

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ТОЛКАТЕЛЕЙ СИСТЕМЫ ОТДЕЛЕНИЯ ДЛЯ МИНИМИЗАЦИИ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

OPTIMIZATION OF SEPARATION SYSTEM'S PUSHERS FOR SPACECRAFT ANGULAR VELOCITY MINIMIZATION

А. А. ГРИНЕВ, Л. И. ЕРЁМИН

АО «Корпорация «ВНИИЭМ», Москва, Россия

A. A. Grinev, L. I. Eremin

JSC "VNIIEM Corporation", Moscow, Russia

Аннотация. Отделение космического аппарата от ракеты-носителя является важным этапом любой космической миссии. Смещение центра масс относительно точки приложения равнодействующей силы исполнительных механизмов (толкателей), а также различия в их реальных параметрах вызывает закручивание аппарата. Статья посвящена моделированию задачи отделения космического аппарата. Разработана и реализована комплексная математическая модель процесса отделения с применением программных комплексов *MSC.Adams* и *Matlab*. Решена задача оптимизации характеристик толкателей по критерию минимальной угловой скорости космического аппарата, подобраны параметры оптимизационного решателя. В ходе исследования проведен сравнительный анализ эффективности работы оптимизационного SQP-алгоритма в двух программных средах, а также подобраны его оптимальные параметры. Результаты моделирования подтвердили, что несимметричная настройка толкателей позволяет существенно снизить нежелательные угловые скорости, обеспечивая требуемую точность и безопасность вывода космического аппарата на орбиту.

Ключевые слова: космический аппарат, отделение, оптимизация, угловая скорость, толкатели.

Для цитирования: Гринев А. А., Ерёмин Л. И. Решение задачи оптимизации характеристик толкателей системы отделения для минимизации угловой скорости космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2026. Т. 211. № 2. С. 22–28.

Annotation. Spacecraft separation from the launch vehicle is a critical phase of any space mission. Shift of the center of mass relative to the actuators (pushers) resultant forces application point, as well as differences in their actual parameters, can cause the spacecraft to spin. This article focuses on the modeling of the spacecraft separation process. A comprehensive mathematical model of the separation process has been developed and implemented using the *MSC.Adams* and *Matlab* software packages. The problem of optimizing pusher properties to minimize the spacecraft's angular velocity has been solved, and the parameters of the optimization solver have been selected. The study includes a comparative analysis of the performance of the SQP algorithm in two software environments, along with the selection of its optimal parameters. The simulation results confirm that asymmetric adjustment of the pushers can significantly reduce undesirable angular velocities, therefore ensuring the required accuracy and safety of spacecraft orbital separation.

Key words: spacecraft, separation, optimization, angular velocity, pushers.

For citation: Grinev A. A., Eremin L. I. Optimization of separation system's pushers for spacecraft angular velocity minimization // Electro-mechanical matters. VNIIEM studies. 2026. Vol. 211. № 2. P. 22–28.

Введение

Безопасное и предсказуемое отделение космического аппарата (КА) от ракеты-носителя является одним из ключевых этапов вывода КА на целевую орбиту, в особенности при одновременном отделении группы КА. Нежелательные угловые скорости, возникающие в процессе отделения, могут привести к отклонению от заданной траектории, усложнить последующие маневры или привести к соударению отделяемых КА между собой [1, 2]. Толкатели, являясь активными элементами системы отделения, оказывают непосредственное влияние на динамику процесса отделения и способны как обеспечивать КА необходимую линейную скорость, так и создавать нежелательные компоненты угловых скоростей, связанных со смещением центра масс КА относительно точки приложения равнодействующей силы толкателей, разбросом их параметров и

параметрами их настройки. Эффективная настройка толкателей и выбор их расположения критически важны для достижения требуемой точности углового и линейного движений аппарата после отделения.

В работе проанализированы основные факторы, влияющие на угловую скорость при отделении, сформирована математическая модель процесса отделения, а также предложены подходы к решению задачи оптимизации. В качестве целевой функции выбрана магнитуа угловой скорости, задача сформулирована как задача минимизации, где минимально допустимое значение линейной скорости выступает в качестве ограничения.

Описание задачи

Основной способ снижения угловых скоростей – это несимметричная настройка толкателей, для компенсации момента, вызванного смещением центра

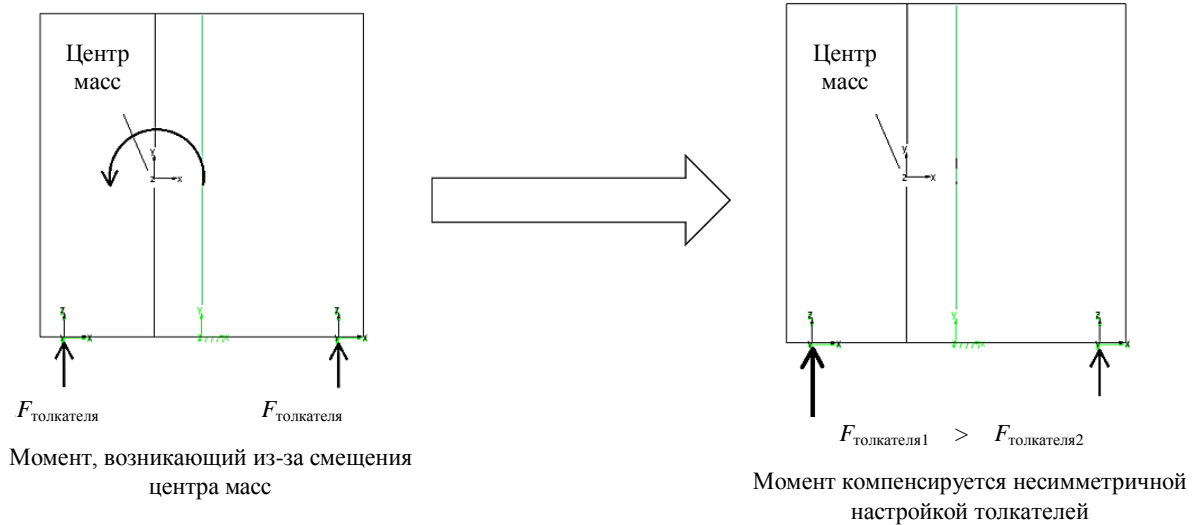


Рис. 1. Компенсация момента, возникающего из-за смещения центра масс

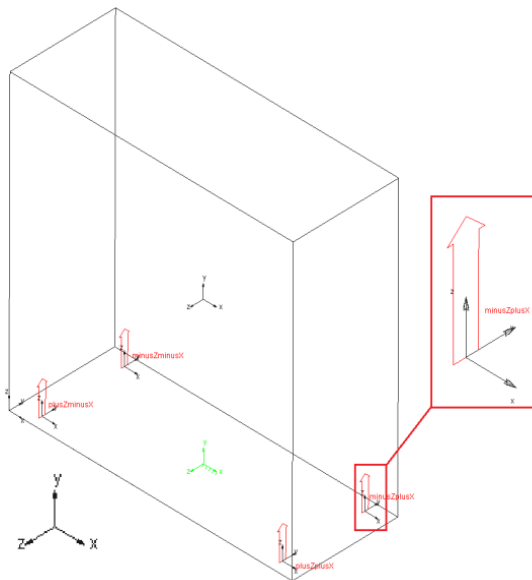


Рис. 2. Модель отделения космического аппарата в *MSC.Adams*

масс (ЦМ) КА (рис. 1). Для достижения максимально возможной линейной скорости КА необходимо максимальное использование потенциальной энергии пружин толкателей, а для снижения угловых скоростей – уменьшение хода некоторых из них, что напротив снижает общую потенциальную энергию комплекта.

Физически толкатели системы отделения представляют собой пружинные механизмы [3]. Пружина имеет конструктивно ограниченные величины максимального и минимального хода, а также величину остаточной деформации. Характеристики пружин при этом имеют некоторый разброс.

На этапе наземной отработки КА производится несколько расчётов. Сначала с номинальными значениями толкателей, а затем с реальными, измеренными во время испытаний. Настройка толкателей заключается в поиске оптимального хода каждого из толкателей. Стоит отметить, что для обеспечения максимально возможной линейной скорости как минимум один из толкателей настраивается на максимальную величину хода. Вышеописанный подход применим к любому КА, использующему аналогичную систему отделения и аналогичный принцип работы толкателей.

Модели в *MSC.Adams* и *Matlab*

Математическое моделирование процесса отделения осуществляется в программном комплексе (ПК) *MSC.Adams*. Моделирование позволяет подробно проследить процесс отделения: длительность процесса, изменение в ходе процесса компонент как линейных, так и угловых скоростей. В модели *MSC.Adams* [4] космический аппарат рассматривается как твердое тело с заданными массо-инерционными характеристиками, на которое действуют силы со стороны каждого толкателя с учётом их фактических параметров. На рис. 2 показана модель отделения КА в *MSC.Adams*.

Помимо моделирования в ПК *MSC.Adams* рассмотрено также аналитическое решение для отделения данного КА, реализованное в *Matlab*. Задача описывается системой из трех дифференциальных уравнений движения (1): двумя уравнениями относительно крутильных степеней свободы и одним уравнением относительно линейной [5]. Исполь-

зюемые в уравнениях обозначения проиллюстрированы на рис. 3.

$$\begin{cases} m\ddot{y} = F_{\rho x \rho z} + F_{m x \rho z} + F_{\rho x m z} + F_{m x m z}; \\ I_z \ddot{\phi}_z = R_{\rho x} (F_{\rho x \rho z} + F_{\rho x m z}) + R_{m x} (F_{m x \rho z} + F_{m x m z}); \\ I_x \ddot{\phi}_x = R_{\rho z} (F_{\rho x \rho z} + F_{m x \rho z}) + R_{m z} (F_{\rho x m z} + F_{m x m z}), \end{cases}$$

$$\text{где } F_{\rho x \rho z} = c_{\rho x \rho z} (x_{0 \rho x \rho z} + h_{\rho x \rho z} - (y + R_{\rho x} \tan \phi_z + R_{\rho z} \tan \phi_x));$$

$$F_{\rho x m z} = c_{\rho x m z} (x_{0 \rho x m z} + h_{\rho x m z} - (y + R_{\rho x} \tan \phi_z + R_{m z} \tan \phi_x));$$

$$F_{m x \rho z} = c_{m x \rho z} (x_{0 m x \rho z} + h_{m x \rho z} - (y + R_{m x} \tan \phi_z + R_{\rho z} \tan \phi_x));$$

$$F_{m x m z} = c_{m x m z} (x_{0 m x m z} + h_{m x m z} - (y + R_{m x} \tan \phi_z + R_{m z} \tan \phi_x)),$$

где m – масса КА; c – жёсткость пружины толкателя; x_0 – перемещение, соответствующее пластической деформации пружины толкателя; h – ход толкателя (регулируемая величина); R – расстояние от центра масс до точки расположения толкателя по соответствующей оси.

На построенных моделях был проведён детальный сравнительный анализ их поведения (рис. 4). В предварительном расчёте (до оптимизации) предполагается, что все толкатели имеют максимально возможный ход. Как можно заметить, графики линейной и угловой скоростей для расчетов по двум моделям практически совпадают, что подтверждает корректность решения.

Полученные значения скоростей сравниваются с заданными допустимыми значениями для данного КА: минимальная допустимая линейная скорость после отделения составляет 0,5 м/с, а угловая не должна превышать значения в 2°/с. Как видно из рис. 4, при неоптимизированных настройках толкателей требование выполняется только по линейной скорости.

Выбор параметров оптимизационного алгоритма

Для решения оптимизационной задачи выберем целевую функцию, в нашем случае – это норма вектора угловой скорости в конце симуляции. Минимизация её значения и будет являться оптимизационной задачей. Четыре величины ходов толкателей с определёнными диапазонами будут управляемыми переменными.

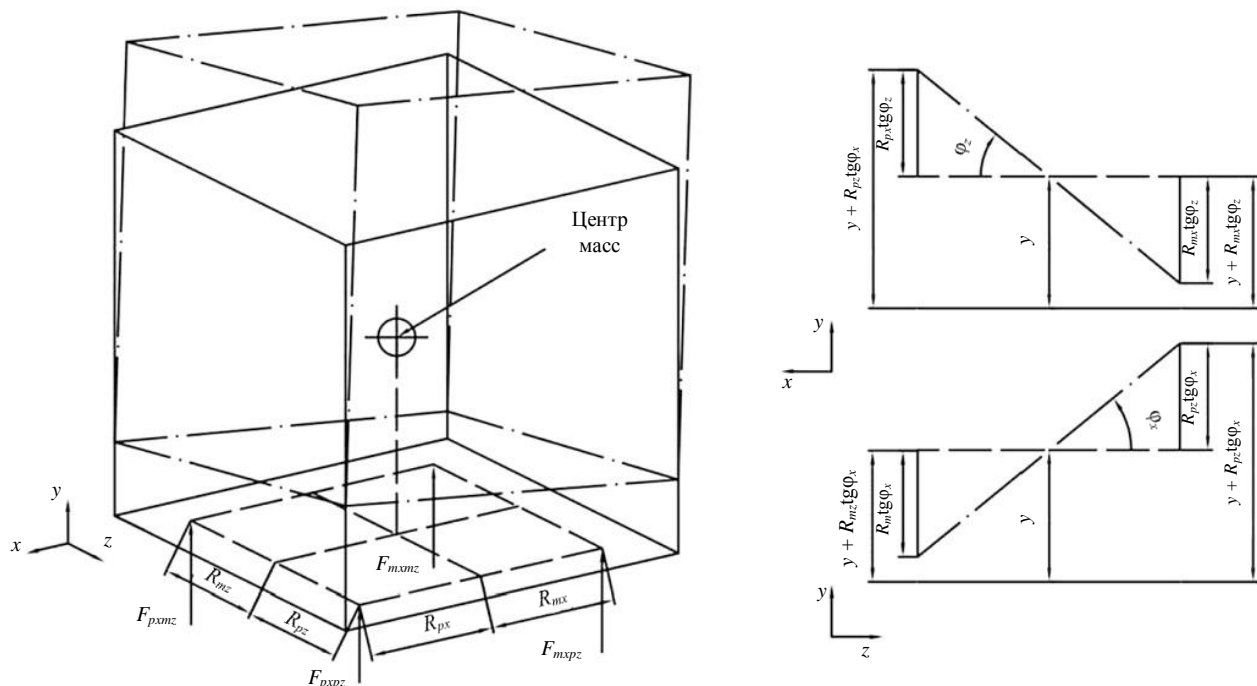


Рис. 3. К формированию системы дифференциальных уравнений аналитического решения для отделения космического аппарата

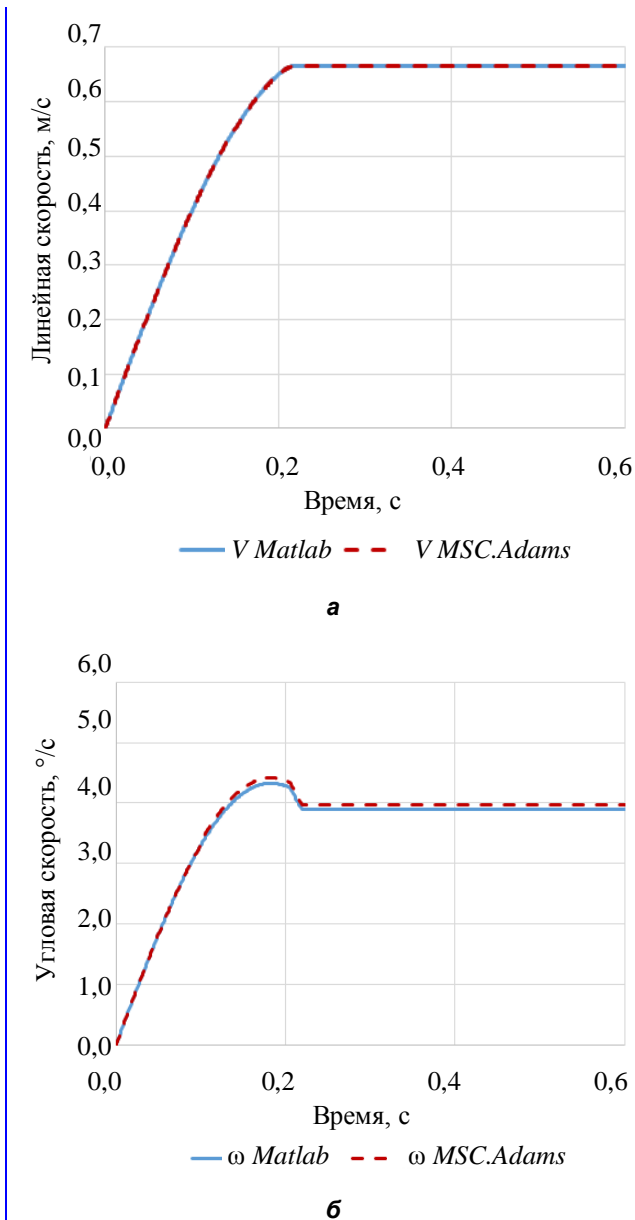


Рис. 4. Графики линейной (а) и угловой (б) скоростей до оптимизации

Один из наиболее распространённых оптимизационных алгоритмов – SQP-алгоритм (*Sequential Quadratic Programming*). Он широко применяется для решения задач нелинейной оптимизации. Алгоритм итеративно аппроксимирует исходную сложную задачу более простыми задачами квадратичного программирования, пока не найдет оптимальное решение, обрабатывая как нелинейные целевые функции, так и ограничения [6]. Алгоритм реализован в обоих ПК и для наиболее достоверного моделирования была проведена серия экспериментов с вариациями параметров оптимизатора.

Была проведена серия экспериментов с варьированием каждого из этих параметров с целью определе-

ния комбинации параметров, обеспечивающих минимальную конечную угловую скорость аппарата (скорость, к которой сходится задача при минимизации) и минимальное время работы программы.

На рис. 5 (а, б) показаны зависимости длительности расчета от параметров оптимизационного решателя. На рис. 5 (в, г) показаны зависимости минимизированной угловой скорости от параметров оптимизационного решателя.

Оптимизация с использованием данного алгоритма связана с двумя основными параметрами решателя. *StepTolerance* (допуск по шагу) – нижняя граница размера шага, если решатель пытается сделать шаг, меньший, чем значение *StepTolerance*, итерации прекращаются. *MaxFunctionEvaluations* (максимум вычислений функции) – ограничение на количество вычислений функции [7].

По результатам серии расчетов можно заключить, что *MSC.Adams* в целом решает оптимизационную задачу быстрее и точнее.

Например, при параметрах *MaxFunctionEvaluations* = 10 и *StepTolerance* = $1 \cdot 10^{-2}$, *Matlab* оптимизирует угловую скорость к значению в 1,62 %/с, что, хоть и не превышает допустимую угловую скорость, свидетельствует о численной погрешности оптимизатора. Ужесточение параметров решателя сводит угловую скорость практически к нулевой, однако время оптимизации в таком случае увеличивается в несколько раз.

В *MSC.Adams* наблюдается более предсказуемая зависимость результата решения от параметров оптимизатора: уточнение параметров решателя ведёт к увеличению затрачиваемого времени оптимизации и более точному значению конечной угловой скорости. Так, например, уже при самых грубых параметрах *MaxFunctionEvaluations* и *StepTolerance*, *MSC.Adams* сводит угловую скорость к значению 0,17 %/с за 5,31 секунды. Самые точные параметры оптимизируют угловую скорость до околонулевого (в контексте данной задачи будем считать околонулевыми значения угловой скорости меньше 0,01 %/с) значения за 10,21 секунды.

Таким образом, оптимальные параметры SQP-алгоритма для обоих случаев оказались: *StepTolerance* = $1 \cdot 10^{-3}$ и *MaxFunctionEvaluations* = 100 или 1000.

При этих параметрах достигается практически нулевая угловая скорость при наиболее коротком времени расчёта. Различие в конечных значениях угловых скоростей и времени оптимизации обусловлено внутренними особенностями численных процедур и оптимизационных модулей каждой программы. Время работы в *MSC.Adams* заметно меньше, что делает его предпочтительным для задач, где требуется высокая точность оптимизации целевой функции при разумных затратах вычислительных ресурсов.

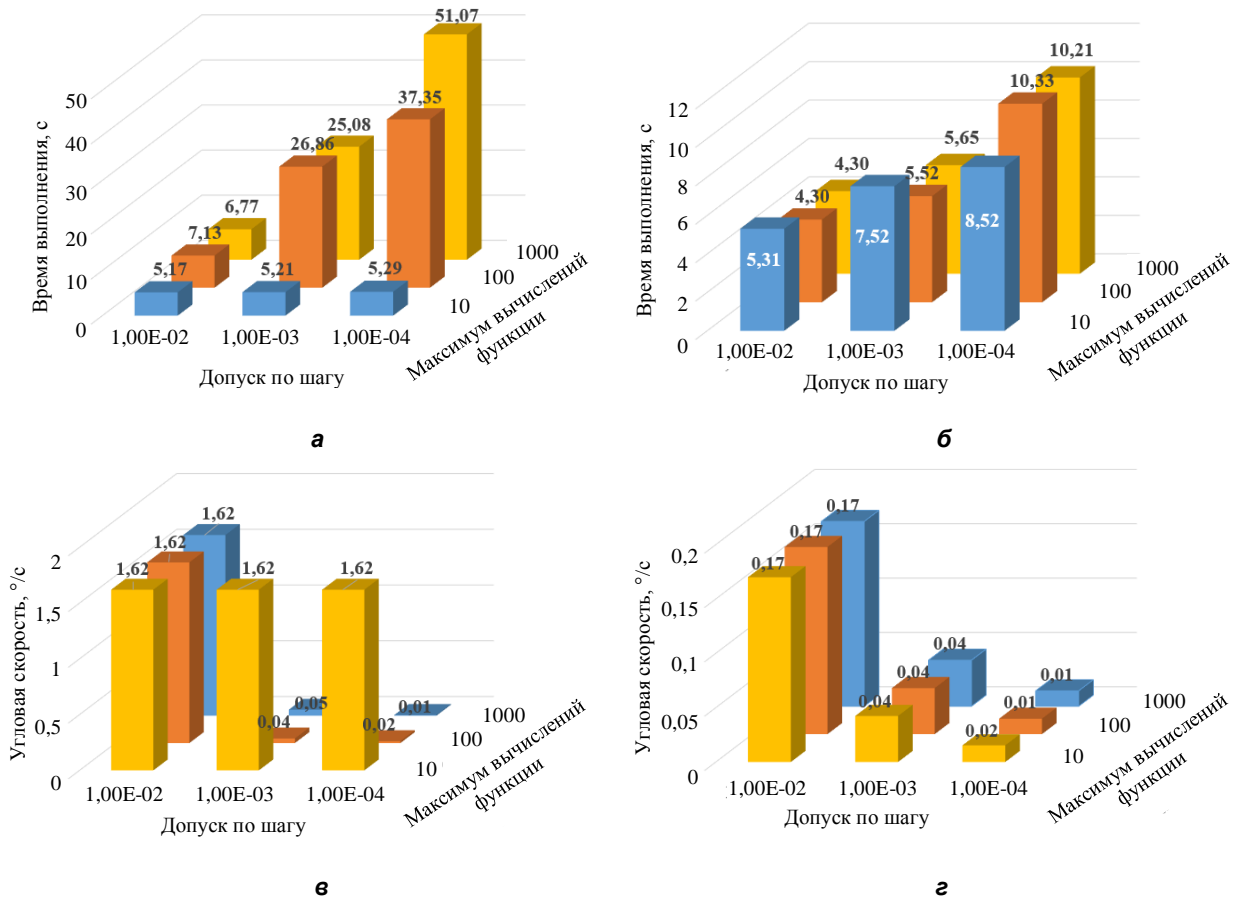


Рис. 5. Зависимость длительности процесса оптимизации от параметров решателя: а – Matlab; б – MSC.Adams; зависимость оптимизированной угловой скорости от параметров решателя: в – Matlab; г – MSC.Adams

Результаты оптимизации

С использованием выбранных параметров решателя была произведена оптимизация толкателей в ПК *MSC.Adams*. Результатом является таблица настройки толкателей. Данные настройки обеспечивают минимальную угловую скорость КА после отделения.

Сравнение результатов моделирования с исходными и оптимизированными настройками приведены на рис. 6: в ходе оптимизации удалось снизить угловую скорость КА с 3,9 до 0,1 °/с, линейная скорость при этом снизилась с 0,67 до 0,62 м/с. Красные кривые **1** соответствуют скоростям до настройки, синие **2** – после настройки. Как вид-

но, полученные результаты удовлетворяют требованию как по угловой, так и по линейной скорости.

Уменьшение конечной линейной скорости связано с уменьшением общей потенциальной энергии системы, за счёт уменьшения хода толкателей, по сравнению с предварительным расчётом (до оптимизации).

Применение рассмотренного оптимизационного алгоритма в рамках разработанной модели позволяет оперативно найти оптимальные параметры настройки толкателей в случае изменения исходных данных. Например, при изменении массо-инерционных характеристик КА или изменениях характеристик толкателей.

Таблица

Характеристики настроенных толкателей

Расположение толкателей		«+Z+X»	«+Z-X»	«-Z+X»	«-Z-X»
Величина хода, мм	До	84	84	84	84
	После	66	71	82	84

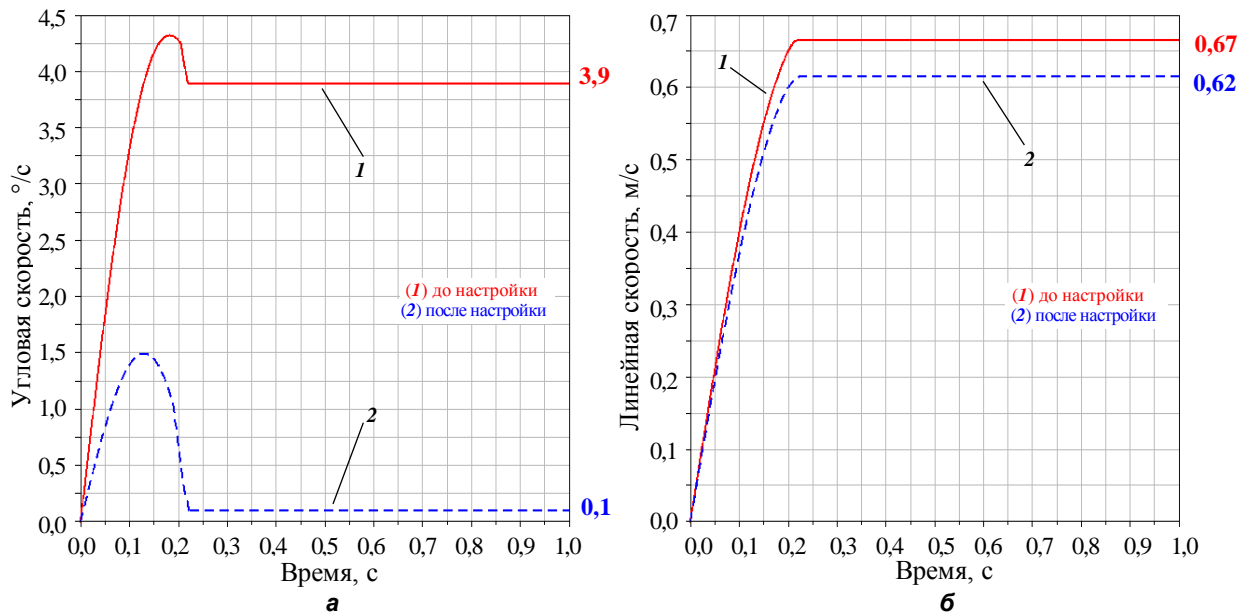


Рис. 6. Сравнение скоростей до и после настройки толкателей: а – угловая скорость; б – линейная скорость

Заключение

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. Компенсация отклонения ЦМ КА несимметричной настройкой толкателей системы отделения является эффективным способом минимизации угловой скорости КА после отделения.
2. Построенная в *MSC.Adams* модель отделения КА позволяет проводить расчет скоростей КА в про-

цессе отделения с учетом фактических характеристик каждого толкателя, их расположения, а также массоинерционных характеристик КА.

3. Применение оптимизации при анализе динамики отделения КА позволило сократить время и повысить точность решения задачи выбора оптимальных параметров толкателей, что важно для оперативной оценки влияния вносимых изменений или при уточнении положения ЦМ.

Список источников

1. Абламейко С. В., Саечников В. А., Спиридонов А. А. Малые космические аппараты : пособие для студентов факультетов радиофизики и компьютерных технологий, мех.-мат. и геогр. Минск : БГУ, 2012. 159 с. (Аэрокосмические технологии).
2. Туманов А. В., Зеленцов В. В., Щеглов Г. А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов : учебное пособие. 3-е изд., испр. М. : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. 572 [4] с. : ил.
3. Шатров А. К., Назарова Л. П., Машуков А. В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики : учебное пособие / Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2006. 81 [3] с.
4. Adams 2021.0.2. Adams Solver User's Guide [Электронный ресурс] / MSC Software. 2021. 1998 p. URL : https://help-be.hexagonmi.com/bundle/Adams_2021.0.2_Adams_Solver_User_Guide/raw/resource/enus/Adams_2021.0.2_Adams_Solver_User_Guide.pdf (дата обращения: 25.03.2026).
5. Егоров А. И. Обыкновенные дифференциальные уравнения с приложениями. 2-е изд., испр. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2005. 384 с.
6. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. 2nd ed. New York : Springer, 2006. 664 p.
7. Matlab. The Language of Technical Computing [Электронный ресурс] / The Mathworks. 2005. 187 p. URL : <https://www.mn.uio.no/astro/english/services/it/help/mathematics/matlab/getstart.pdf> (дата обращения: 25.03.2026).

References

1. Ablameyko S. V., Saechenikov V. A., Spiridonov A. A. Small Spacecraft: A Manual for Students of the Faculties of Radiophysics and Computer Technologies, Mechanics and Mathematics, and Geography. Minsk : BSU, 2012. 159 p. (Aerokosmicheskiye tekhnologii).

2. Tumanov A. V., Zelentsov V. V., Shcheglov G. A. Fundamentals of Spacecraft Onboard Equipment Layout : A Textbook. 3rd ed., rev. M. : Publishing House of Bauman Moscow State Technical University, 2018. 572 [4] p. : ill.
3. Shatrov A. K., Nazarova L. P., Mashukov A. V. Mechanical Devices of Spacecraft. Design Solutions and Dynamic Characteristics: A Textbook / Siberian State Aerospace University Krasnoyarsk, 2006. 81 [3] p.
4. Adams 2021.0.2. Adams Solver User's Guide [Electronic resource] / MSC Software. 2021. 1998 p. URL : https://help-be.hexagonmi.com/bundle/Adams_2021.0.2_Adams_Solver_User_Guide/raw/resource/enus/Adams_2021.0.2_Adams_Solver_User_Guide.pdf (date of access: 25.03.2026).
5. Egorov A. I. Ordinary Differential Equations with Applications. 2nd ed., rev. M. : FIZMATLIT, 2005. 384 p.
6. Nocedal J., Wright S. J. Numerical Optimization. 2nd ed. New York : Springer, 2006. 664 p.
7. Matlab. The Language of Technical Computing [Electronic resource] / The Mathworks. 2005. 187 p. URL : <https://www.mn.uio.no/astro/english/services/it/help/mathematics/matlab/getstart.pdf> (date of access: 25.03.2026).

Поступила в редакцию 05.02.2026

The article was submitted 05.02.2026

Информация об авторах

Александр Александрович Гринёв – инженер, т. 8 (495) 366-33-66, e-mail: lab186@mcc.vniiem.ru;

*Леонид Игоревич Ерёмин – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
т. 8 (495) 366-33-66, e-mail: lab186@mcc.vniiem.ru.*

Information about the authors

Alexander Alexandrovich Grinev – Engineer, t. 8 (495) 366-33-66, e-mail: lab186@mcc.vniiem.ru;

*Leonid Igorevich Eremin – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher,
t. 8 (495) 366-33-66, e-mail: lab186@mcc.vniiem.ru.*