгоритм расчета параметров дрейфа платформы, позволяющий вычислить скорость и ускорение дрейфа, а также расстояние от расчетной точки старта до реальной точки нахождения платформы. Для расчета используются географические координаты – широта и долгота платформы по показаниям датчика GPS, установленного на платформе. Эти значения во время предстартовой подготовки ракеты космического назначения передаются на сборочно-командное судно на рабочую станцию расчета нагрузок в корневом сечении ракеты с частотой 1 раз в секунду. Во время одной из миссий была разработана и установлена на рабочей станции расчета нагрузок программа на языке C++, реализующая предложенный авторами алгоритм расчета. Эта программа в реальном масштабе времени выводила на монитор компьютера контролируемые параметры сноса платформы, а также осуществляла их допусковый контроль. В этой же миссии корректность разработанного алгоритма и правильность работы программы были подтверждены при выполнении специального эксперимента по дрейфу стартовой платформы в точке старта. В дальнейшем они были использованы при проведении последующих миссий.

**Ключевые слова:** Морской старт, широта, долгота, алгоритм, скорость, ускорение.

Під час виконання програми «Морський старт» після одержання від розробника системи керування ракети космічного призначення «Зеніт-3SL» дозволу на пуск в умовах дрейфу стартової платформи «Одіссей» від розрахункової точки старту постало завдання контролювати на складально-командному судні Sea Launch Commander параметри дрейфу (знесення) платформи. Щоб забезпечити точність виведення корисного навантаження було встановлено гранично-допустимі значення параметрів знесення платформи:

- максимальна швидкість знесення – не більше 0,32 м/с;
- максимальне прискорення знесення – не більше  $\pm 0,05$  м/с<sup>2</sup>;
- максимальна відстань знесення від розрахункової точки старту – не більше 1950 м.

У статті наведено алгоритм розрахування параметрів дрейфу платформи, що дає змогу обчислити швидкість і прискорення дрейфу, а також відстань від розрахункової точки старту до реальної точки розміщення платформи. Для розрахунку використано географічні координати – широту і довготу платформи за показаннями датчика GPS, встановленого на платформі. Ці значення під час передстартової підготовки ракети космічного призначення передають на складально-командне судно на робочу станцію розрахунку навантажень у кореневому перерізі ракети з частотою 1 раз за секунду. Під час однієї з місій було розроблено й встановлено на робочій станції розрахунку навантажень програму мовою C++, що реалізувала алгоритм розрахунку, який запропонували автори. Ця програма у реальному масштабі часу виводила на монітор комп'ютера контрольовані параметри знесення платформи, а також здійснювала їх допусковий контроль. У цій же місії коректність розробленого алгоритму і правильність роботи програми було підтверджено під час виконання спеціального експерименту щодо дрейфу стартової платформи в точці старту. Далі їх було використано під час проведення наступних місій.

**Ключові слова:** Морський старт, широта, довгота, алгоритм, швидкість, прискорення.

Under the Sea Launch program when developer of the Zenit-3SL ILV control system issued the permission to launch in the conditions of drift from the design launch point of the Odyssey launch platform, the problem of drift parameters monitoring at the Sea Launch Commander ACS appeared.

To ensure the payload orbiting accuracy the following maximum permissible values of platform drift parameters were determined:

– maximum velocity of platform drift – no more than 0,32 m/s;

– maximum acceleration of platform drift – no more than  $\pm 0,05 \text{ m/s}^2$ ;

– maximum distance of platform drift from design launch point – no more than 1950 m.

The article includes the computation algorithm of the platform drift parameters to calculate velocity and acceleration of the drift, as well as distance from the design launch point to the actual point of the platform location.

Geographical coordinates - latitude and longitude of the platform according to the GPS sensor, installed on the platform – are used for calculations.

These values during prelaunch processing of the ILV are transmitted to the assembly and command ship's workstation for calculation of loads in the ILV root section at the rate of once in a second.

During one of the Sea Launch missions, C++ program was developed and installed on the loads calculation workstation, realizing the computation algorithm offered by the authors of this article.

This program displayed in real time the monitored parameters of the platform drift, and monitored the tolerable limits.

During the same mission, the correctness of the developed algorithm and program were confirmed during the special experiment on the launch platform drift in the launch point.

In future, they were used during the subsequent missions of the Sea Launch program.

**Keywords:** Sea Launch, latitude, longitude, algorithm, velocity, acceleration.

## Введение

Пуск ракеты космического назначения «Зенит-3SL» по программе «Морской старт» проводится со стартовой платформы (СП) «Одиссей», а управление всеми операциями по предстартовой подготовке и пуску ракеты осуществляется со сборочно-командного судна (СКС) Sea Launch Commander. Для обеспечения безопасности персонала СКС в момент пуска находится на расстоянии ~6 км от СП. Для этой же цели за три часа до пуска выполняется эвакуация всего личного состава СП, включая капитана. Заправка ракеты компонентами топлива и другие операции предстартовой подготовки выполняются полностью автоматически по командам, выдаваемым специальной циклограммой из помещения 1 на СКС.

Платформа в момент старта должна находиться в заданной точке Тихого океана с координатами  $0^\circ$  с. ш. (т. е. на экваторе) и  $154^\circ$  з. д. Эти начальные условия занесены в бортовой компьютер системы управления РКН и используются в алгоритмах управления полетом ракеты.

Для обеспечения корректной работы алгоритмов управления разработчик системы управления РКН «Зенит-3SL» поставил жесткое условие: отклонение положения стартового стола СП от расчетной точки старта не должно превышать 50 м.

Обычно, несмотря на сильные морские течения в точке старта, азимутальные двигатели платформы удерживали ее в точке с заданными координатами. Но в некоторых миссиях скорость течения была так велика, что платформа с установленной на ней и готовой к пуску ракетой сносилась течением и начинала дрейфовать, уходя из точки старта. В таких случаях дата пуска переносилась в ожидании более благоприятных условий. А в 2007 г. одна из миссий после 17 дней пребывания платформы в точке старта из-за сильного течения завершилась возвратом в Базовый порт без выполнения пуска.

После этого случая разработчик системы управления доработал алгоритмы управления РКН и разрешил выполнение пуска при наличии дрейфа (сноса) платформы. Однако для обеспечения точности выведения полезной нагрузки им были установлены предельно допустимые параметры сноса СП:

1) максимальное значение скорости сноса СП – не более 0,32 м/с;

2) максимальное ускорение сноса СП – не более  $\pm 0,05 \text{ м/с}^2$ ;

3) максимальное расстояние сноса СП от расчетной точки старта – не более 1950 м.

Если хотя бы одно из условий (1–3) не выполняется, пуск должен быть отменен.

В этих условиях стала актуальной задача контроля параметров сноса стартовой платформы при проведении предстартовой подготовки (ПСП) РКН «Зенит-3SL».

## Постановка задачи

Во время ПСП некоторые результаты измерений параметров СП (углы крена, дифферента и др.) в автоматическом режиме по радиотракту передаются на СКС с частотой 1 раз в секунду. В передаваемом пакете присутствуют время по GMT (Greenwich Mean Time) и географические координаты СП (широта и долгота), измеряемые датчиком GPS, установленным на платформе.

Для проверки выполнения условий (1–3) требуется в реальном масштабе времени определять следующие значения параметров сноса СП:

$S$  – расстояние от реальной точки нахождения СП до расчетной точки старта, м;

$V$  – скорость сноса СП, м/с;

$U$  – ускорение сноса СП, м/с<sup>2</sup>.

Для вычисления указанных параметров с использованием географических координат СП по показаниям датчика GPS был разработан алгоритм расчета и была написана программа на языке C++ для его осуществления.

### Алгоритм расчета

Расчет параметров сноса СП будем выполнять для заданного произвольного временного интервала  $\Delta t$ .

1. Величина сноса СП  $S$  за время этого интервала рассчитывается по формуле

$$S = \sqrt{(\Delta\text{Ш})^2 + (\Delta\text{Д})^2}, \quad (1)$$

где  $\Delta\text{Ш} = (\text{Ш}_2 - \text{Ш}_1) \times K_1$  – изменение координат СП по широте за интервал времени  $\Delta t$ , м;

$\text{Ш}_1$  и  $\text{Ш}_2$  – широта СП в начале и конце интервала  $\Delta t$ , град;

$\Delta\text{Д} = (\text{Д}_2 - \text{Д}_1) \times K_2$  – изменение координат СП по долготе за интервал времени  $\Delta t$ , м;

$\text{Д}_1$  и  $\text{Д}_2$  – долгота СП в начале и конце интервала  $\Delta t$ , град.

Значения широты и долготы СП берутся из показаний датчика GPS, передаваемых на СКС непрерывно с частотой 1 раз в секунду.

Коэффициенты  $K_1$  и  $K_2$ , определяющие длину дуги в 1 град соответственно меридиана и экватора, рассчитывают по известным длинам меридиана и экватора:

$$K_1 = \frac{40008550}{360} = 111134,9 \text{ м/град};$$

$$K_2 = \frac{40075696}{360} = 111321,4 \text{ м/град}.$$

2. Скорость сноса СП  $V$  определяется по формуле

$$V = \frac{S}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $S$  – величина сноса СП, м;

$\Delta t$  – заданный временной интервал, с.

3. Для вычисления ускорения сноса СП разобьем заданный интервал  $\Delta t$  на десять равных подынтервалов.

Тогда ускорение сноса СП на отдельном подынтервале можно определять по формуле

$$U = \frac{\Delta V}{dt}, \quad (3)$$

где  $\Delta V$  – изменение скорости на подынтервале, м/с;  $dt$  – длина подынтервала, с.

На границах каждого подынтервала определим текущую скорость сноса по формуле (2) и получим значения  $V_0, V_1, \dots, V_{10}$ .

Найдем значения изменения скорости на отдельных подынтервалах:

$$\Delta V_1 = V_1 - V_0, \quad \Delta V_2 = V_2 - V_1, \dots,$$

$$\Delta V_{10} = V_{10} - V_9.$$

По формуле (3) вычислим ускорение сноса СП для каждого подынтервала и получим значения  $U_1, U_2, \dots, U_{10}$ .

Тогда среднее ускорение сноса СП на интервале  $\Delta t$

$$U = \frac{\sum_{i=1}^{10} |U_i|}{10}. \quad (4)$$

### Организация контроля параметров сноса СП

Программа расчета параметров сноса СП, реализующая приведенный выше алгоритм, была установлена на рабочей станции расчета нагрузок (РС РН) в помещении 18 СКС, в которую при пуске передаются пакеты с информацией с платформы.

Значение временного интервала для работы программы обычно составляло 10 – 15 мин (600 – 900 с).

Результаты расчета в реальном масштабе времени поступления информации с платформы программа выводила на монитор рабочей станции в окно, вид которого приведен на рис. 1.

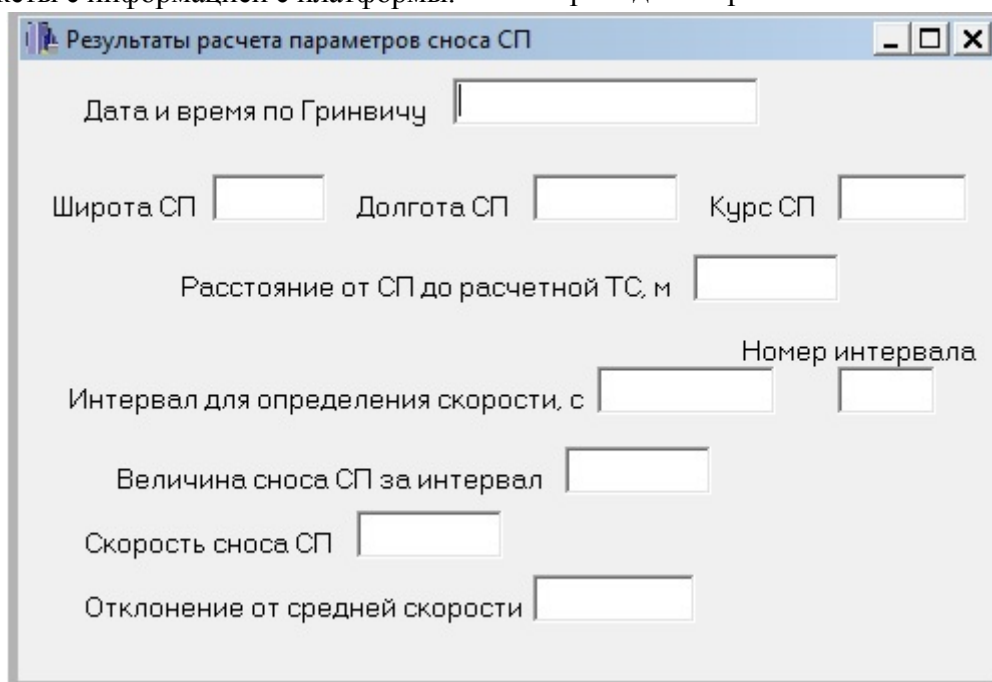


Рис. 1. Окно программы расчета параметров сноса СП

Верхние поля в этом окне заносились с частотой 1 раз в секунду по мере поступления информации с платформы, а нижние три поля заполнялись по достижении конца заданного временного интервала (1 раз в 10 – 15 мин).

В случае нарушения выполнения условий (1–3) для любого из трех контролируемых параметров  $S$ ,  $V$  и  $U$  на монитор РС дополнительно выводились соответствующие сообщения красным цветом:

- «Скорость сноса СП  $> 0,32$  м/с»;
- «Ускорение сноса СП  $> 0,05$  м/с<sup>2</sup>»;
- «Расстояние от СП до расчетной ТС  $> 1950$  м».

### Контроль правильности работы программы

Для проверки корректности разработанного алгоритма и работы программы на одной из миссий после успешного пуска в точке старта был проведен специальный эксперимент.

Эксперимент заключался в том, что капитан СП периодически уменьшал мощность азимутальных двигателей, позволяя платформе какое-то время дрейфовать по течению, а затем увеличивал мощность и прекращал дрейф. И так несколько раз в течение часа.

На капитанском мостике СП по приборам морского сегмента фиксировалась скорость сноса (дрейфа) СП. Одновременно на РС РН штатно передавалась информация с платформы, в том числе и географические координаты СП по датчику GPS, которые использовались разработанной программой.

Программа расчета параметров сноса СП помимо вывода на монитор РС РН записывает результаты своих расчетов в текстовый файл-протокол. При выполнении эксперимента был выдан протокол, приведенный на рис. 2.

**Результаты обработки параметров сноса СП при ПСП**

- 1 - Дата GPS - Время GPS (по Гринвичу)
- 2 - Расстояние от СП до расчетной ТС
- 3 - Величина сноса СП на конец временного интервала
- 4 - Средняя скорость сноса на текущем интервале
- 5 - Отклонение от средней скорости на текущем интервале

1	2	3	4	5
01-16-2008_00:56:49.100	0.0			
	0.101	0.101		
	0.064	-0.037		
	0.043	-0.021		
	0.053	0.010		
	0.075	0.023		
	0.028	-0.048		
	0.019	-0.009		
	0.000	-0.020		
	0.000	0.000		
	0.020	0.020		
01-16-2008_01:12:34.800	271.7 м	16.5 м	0.02 м/с	0.029 м/с
	0.000	-0.020		
	0.000	0.000		
	0.069	0.069		
	0.074	0.005		
	0.085	0.011		
	0.094	0.009		
	0.077	-0.016		
	0.056	-0.021		
	0.131	0.075		
	0.150	0.019		
01-16-2008_01:28:00.600	339.2 м	67.5 м	0.07 м/с	0.024 м/с
	0.174	0.024		
	0.168	-0.006		
	0.175	0.006		
	0.136	-0.039		
	0.188	0.052		
	0.210	0.022		
	0.249	0.039		
	0.220	-0.029		
	0.265	0.045		
	0.263	-0.002		
01-16-2008_01:43:20.000	527.7 м	188.5 м	0.20 м/с	0.026 м/с
	0.247	-0.016		
	0.247	0.000		
	0.310	0.062		
	0.325	0.015		
	0.343	0.018		
	0.342	-0.002		
	0.306	-0.035		
	0.360	0.054		
	0.326	-0.034		
	0.342	0.015		

Рис. 2. Файл-протокол программы расчета параметров сноса СП

Рассчитанные значения скорости сноса СП из этого протокола были использованы для построения графика в программе Excel. Для этого же временного интервала был построен график со значениями скорости движения СП, измеренными прибо-

рами капитанского мостика. Для сравнения полученных программой результатов с непосредственными измерениями скорости был построен совместный график, показанный на рис. 3.



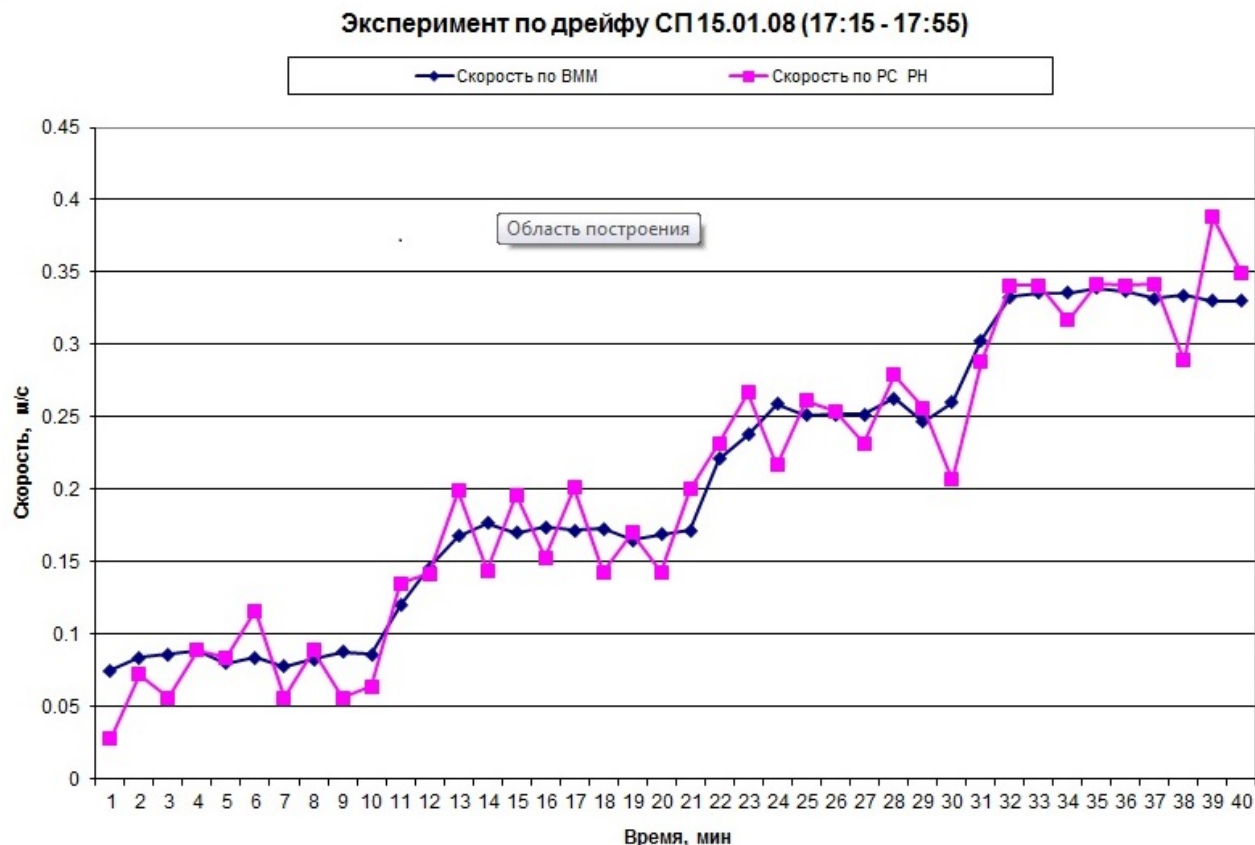


Рис. 3. Совместный график измеренных и рассчитанных значений скорости дрейфа СП (скорость по ВММ, измеренная на платформе, скорость по РС РН, рассчитанная на СКС)

График показал приемлемое совпадение расчетных и измеренных значений скорости дрейфа СП.

После эксперимента руководство ракетного сегмента программы «Морской старт» утвердило предложенный в статье алгоритм и результаты работы программы.

В процессе подготовки к следующей миссии для работы программы расчета параметров сноса СП был установлен отдельный компьютер на капитанском мостике сборочно-командного судна.

### Выводы

В программе «Морской старт» после получения от разработчика системы управления РКН «Зенит-3SL» разрешения на пуск в условиях дрейфа платформы от расчетной точки старта возникла задача допускового контроля на СКС параметров сноса СП.

В статье приведен алгоритм расчета параметров сноса СП, использующий передаваемые с платформы географические координаты СП, измеряемые датчиком GPS. Для его реализации была разработана программа на языке C++. Программа работала на рабочей станции расчета нагрузок на СКС, в которую при ПСП передается информация с платформы.

Корректность разработанного алгоритма и правильность работы программы были подтверждены при проведении специального эксперимента по дрейфу стартовой платформы в точке старта. В дальнейшем они были использованы при проведении последующих миссий.

Это позволило контролировать на СКС параметры сноса СП и не переносить сроки пуска даже при наличии дрейфа платформы во время предстартовой подготовки РКН.

Статья поступила 31.01.2019