Механика

УДК 519.816

Методика многокритериальной оптимизации бистабильного механизма на основе исследования пространства параметров*

П.А. Скворцов, С.С. Гаврюшин, М.Ш. Балымов

ИМАШ РАН

Methodology for multicriterial optimization of a bistable mechanism based on parameter space research

P.A. Skvortsov, S.S. Gavriushin, M.Sh. Balymov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences

Изложена методика численного моделирования и многокритериальной оптимизации бистабильных механизмов, способных фиксировать два устойчивых состояния без постоянного подвода энергии. В качестве объекта исследования рассмотрен четырехзвенный механизм, построенный с использованием гибких стержней. Описана численная процедура построения нелинейной характеристики механизма усилие — перемещение и алгоритм выбора рациональных параметров конструкции на основе ее многокритериальной оптимизации в пространстве параметров проектирования. Численное моделирование выполнено в среде конечно-элементного программного комплекса ANSYS с использованием балочных элементов. Приведены результаты верификации механизма на экспериментальной модели, изготовленной методом 3D-печати из ABS-пластика. Выполнен анализ бокового смещения и его влияния на фиксацию механизма во втором устойчивом состоянии. Для нахождения рациональных параметров проектирования использован метод исследования пространства параметров с генерацией пробных точек согласно ЛПτ-последовательности. Приведен пример формирования области допустимых решений с последующим выделением парето-оптимальных вариантов конструкций по критериям наличия двух устойчивых состояний и требуемого диапазона усилий.

EDN: ANWAKH, https://elibrary/anwakh

Ключевые слова: бистабильный механизм, численное моделирование, многокритериальная оптимизация, парето-оптимальные решения, рациональное проектирование

The paper presents a methodology for numerical simulation and multi-objective optimization of «bistable» mechanisms, the key characteristic of which is the ability to maintain two stable states without a continuous supply of energy. The study focuses on a four-bar mecha-

* Работа выполнена в ИМАШ РАН в рамках бюджетного финансирования по государственному заданию FFGU-2024-0022.

nism design constructed using flexible rods. A numerical procedure is provided for generating the mechanism's nonlinear force–displacement characteristic, along with an algorithm for selecting rational design parameters based on multi-objective optimization within the design parameter space. Numerical simulations are carried out using the finite element software ANSYS, employing beam elements. The results of mechanism verification are presented, based on an experimental model fabricated via 3D printing using ABS plastic. Special attention is given to the analysis of lateral displacement and its influence on the mechanism's fixation in the second stable state. To identify rational design parameters, a parameter space exploration method is employed, with trial points generated according to an Lπτ sequence. An example is provided demonstrating the formation of a feasible solution space, followed by the identification of Pareto-optimal design variants according to the criteria of having two stable states and the required range of switching forces.

EDN: ANWAKH, https://elibrary/anwakh

Keywords: bistable mechanism, numerical modeling, multi-criteria optimization, pareto-optimal solutions, rational design

Бистабильные механизмы (БСМ) находят все большее применение в современной инженерии благодаря способности фиксировать два устойчивых состояния без постоянного подвода энергии. Такие устройства востребованы в робототехнике, аэрокосмической технике, медицинских и микросистемных приложениях, где важны энергоэффективность, компактность и надежность. Несмотря на значительный прогресс в области моделирования и проектирования БСМ, остаются актуальными задачи повышения точности прогнозирования их поведения, а также разработки универсальных методик рационального проектирования, позволяющих учитывать множественные критерии качества.

В области БСМ накоплен значительный научный задел. Современные подходы позволяют создавать конструкции, которые стабильно удерживают два (или более) положения без постоянного подвода энергии. Например, аналитические модели [1] на основе теории балок Тимошенко точнее прогнозируют нелинейное поведение и равновесные состояния БСМ, особенно при существенных деформациях сдвига.

Известны подходы, к синтезу мультистабильных механизмов, основанные на ортогональном соединении кинематических цепей, которые позволяют получать несколько устойчивых положений с использованием одного БСМ в качестве базового блока [2]. Эти подходы продемонстрированы на примерах конструкций с тремя, четырьмя, пятью и девятью устойчивыми состояниями.

Бистабильные решения активно внедряются в различные устройства [3–19]. Так, их применяют в захватах для беспилотных летательных аппаратов. При ударе о ветку механизм переключается в устойчивое положение и надежно фиксирует дрон без затрат энергии на удержание. Аналогичные принципы реализованы в микрозахватах, способных автономно отпускать микрообъекты за счет вибрации, что позволяет обойтись без сложных систем управления.

Бистабильность находит применение и в мягких робототехнических устройствах. Мягкие клапаны из эластомеров работают как механические переключатели потока воздуха. Достаточно использовать источник постоянного давления, чтобы обеспечить периодическое движение. Бистабильные схваты, созданные по принципу строения актиний, совмещают захват и тактильное ощупывание, при котором специальная мембрана с манипуляторами и внутренними маркерами помогает определять форму объекта и надежно его удерживать.

Существуют перспективные решения и для аэрокосмической отрасли. Монолитные БСМ применяются как непиротехнические устройства раскрытия для космических аппаратов. Прототипы из металлического стекла (аморфного металла) получаются легкими, надежными и многократно используемыми без трения и ударных нагрузок. Похожим образом бистабильные поворотные механизмы помогают управлять крыльями беспилотников, меняя угол атаки закрылков под разные режимы полета и экономя до 80 % энергии, по сравнению с традиционными приводами.

В качестве практических примеров следует упомянуть микроклапаны с поворотной заслонкой, фиксируемые в открытом или закрытом состояниях без постоянной подачи энергии, что критично для портативных микроси-

стем; механизмы с переключаемой жесткостью (от нулевой до бесконечной) на основе бистабильных арок, которые позволяют делать элементы конструкций управляемо жесткими или гибкими; электромагнитные тормоза, фиксирующие положение без потребления тока, снижая энергопотребление вспомогательных систем и увеличивая запас хода электромобилей.

Исследования последних десятилетий показывают, что БСМ перспективны как энергоэффективные структуры и широкополосные вибрационные аккумуляторы энергии. Однако остается актуальным совершенствование методов моделирования. Основные вызовы связаны с усталостью материалов, ограниченным диапазоном движений и необходимостью точного расчета нелинейного поведения при переключении состояний.

Применение специализированных псевдожестких моделей точнее предсказывает усилие, возникающее в БСМ, а использование предварительно напряженных элементов предоставляет дополнительные возможности для оптимизации геометрических характеристик конструкции. Основные достоинства таких решений заключаются в автономности, энергоэффективности и относительной простоте конструкции.

Отечественные специалисты также активно занимаются вопросами нелинейного деформирования конструкций и проблемами устойчивости. Так, в работах [20–22] приведены решения задач, связанных с повышением точности расчетов актюаторов и робототехнических комплексов. На основе полученных результатов авторы делают вывод, что существующие методики расчета упругих элементов недостаточно хорошо описывают происходящие при деформировании процессы, а задачи оптимизации решаются чаще всего на основе интуитивного подхода разработчиков, что приводит к снижению точности и надежности приборов. Ввиду этого авторы предложили оригинальный подход, заключающийся в смене подпространства параметров, работоспособность которого описана в статье [22].

Таким образом, несмотря на широкий спектр подходов к моделированию и проектированию БСМ, остается актуальным рациональное проектирование, особенно в части многокритериальной оптимизации и системного исследования пространства параметров. Большая часть таких методов, как псевдожесткая модель (Pseudo Rigid Body Model — PRBM) или модель на основе балочных элементов (Chained-Beam Constraint Model — CBCM), ориентированы на анализ отдельных гибких звеньев и не всегда применимы к сложным многозвенным системам. Кроме того, аналитические подходы зачастую не позволяют учесть все значимые критерии качества и ограничения, возникающие при проектировании реальных механизмов.

Цель статьи — разработка универсальной методики, позволяющей эффективно исследовать пространство параметров, формировать область допустимых решений и выделять парето-оптимальные варианты конструкций с учетом специфики инженерных задач.

В качестве объекта исследования выступал БСМ с четырьмя звеньями, выполненными в виде гибких балок (рис. 1, *а*). Этот механизм имеет два стабильных положения и перемещается из одного в другое дискретно. Звено рассматриваемого БСМ в начальном и деформированном состояниях показано на рис. 1, *б*. По сути, звено является балкой, расположенной под некоторым углом, один конец которой консольно закреплен, а второй имеет возможность только линейного перемещения по вертикали. В зарубежной литературе такая расчетная схема получила название «fixed-guided beam». Зависимость силы F от перемещения Δy такого БСМ является S-образной и в общем виде показана на рис. 1, *в*.

Научная новизна исследования этого механизма заключается в построении характеристики сила — перемещение, которая, как и в случае задач, связанных с потерей устойчивости, будет иметь S-образный вид, а также в создании методики расчета и проектирования БСМ такого типа, основанной на исследовании пространства параметров.

На сегодняшний день в литературе существует несколько подходов к моделированию подобных механизмов. Первый — PRBM, где деформируемые звенья БСМ (например, упругие балки) моделируют как твердые звенья, соединенные идеальными шарнирами. В эти шарниры добавляют эквивалентные пружины, имитирующие упругое сопротивление материала. Для каждого гибкого участка подбирают параметры: коэффициенты жесткости пружин, работающих на кручение, и линейных пружин, положение и ориентацию виртуальных шарниров. Эти параметры зависят от геометрических

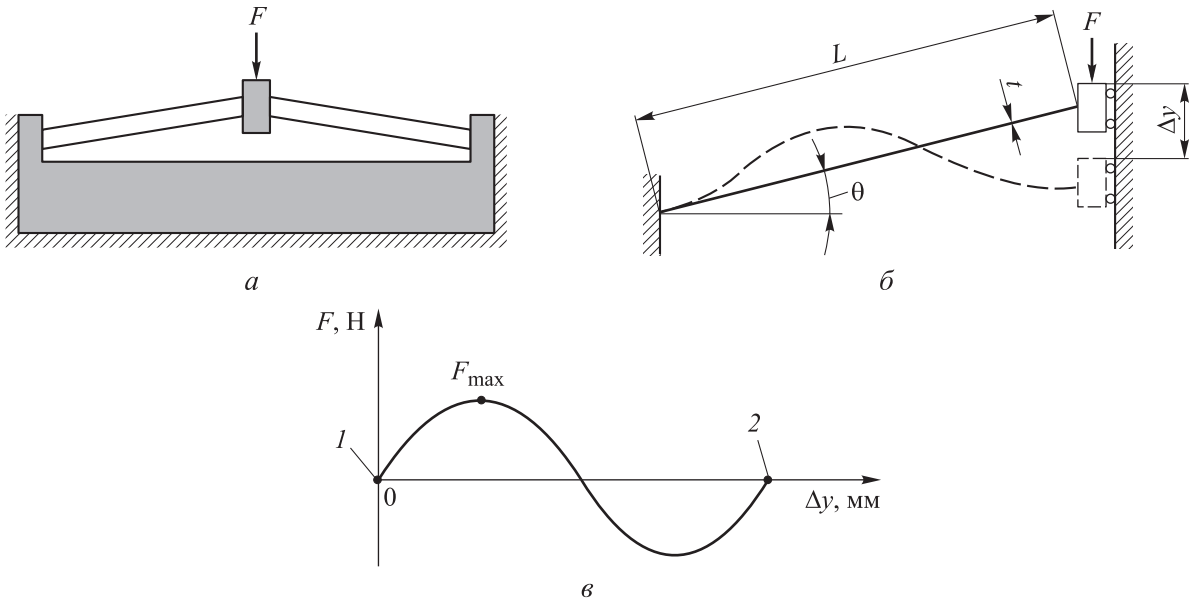


Рис. 1. Внешний вид четырехзвенного БСМ (*а*), схема его звена в начальном и конечном положениях (*б*) и зависимость силы *F* от перемещения Δ*y* (*1* и *2* — первое и второе устойчивые состояния)

характеристик и свойств материала. С помощью полученной системы твердых звеньев и пружин выполняют расчет перемещений, скоростей, сил и моментов, возникающих при работе БСМ. Это позволяет быстро оценить его поведение, найти положения равновесия, определить усилие срабатывания и точки нестабильности.

Второй подход — СВСМ — это развитие ВСМ (Beam-Constraint Model) — предназначенное для моделирования больших прогибов гибких балок в БСМ с деформируемыми звеньями. Основная идея такого подхода заключается в следующем. Балку разбивают на несколько элементов, каждый из которых описывают ВСМ-уравнениями, а затем эти элементы сшивают друг с другом с учетом равновесия и совместности перемещений.

Следует отметить, что предложенные подходы позволяют исследовать процесс деформирования балки, соответствующей расчетной схеме, показанной на рис. 1, *б*, что значительно затрудняет аналитическое исследование более сложных механизмов, объединяющих в себе, например, несколько бистабильных модулей. Для решения таких задач можно использовать хорошо зарекомендовавшие себя программные комплексы инженерного анализа, например ANSYS [14, 23].

Исследование включало в себя два этапа. *На первом* в программном комплексе ANSYS решали задачу нелинейного деформирования fixed-guided beam с одним звеном (см. рис. 1, *б*). Параметры исследуемой модели, включая физико-механические свойства материала, приведены в табл. 1.

Результаты численного моделирования в среде ANSYS сравнивали с данными, полученными путем расчета по СВСМ-модели, приведенными в работе [24]. Для верификации решения проведено численное моделирование с помощью как балочного элемента типа Beam 188, так и плоского элемента Plane 182. Выявлено значительное сходство графиков, что свидетельствует об адекватности модели (рис. 2).

Для окончательной проверки адекватности расчетной модели проведено экспериментальное исследование четырехзвенного БСМ со следующими параметрами: L = 70 мм, θ = 5,5° и t = 1,5 мм (рис. 3).

Исследуемый образец был распечатан на 3D-принтере из ABS-пластика. Однако после

Таблица 1

Параметры модели

Параметр	Значение
Длина звена *L*, мм	70
Ширина звена *t*, мм	1,5
Угол наклона звена θ, град	5,5
Толщина модели *h*, мм	5
Модуль упругости *E*, ГПа	1,9
Коэффициент Пуассона μ	0,34

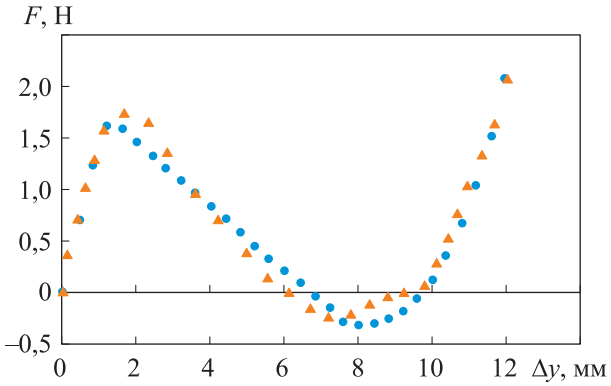
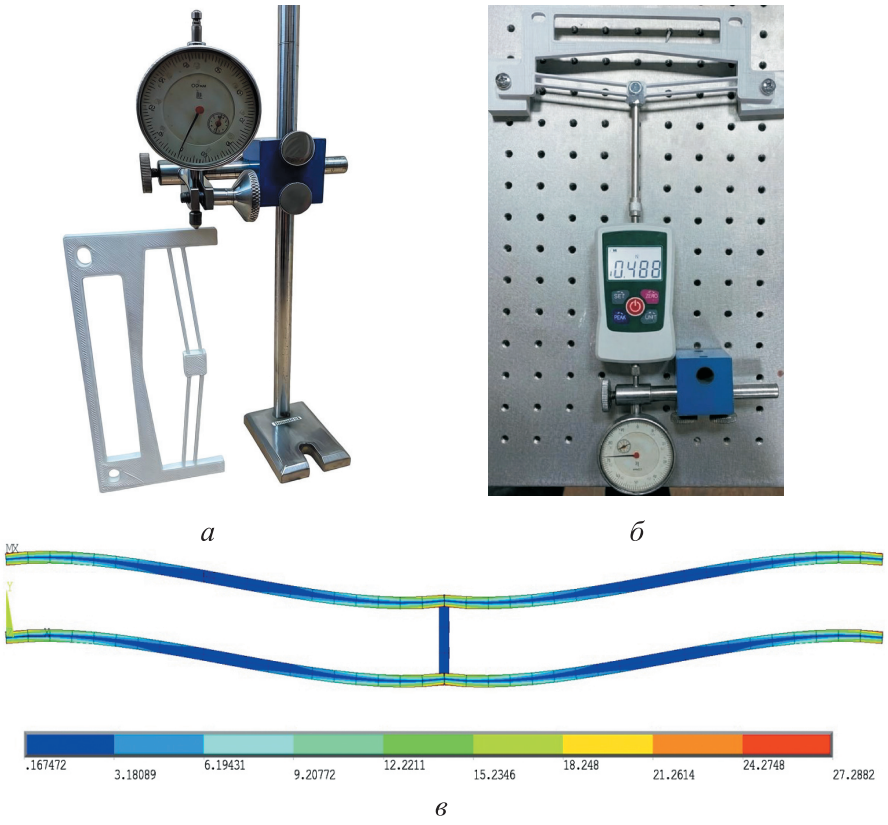


Рис. 2. Зависимости силы F от перемещения Δy БСМ с одним звеном, полученные путем численного моделирования в среде ANSYS (▲) и расчета по СВСМ-модели (●)

изготовления в нем обнаружилось боковое смещение стоек. Экспериментальное исследование (рис. 3, *а*) показало, что боковое смещение может достигать 0,3 мм, что существенно сказывается на фиксации во втором устойчивом состоянии. Для решения этой проблемы в ходе дальнейших исследований на механизме были предусмотрены дополнительные точки крепления, которые позволили исключить боковое отклонение стоек (рис. 3, *б*). Результат численного моделирования — распределение эквивалентных напряжений в БСМ с четырьмя деформируемыми звеньями — показан на рис. 3, *в*.

Зависимости силы F от перемещения Δy четырехзвенного БСМ, полученные путем эксперимента и численного моделирования показаны на рис. 4. Различие этих зависимостей можно объяснить принятием в качестве модуля упругости усредненного значения для ABS-пластика, приведенного в табл. 1. В целом экспериментальная и расчетная кривые имеют высокую схожесть, что свидетельствует об адекватности численного моделирования и соответствии расчетной кривой реальной физике процесса.

На втором этапе исследования выполнен переход от задачи анализа к задаче рационального проектирования исследуемого БСМ. Использован метод исследования пространства параметров, заключающийся в генерации пробных точек в n-мерном пространстве параметров управления, проверке пробных точек на



а *б* *в*

Рис. 3. Результаты проверки адекватности расчетной модели:
а — внешний вид экспериментальной установки для определения бокового отклонения,
б — фрагмент экспериментального определения зависимости силы от перемещения;
в — распределение эквивалентных напряжений, МПа, в БСМ с четырьмя деформируемыми звеньями

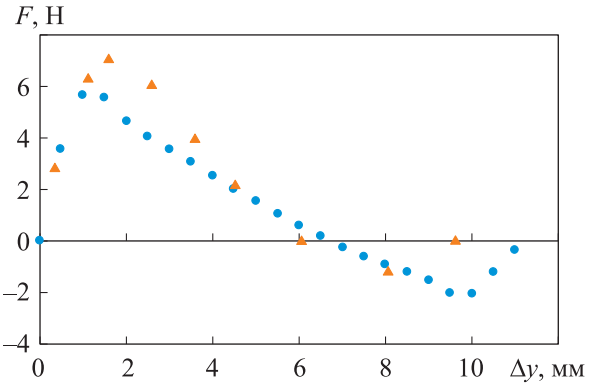


Рис. 4. Зависимости силы F от перемещения Δy четырехзвенного БСМ, полученные путем эксперимента (•) и численного моделирования (▲)

Таблица 2

Диапазон параметров управления

Параметр управления	Значение	
	минимальное	максимальное
Длина звена L, мм	30	70
Ширина звена t, мм	0,8	2,0
Угол наклона звена θ, град	5	20

функциональные ограничения, получении области допустимых решений и отборе парето-оптимальных решений.

В качестве параметров управления выступали геометрические размеры звена: длина L, угол наклона θ и ширина t. Диапазон параметров управления приведен в табл. 2.

Таким образом, для исследуемого БСМ сформировано трехмерное пространство управляющих параметров.

Одной из наукоемких задач при решении задачи рационального проектирования является исследование пространства параметров и генерации пробных точек, равномерно расположенных в нем. На сегодняшний день существует множество подходов. Однако хорошо зарекомендовал себя поиск пробных точек с помощью ЛП$_\tau$-последовательности [25]. Применяя этот подход, в указанном пространстве параметров управления сгенерировали 50 пробных точек. Для вычисления координат равномерно распределенных точек с помощью ЛП$_\tau$-последовательности использовали следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} X_i = x_{\min} + u_i \left(x_{\max} - x_{\min} \right); \\ Y_i = y_{\min} + v_i \left(y_{\max} - y_{\min} \right); \\ Z_i = z_{\min} + w_i \left(z_{\max} - z_{\min} \right), \end{cases} \quad (1)$$

где i — порядковый номер (индекс) пробной точки, $i = 0, 1, 2, \ldots, N-1$; $x_{\min}$, $y_{\min}$, $z_{\min}$ и $x_{\max}$, $y_{\max}$, $z_{\max}$ — минимальные и максимальные значения параметра X, Y и Z соответственно; u_i, v_i, w_i — квазислучайные числа из интервала [0,1), полученные методом Ван дер Корпута с разными основаниями для каждой координаты b_x, b_y и b_z.

Алгоритм вычисления координаты пробной точки заключается в следующем.

Записываем число i в системе счисления с основанием b_x:

$$i = d_0 + d_1 b + d_2 b^2 + \ldots + d_n b^n, \quad (2)$$

где d_n — цифры, $0 \le d_n \le b$; затем последовательность цифр изменяется следующим образом:

$$d_0, d_1, d_2, \ldots, d_n \to d_n, \ldots, d_2, d_1, d_0.$$

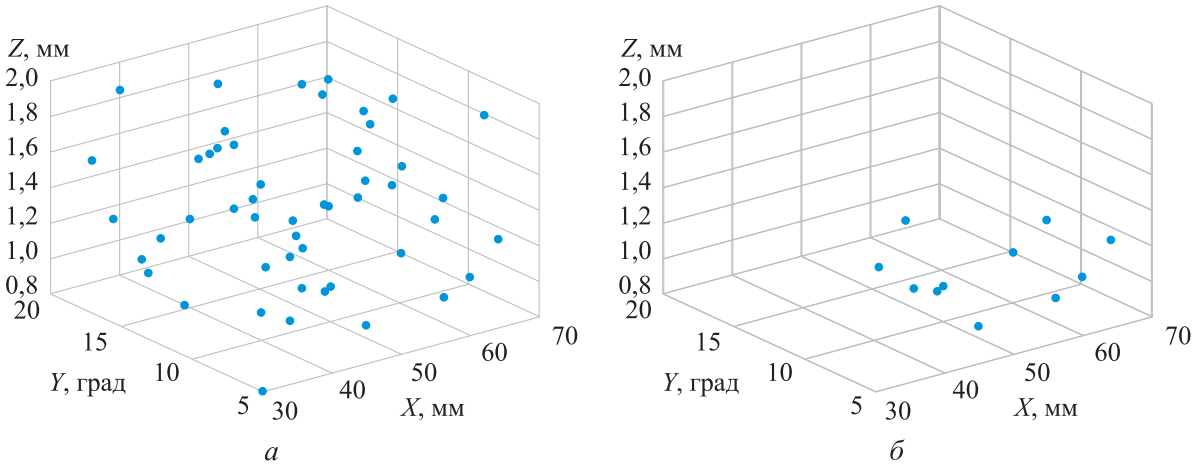


Рис. 5. Результаты исследования в среде ANSYS:
а — множество пробных точек в пространстве параметров; *б* — множество допустимых решений

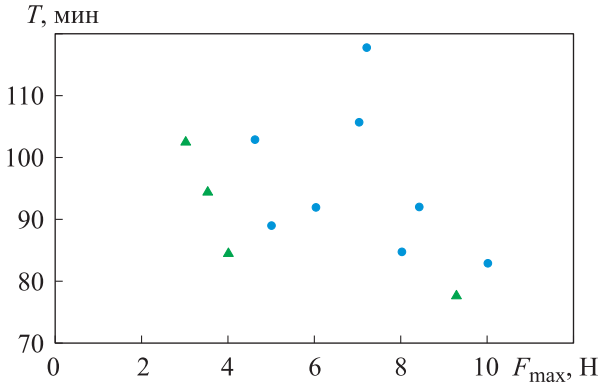


Рис. 6. Распределение допустимых (•) и парето-оптимальных (▲) вариантов четырехзвенного БСМ по времени печати T прототипа и максимальной силе F_{max}

Вычисляем квазислучайное число

$$u_i = \frac{d_n}{b_1} + \frac{d_{n-1}}{b^2} + \ldots + \frac{d_0}{b^{n+1}}. \qquad (3)$$

Подставляем найденное значение u_i в уравнение (1), после чего определяем координату пробной точки X_i.

Аналогично определяем квазислучайные числа υ_i и w_i по формулам (2) и (3) и, подставляя их в уравнение (1), находим координаты Y_i и Z_i.

Отметим, что тот, кто назначает диапазоны параметров управления, является лицом, принимающим решение (ЛПР).

Множество пробных точек в трехмерном пространстве показано на рис. 5, *а*, где ось X — длина звена, ось Y — ширина звена, ось Z — угол наклона звена. Диапазон значений на осях соответствует данным, приведенным в табл. 2.

После создания пробных точек (см. рис. 5, *а*) каждая рассчитывалась в программном комплексе ANSYS и проверялась на критериальные ограничения. Под последними понималось наличие двух устойчивых состояний у рассматриваемой конструкции и значение максимальной силы в диапазоне 2…10 Н. После расчета и проверки всех пятидесяти пробных точек сформирована область с допустимыми вариантами конструкций (рис. 5, *б*).

Далее все множество допустимых решений проецировалось на двумерное пространство параметров качества, которыми являлись время печати прототипа на 3D-принтере T и максимальная сила F_{max} (рис. 6). В рассматриваемом случае у идеальной конструкции время печати должно быть как можно меньше, а максимальная сила должна составлять 2 Н.

Таблица 3

Значения параметров для парето-оптимальных вариантов конструкции

Номер пробной точки	L, м	t, мм	θ, град	F_{max}, Н	T, мин
11	42	0,9	11	9,30	78
16	68	0,9	9	3,00	103
31	49	0,9	7	4,00	85
46	58	1,0	6	3,48	95

Из всех допустимых вариантов выбраны четыре парето-оптимальных варианта, из которых выбор в пользу одной конкретной конструкции может сделать ЛПР. Значения параметров управления L, t, θ и качества F_{max}, T приведены в табл. 3.

Выводы

1. Предложена и апробирована методика многокритериальной оптимизации БСМ, основанная на системном исследовании пространства параметров с использованием квазислучайной ЛПτ-последовательности. Такой подход позволил равномерно покрыть область поиска и сформировать множество допустимых вариантов конструкции.

2. Для верификации расчетной модели проведено численное моделирование в среде ANSYS с применением балочных элементов, а также экспериментальное исследование прототипа, изготовленного методом 3D-печати из ABS-пластика. Сравнение экспериментальных и расчетных характеристик сила — перемещение показало высокую адекватность предложенной методики.

3. Выполнен анализ бокового смещения звеньев, которое оказывает существенное влияние на фиксацию БСМ во втором устойчивом состоянии. Экспериментально подтверждено, что для повышения надежности фиксации необходимо предусматривать дополнительные точки крепления.

4. В результате многокритериальной оптимизации по параметрам качества (времени печати прототипа и максимальной силе) выделены четыре парето-оптимальных варианта конструкции, что позволяет ЛПР выбрать наи-

более подходящий вариант под конкретные требования.

5. Разработанная методика обладает высокой универсальностью: количество и диапазон параметров управления и критериев качества можно изменять в зависимости от задач проектирования.

6. Результаты работы можно использовать для создания энергоэффективных БСМ в робототехнике, аэрокосмической отрасли, медицинских и микросистемных приложениях.

7. Дальнейшие исследования будут связаны с расширением методики на пространственные БСМ и системы с мультистабильностью.

Литература

[1] Chen G., Ma F. Kinetostatic modeling of fully compliant bistable mechanisms using Timoshenko beam constraint model. *J. Mech. Des.*, 2015, vol. 137, no. 2, art. 022301, doi: https://doi.org/10.1115/1.4029024

[2] Chen G., Gou Y., Zhang A. Synthesis of compliant multistable mechanisms through use of a single bistable mechanism. *J. Mech. Des.*, 2011, vol. 133, no. 8, art. 081007, doi: https://doi.org/10.1115/1.4004543

[3] Follador M., Conn A.T., Mazzolai B. et al. Active-elastic bistable minimum energy structures. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, no. 14, art. 141903, doi: https://doi.org/10.1063/1.4898142

[4] Knott G., Viquerat A. Curved bistable composite slit tubes with positive gaussian curvature. *AIAA J.*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 1679–1688, doi: https://doi.org/10.2514/1.J056411

[5] Emam S.A., Inman D.J. Review on bistable composite laminates for morphing and energy harvesting. *Appl. Mech. Rev.*, 2015, vol. 67, no. 6, art. 060803, doi: https://doi.org/10.1115/1.4032037

[6] Zhang H., Zhao J., Sun J. Compliant bistable gripper for aerial perching and grasping. Патент US 10787259. Заявл. 08.11.2019, опубл. 29.09.2020.

[7] Tran N.D.K., Le N.T., Dao X.M. et al. Design and simulation of the microgripper capable of vibratory release. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2406, art. 020012, doi: https://doi.org/10.1063/5.0066462

[8] Rothemund P., Ainla A., Beardsley L. et al. Soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators. *Sci. Robot.*, 2018, vol. 3, no. 16, doi: https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7986

[9] Qi Q., Xiang C.Q., Ho V.A., Rossiter J.M. A sea-anemone-inspired, multifunctional, bistable gripper. *Soft Robot.*, 2022, vol. 9, no. 6, pp. 1040–1051, doi: https://doi.org/10.1089/soro.2020.0176

[10] Jagtap S.P., Deshmukh B.B., Pardeshi S. Applications of compliant mechanism in today's world — a review. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1969, art. 012013, doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012013

[11] Barri K., Haughn K.P.T., Henry T.C. et al. Rotational bistable mechanisms for morphing wings and beyond. *Commun. Eng.*, 2025, vol. 4, art. 164, doi: https://doi.org/10.1038/s44172-025-00495-2

[12] Luharuka R., Hesketh P.J. A bistable electromagnetically actuated rotary gate microvalve. *J. Micromech. Microeng.*, 2008, vol. 18, no. 3, art. 035015, doi: https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/3/035015

[13] Srivastava M., Gunna T., Kandiyapedi M.K. et al. Design of an engaging-disengaging compliant mechanism by using bistable arches. In: *Recent advances in machines, mechanisms, materials and design*. Springer, 2024, pp. 193–203, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5423-6_14

[14] Zirbel S.A., Tolman K.A., Trease B.P. et al. Bistable mechanisms for space applications. *PloS ONE*, 2016, vol. 11, no. 12, art. e0168218, doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168218

[15] Warner Electric. *Warner New Bi Stable Brake*. Newsroom, 2020. March 2. URL: https://www.engineernewsnetwork.com/blog/bi-stable-brake (дата обращения: 10.04.2026)

[16] Koenig K.S., Garcia Kilroy P.E. *Robotic arms*. Патент AU 2017326462. Заявл. 15.09.2017, опубл. 07.03.2019.

[17] Smith C.L. *Modeling and parameter study of bistable spherical compliant mechanisms*. Master thesis. University of South Florida, 2011. 61 p.

[18] Dews J., Hong Zh. Analysis and synthesis of bistable compliant mechanisms using precompressed beams. *IJERT*, 2016, vol. 5, no. 7, pp. 325–330.

[19] Dung-An W., Jyun-Hua Ch., Huy-Tuan Ph. A tristable compliant micromechanism with two serially connected bistable mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 2014, vol. 71, pp. 27–39, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.08.018

[20] Подкопаев С.А., Гаврюшин С.С. Численное моделирование нелинейного деформирования промышленных мембран. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2025, № 1. URL: https://engjournal.bmstu.ru/catalog/mech/tmmd/2413.html

[21] Podkopaev S.A., Gavriushin S.S., Podkopaeva T.B. Methods for studying the post-buckling behavior of axisymmetric membrane. In: Advances in intelligent systems and computing. *Springer*, 2020, pp. 3–15, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1_1

[22] Гаврюшин С.С., Николаева А.С. Метод смены подпространства управляющих параметров и его применение к задачам синтеза нелинейно деформируемых осесимметричных тонкостенных конструкций. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*, 2016, № 3, с. 120–130.

[23] Wook-Bae K., Sol-Yi H. Microinjection molding of out-of-plane bistable mechanisms. *Micromachines*, 2020, vol. 11, no. 2, art. 155, doi: https://doi.org/10.3390/mi11020155

[24] Fulei M., Chen G. Modeling large planar deflections of flexible beams in compliant mechanisms using chained beam-constraint-model. *J. Mech. Robot.*, 2016, vol. 8, no. 2, art. 021018, doi: https://doi.org/10.1115/1.4031028

[25] Соболь И.М., Статников Р.Б. *Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями*. Москва, Дрофа, 2006. 175 с.

References

[1] Chen G., Ma F. Kinetostatic modeling of fully compliant bistable mechanisms using Timoshenko beam constraint model. *J. Mech. Des.*, 2015, vol. 137, no. 2, art. 022301, doi: https://doi.org/10.1115/1.4029024

[2] Chen G., Gou Y., Zhang A. Synthesis of compliant multistable mechanisms through use of a single bistable mechanism. *J. Mech. Des.*, 2011, vol. 133, no. 8, art. 081007, doi: https://doi.org/10.1115/1.4004543

[3] Follador M., Conn A.T., Mazzolai B. et al. Active-elastic bistable minimum energy structures. *Appl. Phys. Lett.*, 2014, vol. 105, no. 14, art. 141903, doi: https://doi.org/10.1063/1.4898142

[4] Knott G., Viquerat A. Curved bistable composite slit tubes with positive gaussian curvature. *AIAA J.*, 2018, vol. 56, no. 4, pp. 1679–1688, doi: https://doi.org/10.2514/1.J056411

[5] Emam S.A., Inman D.J. Review on bistable composite laminates for morphing and energy harvesting. *Appl. Mech. Rev.*, 2015, vol. 67, no. 6, art. 060803, doi: https://doi.org/10.1115/1.4032037

[6] Zhang H., Zhao J., Sun J. Compliant bistable gripper for aerial perching and grasping. Patent US 10787259. Appl. 08.11.2019, publ. 29.09.2020.

[7] Tran N.D.K., Le N.T., Dao X.M. et al. Design and simulation of the microgripper capable of vibratory release. *AIP Conf. Proc.*, 2021, vol. 2406, art. 020012, doi: https://doi.org/10.1063/5.0066462

[8] Rothemund P., Ainla A., Beardsley L. et al. Soft, bistable valve for autonomous control of soft actuators. *Sci. Robot.*, 2018, vol. 3, no. 16, doi: https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7986

[9] Qi Q., Xiang C.Q., Ho V.A., Rossiter J.M. A sea-anemone-inspired, multifunctional, bistable gripper. *Soft Robot.*, 2022, vol. 9, no. 6, pp. 1040–1051, doi: https://doi.org/10.1089/soro.2020.0176

[10] Jagtap S.P., Deshmukh B.B., Pardeshi S. Applications of compliant mechanism in today's world — a review. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1969, art. 012013, doi: https://doi.org/10.1088/1742-6596/1969/1/012013

[11] Barri K., Haughn K.P.T., Henry T.C. et al. Rotational bistable mechanisms for morphing wings and beyond. *Commun. Eng.*, 2025, vol. 4, art. 164, doi: https://doi.org/10.1038/s44172-025-00495-2

[12] Luharuka R., Hesketh P.J. A bistable electromagnetically actuated rotary gate microvalve. *J. Micromech. Microeng.*, 2008, vol. 18, no. 3, art. 035015, doi: https://doi.org/10.1088/0960-1317/18/3/035015

[13] Srivastava M., Gunna T., Kandiyapedi M.K. et al. Design of an engaging-disengaging compliant mechanism by using bistable arches. In: *Recent advances in machines, mechanisms, materials and design*. Springer, 2024, pp. 193–203, doi: https://doi.org/10.1007/978-981-97-5423-6_14
[14] Zirbel S.A., Tolman K.A., Trease B.P. et al. Bistable mechanisms for space applications. *PloS ONE*, 2016, vol. 11, no. 12, art. e0168218, doi: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168218
[15] Warner Electric. Warner New Bi Stable Brake. Newsroom, 2020. March 2. URL: https://www.engineernewsnetwork.com/blog/bi-stable-brake (data obrashcheniya: 10.04.2026)
[16] Koenig K.S., Garcia Kilroy P.E. *Robotic arms*. Patent AU 2017326462. Appl. 15.09.2017, publ. 07.03.2019.
[17] Smith C.L. *Modeling and parameter study of bistable spherical compliant mechanisms*. Master thesis. University of South Florida, 2011. 61 p.
[18] Dews J., Hong Zh. Analysis and synthesis of bistable compliant mechanisms using precompressed beams. *IJERT*, 2016, vol. 5, no. 7, pp. 325–330.
[19] Dung-An W., Jyun-Hua Ch., Huy-Tuan Ph. A tristable compliant micromechanism with two serially connected bistable mechanisms. *Mech. Mach. Theory*, 2014, vol. 71, pp. 27–39, doi: https://doi.org/10.1016/j.mechmachtheory.2013.08.018
[20] Podkopaev S.A., Gavryushin S.S. Numerical simulation of the industrial membrane nonlinear deformation. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2025, no. 1. URL: https://engjournal.bmstu.ru/catalog/mech/tmmd/2413.html (in Russ).
[21] Podkopaev S.A., Gavriushin S.S., Podkopaeva T.B. Methods for studying the post-buckling behavior of axisymmetric membrane. In: Advances in intelligent systems and computing. *Springer*, 2020, pp. 3–15, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-39216-1_1
[22] Gavryushin S.S., Nikolaeva A.S. Method of change of the subspace of control parameters and its application to problems of synthesis of nonlinearly deformable axisymmetric thin-walled structures. *Izvestiya RAN. MTT*, 2016, no. 3, pp. 120–130. (In Russ.). (Eng. version: *Mech. Solids*, 2016, vol. 51, no. 3, pp. 339–348, doi: https://doi.org/10.3103/S0025654416030110)
[23] Wook-Bae K., Sol-Yi H. Microinjection molding of out-of-plane bistable mechanisms. *Micromachines*, 2020, vol. 11, no. 2, art. 155, doi: https://doi.org/10.3390/mi11020155
[24] Fulei M., Chen G. Modeling large planar deflections of flexible beams in compliant mechanisms using chained beam-constraint-model. *J. Mech. Robot.*, 2016, vol. 8, no. 2, art. 021018, doi: https://doi.org/10.1115/1.4031028
[25] Sobol I.M., Statnikov R.B. *Vybor optimalnykh parametrov v zadachakh so mnogimi kriteriyami* [Selection of optimal parameters in multi-criteria problems]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 175 p. (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 22.09.2026

Информация об авторах

СКВОРЦОВ Павел Аркадьевич — кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории компьютерных систем автоматизации производства и цифровых технологий. ИМАШ РАН (101000, Российская Федерация, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: SkvortsovPA@yandex.ru).

ГАВРЮШИН Сергей Сергеевич — заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией компьютерных систем автоматизации производства и цифровых технологий. ИМАШ РАН (101000, Российская Федерация, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д.4, e-mail: gss@bmstu.ru).

Information about the authors

SKVORTSOV Pavel Arkadyevich — Candidate of Science (Eng.), Researcher, Laboratory of Computer Systems for Industrial Automation and Digital Technologies. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: SkvortsovPA@yandex.ru).

GAVRIUSHIN Sergey Sergeevich — Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Laboratory of Computer Systems for Industrial Automation and Digital Technologies. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: gss@bmstu.ru).

БАЛЫМОВ Михаил Шынтасович — аспирант. ИМАШ РАН (101000, Российская Федерация, Москва, Малый Харитоньевский переулок, д. 4, e-mail: balymovmisha@gmail.com).

BALYMOV Mikhail Shyntasovich — Postgraduate. Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (101000, Moscow, Russian Federation, Malyy Kharitonievskiy Pereulok, Bldg. 4, e-mail: balymovmisha@gmail.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:
Скворцов П.А., Гаврюшин С.С., Балымов М.Ш. Методика многокритериальной оптимизации бистабильного механизма на основе исследования пространства параметров. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2026, № 11, с. 3–13.

Please cite this article in English as:
Skvortsov P.A., Gavriushin S.S., Balymov M.Sh. Methodology for multicriterial optimization of a bistable mechanism based on parameter space research. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2026, no. 11, pp. 3–13.



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник Н.А. Иванищевой

«Инновационные процессы и формы в образовании»

В учебнике изложены тексты лекций по дисциплине «Инновационные процессы и формы в образовании», отражающие актуальные тенденции образовательных инноваций. Концепция курса строится вокруг предмета исследования, которым являются теоретические и методологические основы, содержание и динамика инновационных процессов в условиях трансформации системы образования, инновационные формы реализации образовательных программ. Лекционный материал систематизирует ключевые подходы к пониманию инноваций в сфере образования, раскрывает механизмы их внедрения в образовательную практику технического вуза, а также раскрывает взаимосвязь между целями, средствами и результатами образовательного процесса.

Содержание учебника соответствует актуальным требованиям самостоятельно устанавливаемого образовательного стандарта (СУОС 3++) по направлению подготовки 27.04.02 «Управление качеством» МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Курс ориентирован на магистров, аспирантов и может быть использован слушателями дополнительных профессиональных программ, программ переподготовки и повышения квалификации.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; https://press.bmstu.ru