

УДК 621.3.087.9

МЕХАНИЧЕСКОЕ МАСШТАБИРОВАНИЕ В ДАТЧИКАХ ЛИНЕЙНЫХ РАЗМЕРОВ

Дьяченко Е.И. *eugene.mechatronics@gmail.com*

Институт машиноведения, автоматизации и геотехники НАН КР

Работа посвящена рассмотрению устройств для масштабирования аналоговых сигналов. Рассматривается новый тип таких устройств – механический масштабизатор сигнала для датчиков линейных размеров. Данный масштабизатор представляет собой одну-единственную деталь, выполненную из какого-либо упругого материала. Особый профиль пустот в конструкции масштабизатора позволяет ему иметь большую жесткость в некоторых заданных направлениях и малую жесткость в других. Кинематические пары такого масштабизатора работают не за счет относительного движения его звеньев, а за счет собственной упругости материала. Это обстоятельство принципиально лишает такие масштабизаторы люфтов, износа, потребности в смазке и прочего, свойственного классическим кинематическим парам. Кроме того, благодаря современным аддитивным технологиям такое устройство зачастую дешевле аналогов и обладает рядом других положительных особенностей, о которых пойдет речь в статье. Также приводится расчет масштабизатора по перемещениям, с помощью метода конечных элементов в расчетной среде SolidWorks Simulation.

Ключевые слова: датчики, аналоговый сигнал, масштабизация, линейные перемещения, упругие механизмы, жесткость, АЦП

Введение

Масштабирование аналоговых сигналов представляет собой важную техническую задачу, необходимую для обработки и анализа данных в различных областях: от электроники и телекоммуникаций до измерительной техники и медицинской диагностики. Этот процесс позволяет изменять амплитуду и динамический диапазон сигналов, обеспечивая оптимальные условия для их последующей обработки и интерпретации. В данной статье рассматриваются основные методы масштабирования аналоговых сигналов, их применение в различных областях и технические аспекты данного процесса.

Масштабирование аналоговых сигналов является неотъемлемой частью многих технических систем, играющей ключевую роль в обеспечении корректной обработки и интерпретации данных. Понимание основных методов и их применение в различных областях позволяют инженерам и ученым эффективно решать задачи по обработке и передаче аналоговых сигналов, способствуя прогрессу в различных технологических и научных дисциплинах.

Основные причины необходимости масштабирования аналоговых сигналов можно резюмировать так:

Совместимость с оборудованием: разные устройства могут работать с различными уровнями напряжения или тока. Масштабирование позволяет адаптировать сигнал под требования конкретного оборудования.

Устойчивость к шумам: при повышении уровня сигнала (масштабировании) можно улучшить соотношение сигнал/шум, что делает обработку сигнала более надежной.

Упрощение обработки: для обработки сигнала, например, с использованием аналоговых или цифровых схем, важно, чтобы уровень сигнала находился в определенных пределах. Масштабирование помогает привести сигнал к нужному диапазону.

Снижение искажений: если сигнал слишком слабый, его сложно обработать без искажений. Масштабирование позволяет избежать потерь информации.

Масштабирование аналоговых сигналов

Масштабирование аналоговых сигналов включает в себя несколько основных методов преобразования диапазонов[1]:

1. **Усиление:** этот метод предназначен для увеличения амплитуды сигнала путем использования усилительных устройств. Усиление может быть линейным, когда усиливаются все частоты сигнала в одинаковой пропорции, или нелинейным, когда усиление зависит от частоты или амплитуды сигнала.

2. **Ослабление:** используется для уменьшения амплитуды сигнала. Ослабление может быть полосовым или частотно-зависимым, чтобы обеспечить минимальное искажение сигнала при его изменении.

3. **Подавление постоянной составляющей:** удаление постоянной составляющей сигнала позволяет корректно центрировать сигнал относительно нулевой точки для последующего анализа или передачи.

4. **Нормирование:** процесс, при котором амплитуда сигнала масштабируется таким образом, чтобы его максимальная амплитуда соответствовала определенному предельному значению или стандарту.

5. **Компрессия динамического диапазона:** этот метод позволяет уменьшить разницу между наибольшими и наименьшими значениями амплитуды сигнала, что полезно для обработки акустических сигналов или сигналов в режиме реального времени.

При реализации масштабирования аналоговых сигналов важно учитывать такие технические аспекты, как:

- **Линейность и искажения:** усилители должны обеспечивать минимальные искажения сигнала в широком диапазоне частот и амплитуд.

- **Шум и динамический диапазон:** необходимо контролировать уровень шума и обеспечивать достаточный динамический диапазон для сохранения качества сигнала.

- **Стабильность и надежность:** Устройства масштабирования должны быть стабильными и надежными в различных условиях эксплуатации и изменяющихся параметрах сигнала.

Для измерения аналоговых величин в цифровых системах используются аналогово-цифровые преобразователи (АЦП). АЦП характеризуются такими параметрами, как диапазон входных напряжений и разрядность, и ряд других.

Диапазон входных напряжений зависит от опорного напряжения АЦП и определяет границы, в пределах которых аналоговый сигнал может быть оцифрован. Разрядность АЦП определяет шаг, с которым выполняется преобразование одной выборки аналогового сигнала.

Довольно часто возникает ситуация, когда диапазон входного измеряемого напряжения не соответствует входному диапазону АЦП. Если он больше, АЦП не сможет измерить его значения за пределами своей шкалы, если меньше, то АЦП, по сути, будет работать в узком диапазоне и разрешение измеряемого напряжения будет низким.

Чтобы избежать этой ситуации, применяются масштабирующие схемы, которые «подгоняют» интересующий нас диапазон входных напряжений под диапазон АЦП. Эти схемы достаточно классические, обычно представляют из себя одну из следующих вариаций:

1. **Делитель напряжения с повторителем.** Его можно применять, когда входное измеряемое напряжение превышает диапазон АЦП, и его нужно просто поделить (1). Операционный усилитель выполняет здесь роль повторителя с большим входным и маленьким выходным сопротивлением.

2. **Не инвертирующий усилитель на операционном усилителе.** Такая схема подойдет, если входной сигнал меньше диапазона АЦП, и его нужно просто умножить.

3. **Операционный усилитель выполняет усиление сигнала и смещает его.** Схему следует применять, когда интересующий нас диапазон

входного сигнала начинается не с нуля и его нужно «растянуть» на всю шкалу АЦП.

В общем случае усиление сигнала АЦП можно представить так (рис. 1):



Рисунок 1 – Принципиальная схема усиления сигнала в АЦП (Н.В – неэлектрическая величина, Э.В. – электрическая величина, К – коэффициент масштабирования)

Предварительное масштабирование неэлектрической величины

В том случае, когда измеряется неэлектрическая величина, например, линейный размер, возможно применить схему, когда эта неэлектрическая величина предварительно масштабируется в такую же неэлектрическую величину, после чего уже масштабированная неэлектрическая величина конвертируется в электрическую. Такую схему в общем случае можно представить в следующем виде (рис. 2):

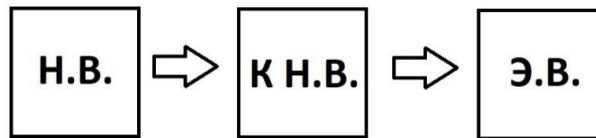


Рисунок 2 – Принципиальная схема усилителя с механическим масштабированием (Н.В – неэлектрическая величина, Э.В. – электрическая величина, К – коэффициент масштабирования)

Такой подход открывает возможность для более тонкой подстройки всех элементов датчика, то есть если диапазон неэлектрической величины, например, линейного размера, заготовки изменяются в диапазоне большем, чем рабочий диапазон, например, индуктивного датчика, то можно предварительным механическим масштабированием подогнать диапазон этого изменения к диапазону измерения индуктивного датчика. И наоборот, например, если необходимо повысить чувствительность индуктивного датчика, а входная неэлектрическая величина достаточно мала, например, ее изменение от 0 до 0,1, а рабочий диапазон индуктивного датчика 5 мм, то возможно механически масштабировать входящую величину с диапазона 0 – 0,1 до диапазона 0 – 5 мм, то есть коэффициент К здесь будет 50. Благодаря этому достигаются широкие возможности для предварительного масштабирования входящей неэлектрической величины, что влечет за собой повышение надежности, уменьшение номенклатуры электронных компонентов, оптимизации конструкций датчиков, в ряде случаев улучшения массогабаритных характеристик и т.д.

В общем случае схемы механического масштабирования известны давно и активно применяются [2], например, индикаторы часового типа – устройство для измерений и контроля отклонений от эталонной детали (рис. 3). Прибор помогает определить биения, несоответствие геометрической формы и толщины деталей. Служит для проверки качества в рамках стандартов и допусков на различных предприятиях – от автомобилестроения до частных мастерских. Представляет собой, по сути, систему рычагов, где первый рычаг в виде штока, имевшего некоторое линейное перемещение, связан со стрелкой на циферблате, которая с некоторым коэффициентом редукации на заранее проградуированной шкале показывает перемещение штока.

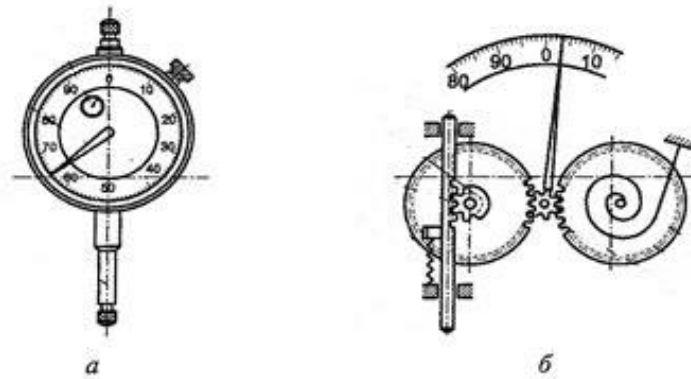


Рисунок 3 – а) Индикатор часового типа – общий вид; б) Устройство индикатора часового типа

Существуют индикаторы часового типа [3], которые уже имеют цифровую индикацию или цифровой вывод на компьютер (рис. 4).



Рисунок 4 – Индикатор часового типа с цифровым выводом

Такие устройства, по сути, являются датчиками размеров с механическим масштабированием неэлектрического сигнала с последующим преобразованием в электрический сигнал, но они имеют ряд минусов. Точность устройства строго зависит от качества исполнения механической части. Имеют достаточно ограниченный коэффициент масштабирования. Имеют стандартизированный ряд измеряемых размеров (обычно 0-10 мм). Массогабаритные характеристики достаточно однообразны. Имеют изнашивающиеся части. Требуют периодического обслуживания ввиду наличия смазочного материала внутри. Достаточно хрупки. Достаточно требовательны к уровню вибраций.

Механический масштабатор с гибкими связями

С повсеместным развитием компьютеризации производственных процессов появилась возможность создать достаточно сложные геометрические изделия. Компьютерное моделирование, а также комплексы программ, которые позволяют моделировать процессы, например, напряжения и деформации, расширяют возможности современного производства, и становится возможным создать элементы с заранее заданной жесткостью ее узлов, что позволяет создавать новый класс механизмов без кинематических пар. Кинематические пары в таких механизмах заменены их аналогами, но уже без подвижных частей, а подвижность элементов достигается распределением материала элемента, то есть собственной жесткостью каждого его узла. Такие механизмы имеют ряд принципиальных преимуществ:

1. Количество деталей. Зачастую номенклатура механизмов с гибкой связью в разы меньше их аналогов на классических кинематических парах.
2. Производственные процессы. Могут быть получены в широком спектре современного аддитивного и субтрактивного оборудования.
3. Цена. Зачастую цена таких механизмов в разы меньше их аналогов.
4. Точное движение. Ввиду отсутствия кинематического зазора в кинематических парах, а также замены внешнего трения, которое переменено от нагрузки и условий среды на внутреннее трение элементов гибкого механизма, возможно получать наноперемещения.
5. Габариты механизмов могут различаться от макромасштабных до наномасштабных.
6. Однозначность. Гибкие механизмы имеют низкую механическую флуктуацию. Измерения могут быть более повторяемы. Меньшая зависимость от условий окружающей среды.

В части приложения к измерительным устройствам нас больше всего интересует свойство таких механизмов, как высокая кинематическая точность ее элементов. Например, механический масштабатор входной неэлектрической величины с последующим преобразованием уже масштабированной в K раз величину может содержать чувствительный элемент с самым дешевым фоторезистором или датчиком Холла, даже с низкой чувствительностью. Ограничения чувствительности нивелируются механическим масштабатором, который усиливает сигнал, в частности, что касается датчиков линейных размеров, возможно в несколько раз, а иногда и десятков раз увеличивать входное изменение размера до оптимальных для считывания датчиком.

На рисунке 5 показана конструкция такого механического масштабатора. Он представляет собой одну-единственную деталь перемещения опорных планок, которые жестко связаны геометрическими размерами его звеньев и жесткостью элементов.

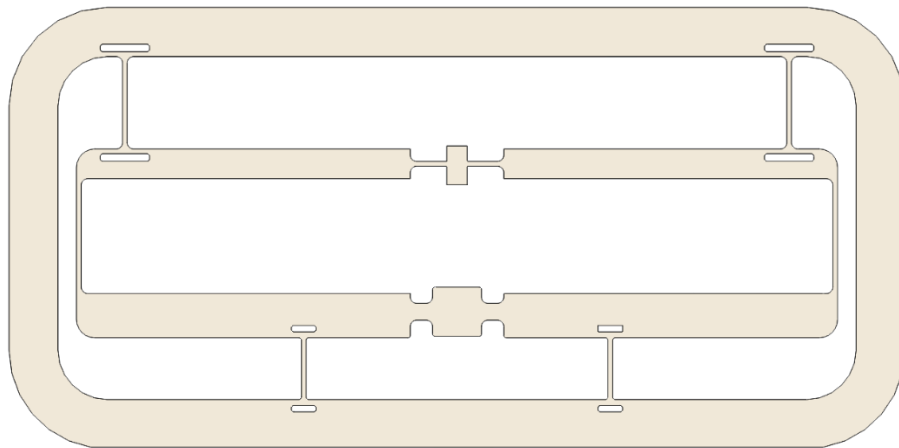


Рисунок 5 – Механический масштабатор датчика линейных размеров – общий вид

Принципиальную схему работы устройство можно представить в виде рычажной системы – рисунок 6. Тут A опорная площадка, которая воспринимает перемещение, B – опорная площадка с масштабированным перемещением, l , l_1 , l_2 – длины рычагов и балок, k_1 , k_2 , k_3 , k_4 , k_5 , k_6 – крутильные и изгибные жесткости элементов. Устройство работает следующим образом – опорная площадка A воспринимает усилие, возникающее от изменения размера элемента, который действует на нее, после чего по правилу рычага (правило рычага не соблюдается в чистом виде ввиду наличия крутильных и изгибных сопротивлений), усилие и перемещения преобразуются на другом конце балки, после чего

цикл повторяется уже на следующем участке, где находится опорная площадка В. В зависимости от геометрических характеристик устройства, а также жесткостей элементов происходит масштабизация входной неэлектрической величины в виде изменения линейного размера в такую же, только масштабизированную величину, уже эта величина считывается каким-либо способом с площадки В. Например, фоторезистором или датчиком Холла. Достигается эффект согласования чувствительности датчика линейного с изменением считываемой величины.

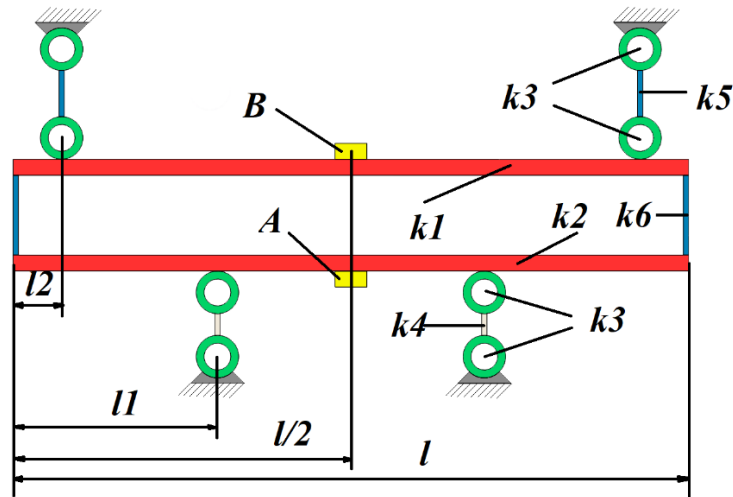


Рисунок 6 – Принципиальная схема масштабизатора датчика линейных размеров

В среде моделирования SolidWorks Simulation был произведен расчет перемещений (рис. 7) опорного участка В в зависимости от перемещений участка А. Прилагаемое усилие – 1 кГ. Материал масштабизатора в расчете – ABS пластик. Перемещения участка А составило 0,066 мм, участка В – 0,327. Коэффициент масштабирования $K=5$.

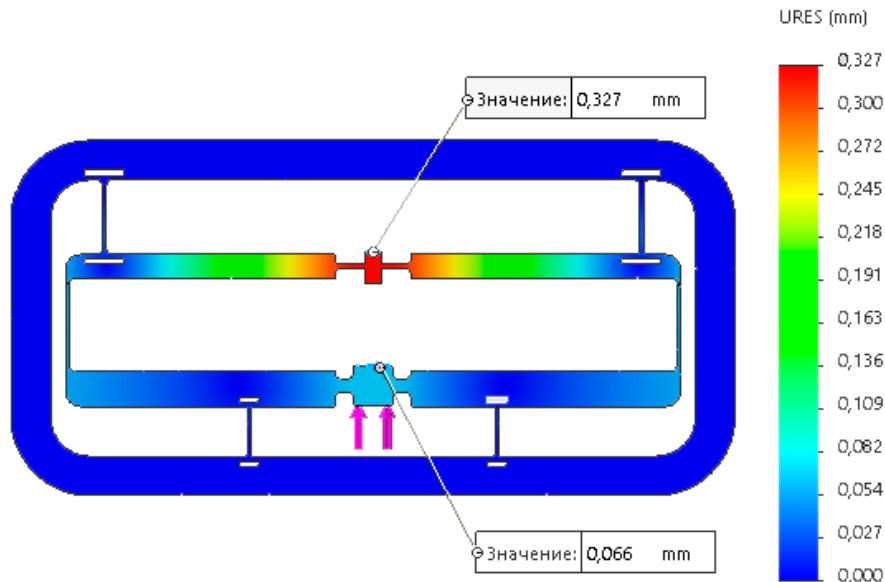


Рисунок 7 – Моделирования перемещения площадок А и В в SolidWorks Simulation

Синтез и анализ механизмов с гибкими связями

В настоящее время публикуется много работ касательно синтеза и анализа механизмов с гибкими связями, например [4, 5, 6]. По большей части работы на английском языке можно привести в пример, где приводится достаточно серьезный математический аппарат [7, 8].

Проблема синтеза и анализа подобных механизмов достаточно нетривиальна, на русском практически не встречается публикаций, и достаточно приличный объем публикаций можно найти в зарубежной литературе. Конструирование описанных механизмов осложняется наличием не обычных кинематических пар, а гибких, также наличием некоего упругого предела, после которого начинается усталостное разрушение материала. Кроме того, наличие податливостей на многих участках механизма создает дополнительные трудности при их расчете. Основные аспекты проблематики создания механизмов данного типа:

Изучение деформаций: оценка, как гибкие элементы реагируют на внешние нагрузки, и определение величины их деформаций.

Определение динамики: исследование колебательных и динамических характеристик механизмов, включая резонансные явления.

Сила и нагрузка: вычисление сил, действующих на гибкие связи, и их влияние на общую работу механизма.

Методы, используемые в анализе, можно разделить на следующие группы:

Аналитические методы: использование уравнений движения и принципов статики для определения характеристик механизмов.

Численные методы: применение методов конечных элементов (МКЭ) для моделирования сложных систем и их поведения под нагрузкой.

Экспериментальные методы: проведение испытаний на физических образцах для верификации теоретических расчетов.

Выше был рассмотрен семеричный механизм с гибкими связями, аналог которого может быть построен с помощью простейших рычажных механизмов. Описанный выше способ, когда на основе известных классических механизмов строится гибкий, называется синтез посредством замены твердого тела [9]. Говоря в общих чертах, используя этот способ для синтеза механизмов с гибкими связями, заменяются стандартные кинематические «жесткие» пары на упругие. Например, как на рисунке 8 показан переход от классического зажимного устройства к такому же зажимному, но уже являющемуся механизмом с гибкими связями.

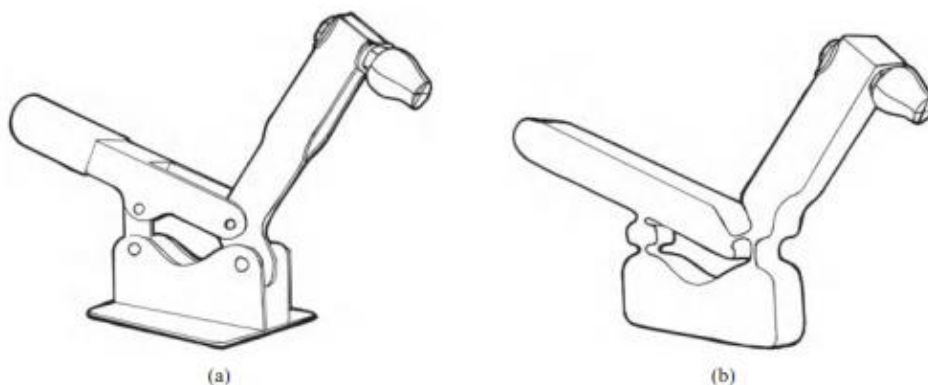


Рисунок 8 – Переход от классического механизма к механизму с гибкими связями

В [10] приводится еще 3 способа синтеза подобных механизмов:

- Синтез посредством оптимизации топологии
- Синтез посредством использования строительных блоков
- Синтез через топологии свободы и ограничений.

В статье не будут рассматриваться эти способы, т. к. они выходят за рамки статьи, а для описанного в статье механизма масштабирующего перемещения использован способ синтеза посредством замены твердого тела.

Что касается анализа, то тут применяется стандартный аппарат теории упругости. Конечно же, МКЭ в различных САПР-программах значительно ускоряет разработку, т.к. дает возможность очень быстро прикладывать нагрузки, а после чего получать перемещения, напряжения и деформации на всех остальных участках механизма. На основе полученных после моделирования нагрузки данных изменяются длины, толщины и прочие параметры, влияющие на упругие взаимосвязи в механизме, с каждой последующей итерацией происходит приближение к требуемой по характеристикам работы механизма с упругими связями.

Заключение

Таким образом предварительная механическая масштабизация входной неэлектрической величины в такую же неэлектрическую величину позволяет согласовать параметры датчика и параметров измеряемой величины, повысить его чувствительность, а также ряд других преимуществ.

Применение классических масштабизаторов, например, таких как использование в конструкциях измерительных головок часового типа, имеет ряд негативных моментов: жесткая привязка к номенклатурному ряду головок часового типа, ограниченный диапазон измерений, наличие механической флуктуации, связанной с неизбежным присутствием кинематического зазора, а также условий эксплуатации, например, деградация смазки или изменение ее свойств вязкости.

Применение механических масштабизаторов с гибкими связями позволяет нивелировать ряд негативных моментов, они имеют повышенную кинематическую точность, проще в изготовлении, зачастую дешевле, могут быть выполнены в любом габаритном исполнении, в том числе в наноразмерном и т.д.

Все это свидетельствует о перспективности применения таких масштабизаторов с гибкими связями. Теоретическая база для их расчета представляет собой достаточно непростую задачу ввиду наличия достаточно большего количества элементов с различной жесткостью, которая является функцией их геометрических параметров. МКЭ в целом позволяет оценить подвижность будущего элемента при симуляции, но сам синтез таких механизмов пока что затруднен.

Важное преимущество механических масштабизаторов с гибкими связями состоит в том, что имеется широкий спектр датчиков для считывания, например, линейных размеров после масштабизации, это во многом устраняет проблему подбора компонентов, а также позволяет использовать на менее дорогие из них. Снижение себестоимости конечного изделия, не снижая при этом его качественные параметры, одна из самых актуальных задач современной экономики.

Литература

1. Смит Стивен. Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников. – ДМК ПРЕСС, 2018. – 58 стр.
2. Иванов А.И. Технические измерения. – М., 1970. рисунок 105, – 78 стр.
3. https://aliexpress.ru/item/1005005116362275.html?sku_id=12000031738948893&spm=a2g2w.productlist.search_results.0.711269e5mBocQ8
4. Глазунов В.А., Хейло С.В., ред. Механизмы перспективных робототехнических систем. – М.: Техносфера, 2021. – 296 с.
5. Скворцов П.А. Кинематический и прочностной анализ механизма параллельной структуры с упругими шарнирами. Известия высших учебных заведений. – Машиностроение. – 2024. – №6. – С. 40 – 46.

6. Пожбелко В.И. Формализация структурного анализа и синтеза механизмов с кинематическими, гибкими и динамическими связями. – Вестник ЮУрГУ. – №11. – 2007. – С.21 – 32.
7. Tian Y., Shirinzadeh B., Zhang D. Design and dynamics of a 3-DOF flexure-based parallel mechanism for micro/nano manipulation. *Microelectron. Eng.*, 2010, vol. 87, no. 2, pp. 230– 241, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mee.2009.08.001>
8. Lavanya S.B., Jayanth G.R., Mohanty A.K. Optimal design of bridge amplifiers for largerrange linear characteristics. *IFToMM WC 2023*. Springer, 2023, pp. 721–730, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-45705-0_70
9. Larry L. Howell – *Compliant Mechanisms*. Wiley-Interscience 2001. - 112p.
10. Larry L. Howell - *Handbook of Compliant Mechanisms*. С 2013 John Wiley & Sons Ltd. – 78 p.