

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Оборудование и технологии машиностроительного производства»
(наименование кафедры)

15.04.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
производств

(код и наименование направления подготовки)

Технология автоматизированного машиностроения

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему: Снижение остаточных напряжений в поверхностном слое
мало жестких валов методом виброобработки

Студент	<u>А.Э. Дубылкин</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Научный руководитель	<u>Д.А. Расторгуев</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)
Консультанты	<u>В.Г. Виткалов</u> (И.О. Фамилия)	_____	(личная подпись)

Руководитель программы д.т.н., доцент Н.М. Бобровский _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой к.т.н., доцент Н.Ю. Логинов _____
(ученая степень, звание, И.О. Фамилия) (личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1. Анализ состояния вопроса.....	6
1.1 Виды и причины возникновения остаточных напряжений в маложестких деталях.....	6
1.2 Основные методы и способы снижения остаточных напряжений маложестких деталей.....	13
1.3 Анализ средств и методов вибрационной обработки.....	16
1.4 Развитие технологий вибрационной обработки.....	20
1.5 Методы определения остаточных напряжений.....	26
1.6 Цель и задачи работы.....	28
2. Экспериментальное исследование вибрационной обработки маложестких валов.....	30
3. Модальный анализ.....	33
3.1 Проведение модального анализа.....	35
3.1.1 Задание материала.....	35
3.1.2 Создание объемной твердотельной модели изделия.....	36
3.1.3 Наложение граничных условий. Задание закреплений.....	37
3.1.4 Генерация конечно-элементной сетки.....	39
3.1.5 Выполнения расчета собственных частот.....	41
3.1.6 Анализ результатов расчета.....	42
4. Гармонический анализ.....	45
4.1 Методы решения уравнения.....	45
4.1.1 Полный метод.....	45
4.1.2 Сокращенный метод.....	46
4.1.3 Метод суперпозиции мод.....	46
4.2 Проведение гармонического анализа методом разложения по собственным модам.....	48

4.2.1	Получение гармонической реакции методом суперпозиции мод.....	49
4.2.2	Анализ результатов гармонической реакции для многоступенчатого вала.....	60
4.2.3	Анализ результатов гармонической реакции для гладкого вала.....	63
	Заключение.....	67
	Список используемых источников.....	68

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время, в современном машиностроении огромное внимание акцентируется на способах изготовления особо ответственных маложестких деталей типа «вал». Во многих современных агрегатах и машинах имеет место использования, в своем составе таких деталей. Особенности геометрии маложестких деталей влекут за собой серьезные трудности в плане технологии изготовления на производстве. Следует отметить ряд причин:

- Образование большого количества остаточных напряжений, на этапах термических и заготовительной операциях;
- Влияние суммарных технологических напряжений на образование остаточных напряжений детали;
- Формирование пластических и упругих деформации на всех этапах механической обработки и эксплуатации деталей;
- Заниженная термоустойчивость деталей.

Влияние перечисленных причин при обработке маложестких деталей приводит к значительным поверхностным дефектам, короблению формы, погрешности геометрических параметров деталей, и, в конечном результате, к снижению эксплуатационной надежности маложестких деталей.

При анализе обработки маложестких деталей было выявлено, что для обеспечения требуемых параметров вала зачастую необходимо применение операций ручной доводки и применение дорогостоящих термических искусственно - старильных операций. Подобная практика значительно увеличивает затраты на трудоемкость и не исключает возможности брака. Поэтому повышение эффективности и совершенствование операций искусственно – старильной группы в сфере обработки маложестких деталей является важной задачей.

Повышение производительности и эффективности технологии вибрационной обработки, относящейся к группе искусственно – старильных операций способствует полному или частичному устранению пригоночных работ, улучшению надежности мало жестких деталей, возможности оптимизации процессов механической обработки на дальнейших операциях. Следственно, это увеличивает их эксплуатационные свойства, а также способствует снижению трудозатрат при обработке деталей и сборки машин.

В настоящий момент в России нет промышленно выпускаемых вибраторов, специализированных для вибрационной обработке мало жестких деталей. Поэтому исследования в области снижения остаточных напряжений путем виброобработки является важной и актуальной задачей.

1. Анализ состояния вопроса.

1.1 Виды и причины возникновения остаточных напряжений в малоэластичных деталях

Остаточные напряжения - это упругая деформация и соответствующие ей напряжения, которые существуют внутри тела при отсутствии на него внешнего механического воздействия.

Подразделять остаточные напряжения можно по физической сущности и по признакам протяженности силового поля. Классификация по признакам протяженности силового поля является общепринятой [5,14,17,18,19,20]:

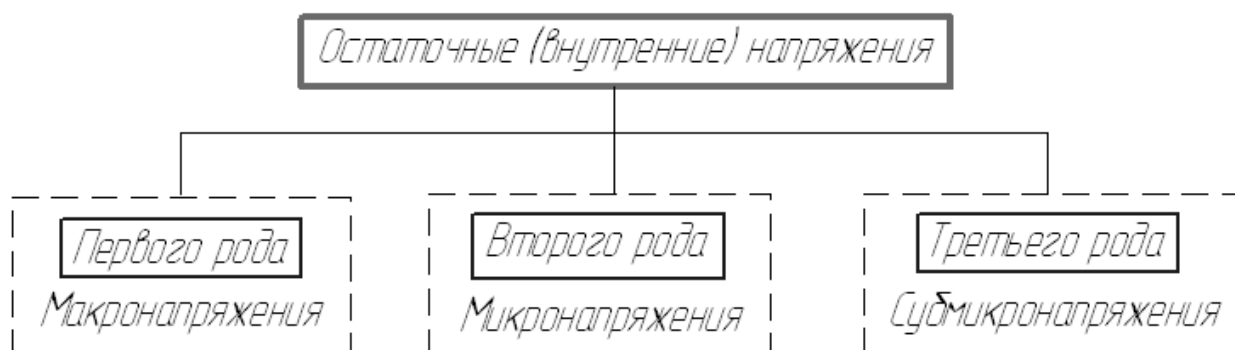


Рисунок 1. Классификация остаточных напряжений

- Напряжения первого рода (макронапряжения) охватывают области, соизмеримые с параметрами детали и уравниваются в ее пределах. Определяются расчетом исходя из теории упругости и пластичности, а так же экспериментально.
- Напряжения второго рода (микронапряжения) действуют в пределах одного кристалла, т.е. распространяются на отдельные зерна металла или на группу зерен. Определяются опытным путем.
- Напряжения третьего рода (субмикронапряжения) относятся к искажениям атомной решетки кристалла. Определяются

экспериментально по степени изменения интенсивности линии на рентгенограммах.

В местах обработки маложестких валов возникают значительные остаточные напряжения, в связи со структурными изменениями, резкими температурными скачками, и упругопластического деформирования, величина которых может достигать и даже существенно превышать предел текучести металла. [1]

Макронапряжения появляются в результате воздействия различных технологических причин при ее действии. Один из способов регулирования макронапряжений является использование смазочно-охлаждающей жидкости.

Соответствующие изменения в физико-химические процессы вносит применение СОЖ. Данные процессы протекают в области воздействия режущего инструмента на обрабатываемую поверхность, которые обуславливают излишнее напряжение в поверхностных слоях. Известно, что в зависимости от метода и условий обработки одни и те же среды проявляют неодинаковое воздействие на знак и значение остаточных напряжений. По сравнению с обработкой без СОЖ, их применение может способствовать как уменьшению, так и увеличению остаточных напряжений. Степень воздействия СОЖ на изменения макронапряжения по большей части зависит от коэффициента тепла в зоне резания, которое влияет на его напряженность, а также определяет развитие процессов разупрочнения в поверхностном слое. Также оказывают влияние на параметры и знак макронапряжений, возникающих в поверхностных слоях детали при обработке резанием - состав СОЖ и возможности их подачи в зону резания.

Микронапряжения образуются в процессе больших объемах деформации в поликристаллических металлах, вследствие взаимодействия зерен друг с другом; зерна в металле отличаются строением, а также

способны передвигаться по всем направлениям. Микронапряжения – это следствие разности физических параметров у различных поликристалльных частиц, а также внутренней анизотропии свойств и условий замкнутости искажения каждого зерна. Фазовые превращения являются базовыми причинами образования микронапряжения, анизотропии механических свойств отдельных зерен, температурной нестабильности, объем зерен и распад зерна на частицы и блоки при поверхностной деформации.

Субмикроскопические напряжения возникают в связи со смещением атомов от границы равновесия кристаллической решетке. Эти отклонения в совокупности с микронапряжениями отображают энергетический предел деформируемого металла. Термодинамической стабильности при всех температурах позволяет добиться эффект повышения энергетического уровня в наклепанном металле. Металл всегда стремится перейти с меньшей свободной энергией в более стабильное состояние. Следовательно, внедренные атомы и внутренние дислокации являются причиной появления деформации кристаллической решетки.

Остаточным напряжениям свойственно уравниваться и существовать внутри детали без приложения к нему внешних нагрузок.

Остаточные напряжения в поверхностном слое возникают по причине образования неоднородности деформированного состояния ввиду различного механического и термического воздействия на изделие.

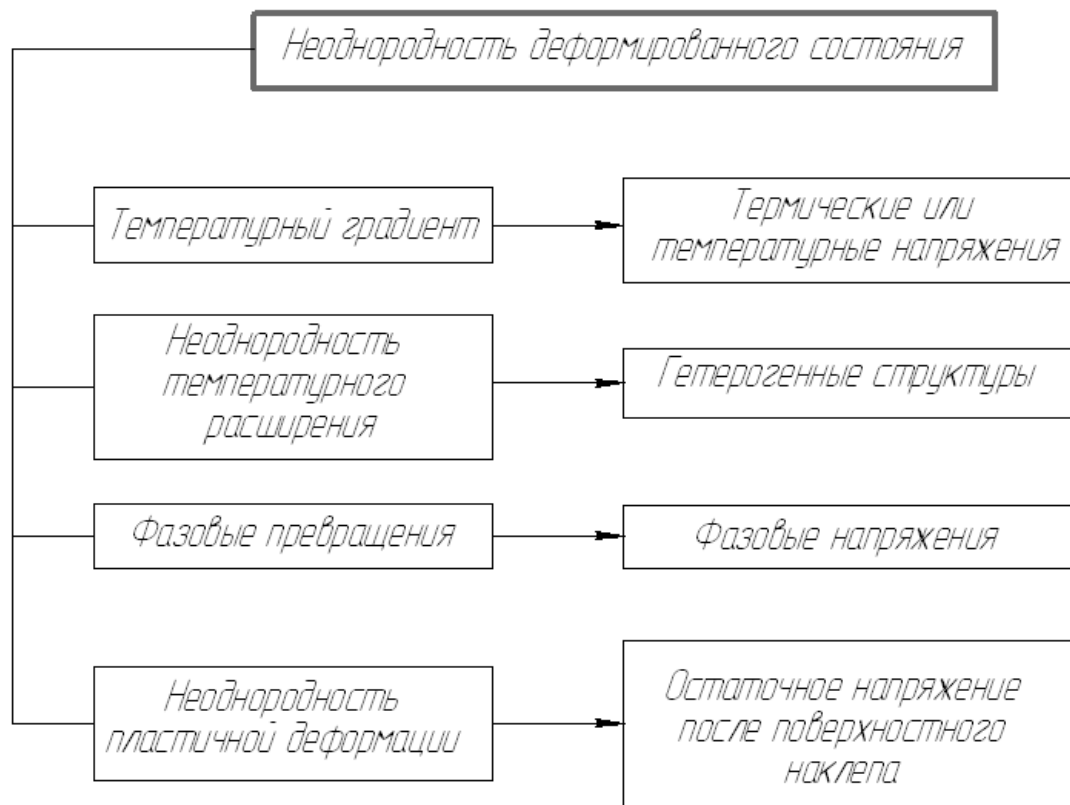


Рисунок 2. Причины возникновения неоднородности деформированного состояния.

При переходе материала из жидкого состояния в твердое, затвердевание происходит сперва в поверхностных слоях сопровождаясь усадкой. В случае опережения затвердевания наружной поверхности, в ней образуются остаточные напряжения растяжения, которые особенно неблагоприятны для деталей, работающих в условиях знакопеременной нагрузки, так как подобные напряжения способствуют образованию усталостных трещин на поверхности изделия.

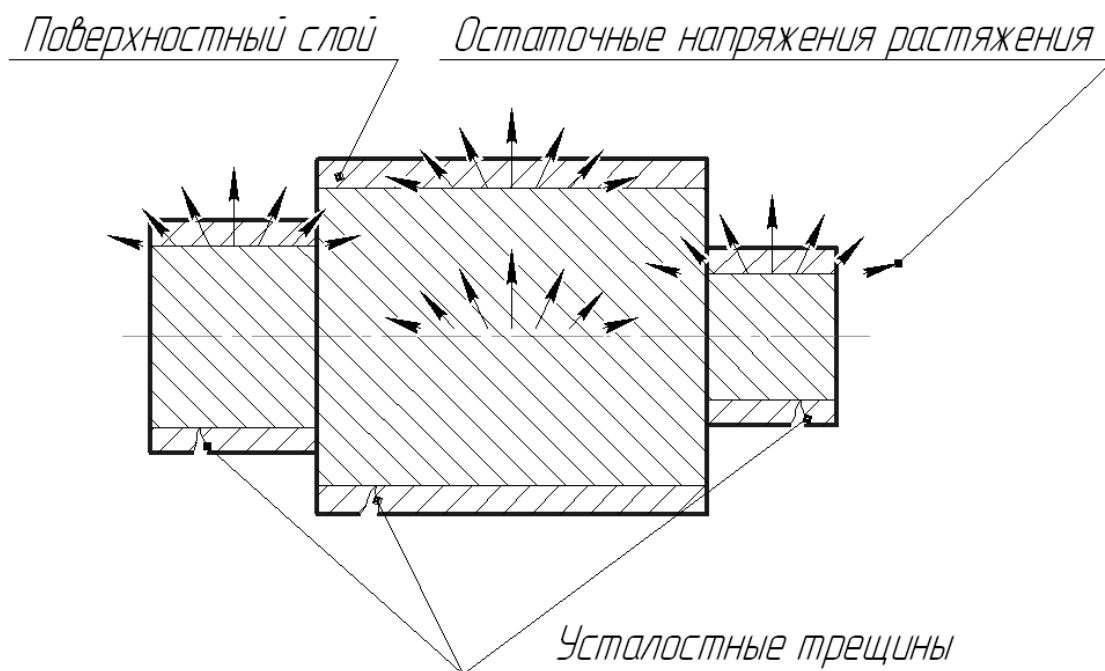


Рисунок 3. Эффект образования усталостных трещин

Остаточные напряжения сжатия напротив - могут возыметь положительный эффект, и не редко их создают в конструктивных целях. В строительстве нашли распространение предварительно напряженные конструкции. Напряжения сжатия возникают в результате наклепа при механической обработки и закалки поверхностного слоя. Под влиянием технологических напряжений растяжения в самых опасных наружных участках, напряжения сжатия ослабляют свое действие, и, следовательно, повышают способность сопротивления изделия усталостной деформации. Таким образом, остаточные напряжения сжатия способствуют повышению износостойкости и выносливости, а так же снижению влияния коррозии на деталь. Однако при повышенном напряжении сжатия может произойти коробление детали [2,22,23,24,25].

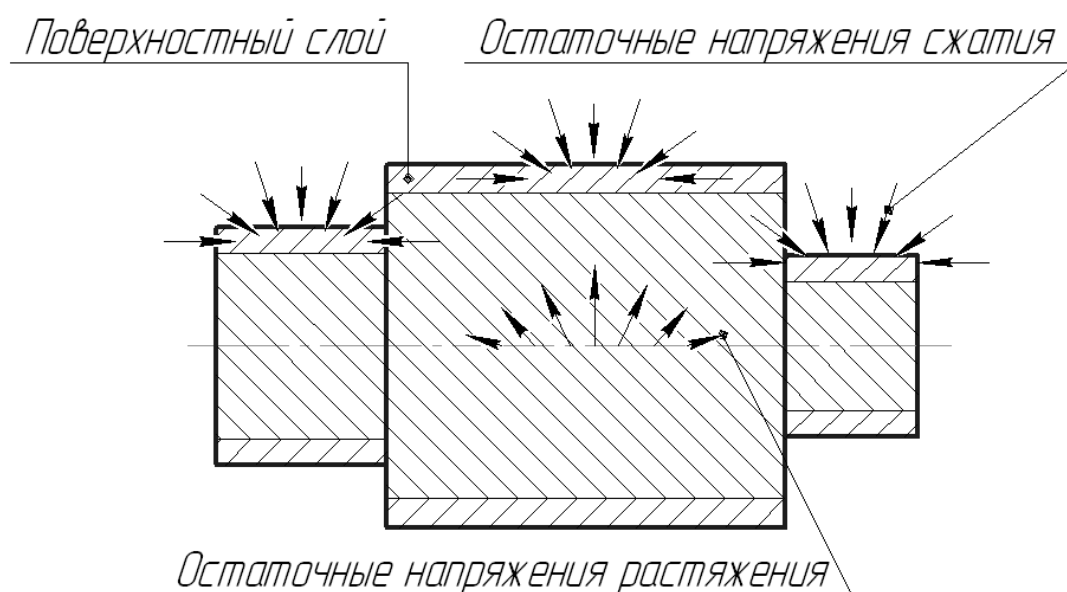


Рисунок 4. Эффект упрочнения поверхностного слоя

Для подтверждения этой мысли, можно, например, привести результаты испытания на усталость образцов из стали, покрытых никелем. В зависимости от технологии покрытия стали никелем на поверхности усталостных образцов возникали сжимающие или растягивающие остаточные напряжения. Стальные никелированные образцы, которые имеют сжимающие остаточные напряжения на поверхности (порядка $4,2 \text{ кгс/мм}^2$), имели в несколько раз выше усталостную прочность, чем образцы без покрытия. Никелирование, вызывающее растягивающие макронапряжения, равные $17,6 \text{ кгс/мм}^2$ приводило к понижению усталостной прочности на 35%. Полагая, что никелирование не должно влиять на основной металл, наблюдавшиеся изменения характеристик усталости можно отнести исключительно за счет остаточных напряжений.

Анализ приведенных исследований показывает, что при циклическом нагружении, в зависимости от величины рабочего напряжения и циклической наработке, первичные остаточные макронапряжения перераспределяются: уменьшаются, меняют знак или совсем снимаются и наводятся новые, вторичные напряжения.

В работах [17,26,27] описываются структурные и тепловые напряжения, возникающие при поверхностном нагреве, механической обработке, термической обработке и сварке.

Остаточные напряжения возникают как на заготовительной обработке, так и в процессе резания. В ходе всего техпроцесса изготовления детали происходит суммирование остаточных напряжений, так как пластически деформированный поверхностный слой в процессе резания формирует ряд остаточных напряжений, которые соединяются с уже существующими напряжениями, возникшими на заготовительном этапе.

Таким образом возникает необходимость использования способов и методов снижения внутренних напряжений. В случае игнорирования этих способов происходит процесс релаксации, который влечет за собой коробление изделия. Нередко процесс коробления возникает в уже готовом изделии.

1.2 Основные методы и способы снижения остаточных напряжений мало жестких деталей.

Основным методом снижения остаточных напряжений является термообработка:

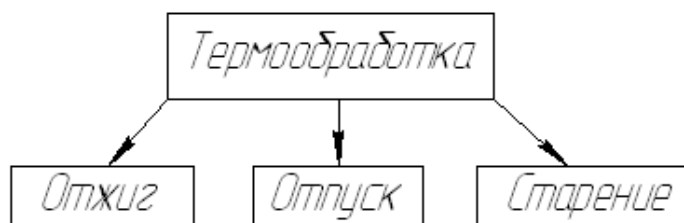


Рисунок 5. Виды термообработки

Термообработка предназначена для устранения внутренних напряжений, с целью уменьшения коробления детали. Данный процесс позволяет достичь высокой стабилизации геометрических параметров детали, однако остаточные напряжения устраняются не полностью, и процесс термообработки достаточно трудоёмок [6].

Основным механизмом влияния на остаточные деформации для снятия остаточных напряжений при отжиге и отпуске является их релаксация, проходящая более стремительно в условиях увеличения термического потока. Но данный процесс имеет ряд недостатков [4,28,29]:

- остаточные напряжения снимаются не полностью в зависимости от условий массивности изделия и материала, температуры отпуска и длительности выдержки.
- заготовка с большим количеством остаточных деформаций при нагреве и последующем охлаждении меняет свою форму и размеры.

- скорость охлаждения после отпуска и отжига может способствовать возникновению новых остаточных напряжений и короблению заготовок

Зачастую в состав основных техпроцессов изготовления маложестких деталей входит большое количество технологических операций со снятием минимального межоперационного припуска металла.

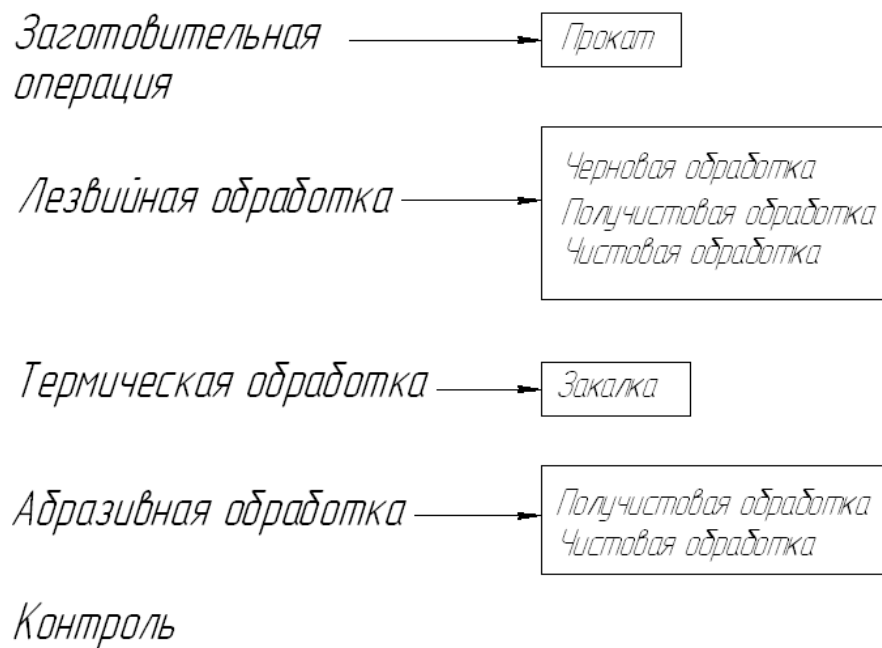


Рисунок 6. Схема технологического процесса изготовления маложестких деталей

После каждой операции поверхность заготовки нагревается, что влечет за собой образование новых остаточных напряжений, а затем - деформацию и быстрый износ детали при эксплуатации. Поэтому возникает необходимость после каждой операции производить отпуск с выдерживанием детали в свободном состоянии для стабилизации и частичного устранения пластической деформации [3].

Для повышения точности маложестких деталей в качестве заготовок используют прокатную горячекатаную калиброванную сталь, подвергнутую

дополнительной обработке волочением с небольшими поверхностными обжатиями, благодаря которым на поверхности прутка образуются не растягивающие, а сжимающие остаточные напряжения, которые способствуют повышению сопротивления усталостного разрушения. Качество поверхности калиброванного проката и высокая точность позволяют существенно снизить расход материала при его дальнейшей обработке. Отсутствие прокатной окалины на поверхности прутка увеличивает срок службы режущего инструмента.

К недостаткам данного метода относятся высокие экономические затраты на специальное дорогостоящее оборудование производящих калиброванный прокат.

Одним из прогрессирующих способов повышения геометрической точности маложестких деталей является термосиловая обработка. Суть метода заключается в следующем: во время термической обработки к маложесткому валу прикладывают осевое растягивающее усилие, которое с определенной скоростью и величиной равномерно осуществляет упругопластическую деформацию. В отличие от обычной технологии отпуска, при силовом воздействии векторы остаточных напряжений в наружных слоях будут одного направления, что полностью исключает коробление.

Однако не на всех термосиловых установках возможно осуществлять равномерный нагрев и равномерное охлаждение. Большинство установок способны работать только на растяжение и только в осевом направлении. Так же, не смотря на системы автоматического управления техпроцесса, создать единую программу для всех материалов невозможно. Из-за разнообразия физико-механических свойств и высокой зависимости материала от внешних условий, термосиловая обработка может оказать на поверхностный слой отрицательный эффект [7].

1.3 Анализ средств и методов вибрационной обработки

При изготовлении маложестких деталей главным фактором, который приводит к короблению заготовок и деталей в эксплуатационный период является неравномерность остаточных напряжений. Основной причиной возникновения остаточных технологических напряжений является неоднородность деформированного состояния материала по объему, в поверхностном слое. Данная неоднородность формируется при действии различных силовых факторов, термического воздействия на изделие (причем влияет и неоднородная тепловая деформация, так и различные фазовые переходы, например, переход структуры аустенита в структуру мартенсита). Если не принимать меры по выравниванию и снижению остаточных технологических напряжений, заготовка-деталь подвергается короблению, а на рабочей поверхности образуются усталостные трещины.

На фоне основных тепловых методов снижения остаточных напряжений (отпуск, отжиг, старение) виброобработка имеет преимущество за счет достаточной простой реализации и из-за простоты конструкции источника колебаний, так и из-за малой энергоемкости процесса при небольшой продолжительности.

Задачей вибрационной обработки является упругопластическое деформирование поверхностного слоя изделия за счет воздействия различного рода колебаний, которые вызывают неравномерные микроскопические сдвиги, способствующие релаксации напряжений. Максимальный эффект вибрационной обработки обеспечивается за счет повышения амплитуды колебаний, что наиболее просто реализуется на собственных частотах заготовки.

В процессе вибрационной обработки маложестких деталей возможно возбуждение поперечных, продольных, крутильных и комплексных

колебаний. Современное машиностроение предлагает вибраторы следующих видов:

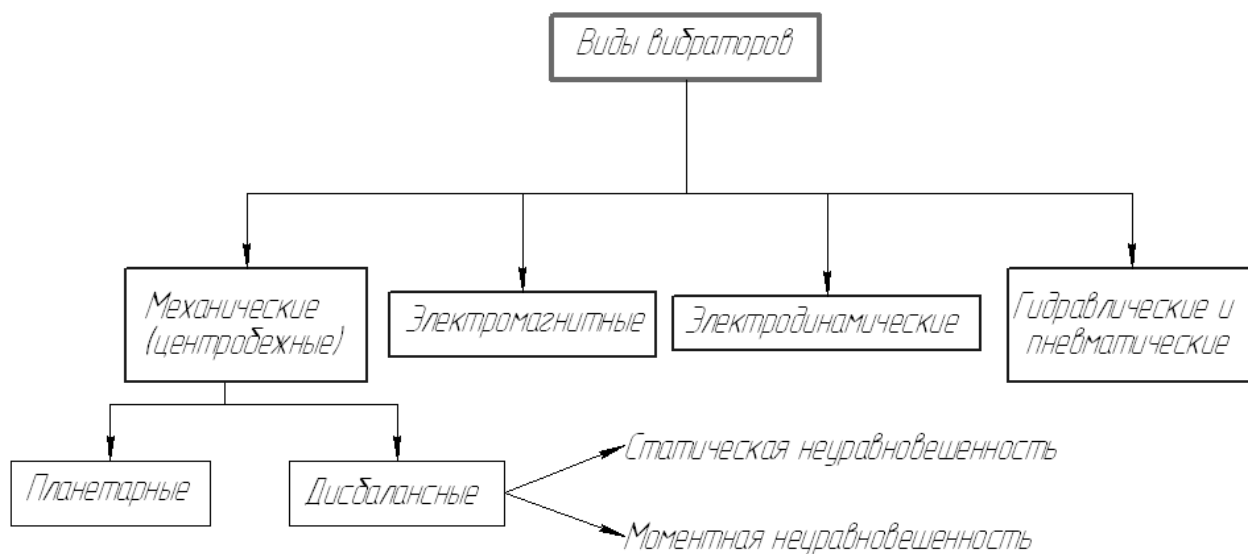


Рисунок 7. Виды вибраторов

Механические - это в основном центробежные вибраторы с инерционным движением вращательного элемента [8]. Это принудительная сила, которая возникает при движении вращательного элемента. Она содержит, преимущественно нормальную центробежную силу, т.е. составляющую силы инерции. Тангенциальная составляющая силы инерции так же имеет существенное значение. Она влияет на переходные процессы, а для некоторых схем вибраторов и на установившиеся режимы.

Подразделяют центробежные вибраторы на дисбалансные и планетарные:

У дисбалансного вибратора вращательный элемент, называемый дисбалансом, располагается в подшипниках, соединенных с корпусом вибратора, и неуравновешен относительно вращения по оси, которую определяют подшипники. Вращение дисбалансу придает механический

привод. Дисбаланс может вызывать статическую или моментальную неуравновешенность, либо обе одновременно.

Причиной возникновения статической неуравновешенности является вращательный элемент, движущийся вокруг оси, параллельной одной из его главных осей вращения.

В процессе вращения инерционного элемента вокруг основной оси, не схожих ни с одной из его основных центральных осей инерции, возникает моментная уравновешенность.

Вращательный элемент у планетарного вибратора, называемый в данной ситуации бегунком, обкатывается по поверхности корпуса и, соответственно, совершает два движения: собственное вращение и обкатку, которые связаны определенным передаточным отношением. Именно механический привод и задает одно из этих движений [9].

Инерционные вибраторы занимают основную долю рынка. К их главным преимуществам относят простоту конструкции и низкую стоимость. С их помощью возможно достижение высокого соотношения вынуждающей силы к массе вибратора в широком диапазоне частот колебаний. Так же следует отметить удобство плавного, либо ступенчатого регулирования частоты вибрации.

Электромагнитные вибраторы. В подобных устройствах во время воздействия переменного магнитного поля на ферромагнитные тела создаются силы, возбуждающие колебания. К достоинствам этих систем можно отнести надежность, а также простоту регулирования амплитуды и частоты [9]. К основным недостаткам относят большую массу и малую амплитуду создаваемых колебаний. Эти недостатки являются причиной нецелесообразности применения электромагнитных вибраторов в технологических процессах вибрационной обработки маложестких деталей.

Электродинамические вибраторы, в основе работы, которых лежит процесс взаимодействия постоянного поля с проводником. В проводнике протекает переменный электрический ток, который образовывается при переменной электродинамической силы. Эти вибраторы нецелесообразно использовать для обработки маложестких деталей, т.к. они имеют очень высокую стоимость.

Пневматические и гидравлические вибраторы. Эти устройства работают за счет энергии сжатого воздуха, либо пульсации жидкости. Они имеют высокую стоимость, как и электродинамические вибраторы. Также следует отметить, что гидравлические вибраторы характерны крупными габаритами, а для работы пневматических вибраторов необходимо производственное помещение, оборудованное сжатым воздухом.

По опубликованным работам авторов [30,31] были проведены исследования о наибольшей практической целесообразности применения при вибрационной обработке МЖД механических центробежных вибраторов с приводами от двигателей постоянного или переменного тока.

1.4 Развитие технологий вибрационной обработки

Подробный анализ и описание методов виброобработки представлен в таблице 1.

Таблица 1. Обзор патентной документации

№	Название, автор, страна, дата публикации	Номер охранного документа	Задача и решение технической проблемы.
1	2	3	4
1	Способ правки валов Русаков П.В. Горенко В.Г. СССР 15.05.1986	Авторское свидетельство № 1230715	Задача изобретения заключается в повышении качества правки путем уменьшения внутренних напряжений. Вал нагружают направленными в противоположные стороны статическими крутящими моментами, приложенными в сечениях вала, через которые действуют изгибающие силы.
2	Способ стабилизации формы осесимметричных деталей Мазур В.К. Драчев О.И. Акимов В.В. Клементьев А.В. СССР 15.10.1987	Авторское свидетельство № 1344455	Задача изобретения заключается в повышении эффективности процесса стабилизации формы осесимметричных деталей. К свободному концу детали прикладывают переменное по направлению силовое воздействие в виде крутящего момента, частота изменения направления которого равна собственной частоте крутильных колебаний детали, в результате чего создается равномерное по длине напряженное состояние.

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
3	<p>Вибровозбудитель</p> <p>Безъязычный В.Ф.</p> <p>Леонов Б.Н.</p> <p>Семенов А.Н.</p> <p>Ершов В.А.</p> <p>СССР</p> <p>07.08.1988</p>	<p>Авторское свидетельство № 1344455</p>	<p>Задача изобретения заключается в расширении функциональных возможностей за счет обеспечения регулирования амплитуды колебаний, ее стабильности при изменении нагрузки и расширения диапазона частоты колебаний.</p> <p>Вибровозбудитель, за счет регулировочных болтов, которые позволяют изменять расстояние между шарикоподшипниками, т.е. регулировать амплитуду колебаний, а количество роликов вместе с частотой вращения ротора обеспечивают заданную частоту колебаний.</p>
4	<p>Устройство для вибростабилизации</p> <p>Глейзер А.И.</p> <p>Корнеев Н.В.</p> <p>Драчев О.И.</p> <p>РФ</p> <p>20.01.2005</p>	<p>Патент № 2244755</p>	<p>Задача заключается в равномерном распределении переменных напряжений по всей поверхности детали.</p> <p>Устройство возбуждения колебаний деталей снабжено инерционной массой в виде массивного кольца, взаимодействующего с вибратором, пластины выполнены упругими и прикреплены к кольцу.</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
5	<p>Способ вибрационной обработки осесимметричных длинномерных деталей и устройство для его осуществления</p> <p>Расторгуев Д.А. Драчев О.И. Солдатов А.А.</p> <p>РФ 20.06.2005 г.</p>	<p>Патент № 2254192</p>	<p>Задача заключается в повышении стабильности форм и размеров в эксплуатационный период осесимметричных длинномерных мало жестких деталей.</p> <p>В данном способе вибрационной обработки валов, включающем установку вала в ступень и нагружение вала изгибающими и крутящими моментами, прикладываемыми эксцентрично его оси, вал размещают вертикально.</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
6	<p>Устройство для вибрационной обработки</p> <p>Расторгуев Д.А. Драчев О.И.</p> <p>РФ 20.05.2009 г.</p>	<p>Патент № 2355546</p>	<p>Задача изобретения заключается в повышении эффективности обработки маложестких длинномерных деталей с достижением следующих технических результатов: повышение степени стабилизации геометрии вала в межоперационный период за счет максимального снижения уровня остаточных технологических напряжений и обеспечения его равномерности по длине детали за счет амплитудно-модулированного воздействия на заготовку, общее снижение времени обработки из-за сокращения промежуточных, стабилизирующих структуру материала операций, снижение энергоемкости процесса изготовления вала за счет исключения термических стабилизирующих операций.</p> <p>Ротор в виде кулачков позволяет легко менять место приложения усилия путем их перестановки по длине заготовки, при этом расширяются технологические возможности за счет обработки валов различного диаметра. Кулачки с многогранным профилем позволяют задавать различные частоты, а также обеспечивать комплексную изгибно-крутильную форму колебаний за счет того, что при повороте заготовки с кулачком последний, соприкасаясь с роликом, закручивается и отжимается вместе с заготовкой. Расположение кулачков в местах пучностей колебаний соответствующих гармоник в заготовке позволяет обеспечить максимальную амплитуду за счет минимального демпфирования</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
7	<p>Способ вибрационной обработки осесимметричных длинномерных деталей и устройство для его осуществления</p> <p>Расторгуев Д.А. Драчев О.И.</p> <p>РФ 20.12.2009 г.</p>	<p>Патент № 2376093</p>	<p>Задача заключается в повышении эффективности и производительности обработки, снижение остаточных напряжений по длине заготовки, а также время и энергоемкость процесса.</p> <p>Вал устанавливают на опоры и нагружают его переменными изгибающими и крутящими моментами на резонансных частотах.</p>
8	<p>Установка для виброобработки маложестких деталей</p> <p>Бойченко О.В Драчев О.И Гранченко Д.В.</p> <p>РФ 20.04.2011 г.</p>	<p>Патент № 2416475</p>	<p>Задача заключается в повышении эффективности обработки маложестких осесимметричных деталей, достигаемой за счет расширения функциональных и технологических возможностей используемой установки для виброобработки</p> <p>В установке для виброобработки маложестких деталей, содержащей опоры для размещения в них детали, вибровозбудитель, выполненные с возможностью регулирования параметров процесса виброобработки</p>

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4
9	<p>Способ виброобработки маложестких деталей для снижения в них остаточных напряжений</p> <p>Бойченко О.В. Драчев О.И. Гранченко Д.В.</p> <p>РФ 20.07.2011 г.</p>	<p>Патент № 2424101</p>	<p>Задача заключается в повышении эффективности виброобработки, достижимой путем повышения эксплуатационной прочности деталей за счет регулируемого снижения в них уровня остаточных напряжений</p> <p>Деталь находится на опорах под воздействием виброколебаний. Опоры перемещают по длине детали для изменения расположения зон пучностей механических колебаний и измеряют температурное поле детали для характеристики распределения в ней остаточных напряжений</p>
10	<p>Устройство для вибрационной обработки металлических изделий</p> <p>Лбов А.А.</p> <p>РФ 27.11.2011 г.</p>	<p>Патент № 2434729</p>	<p>Задачей является разработка устройства для вибрационной обработки, в котором возможно оперативно изменять величину прикладываемой нагрузки, создаваемой устройством, воздействующую на обрабатываемое изделие.</p> <p>Устройство содержит установленный на опоре электродвигатель с двумя выходами приводного вала, на каждом из которых установлен дебаланс, который выполнен в виде двух дисков, на каждом из которых закреплен груз, центр тяжести которого смещен от центра вала, причем первый диск закреплен на валу, в каждом диске и грузе выполнены сквозные отверстия на одинаковом расстоянии от центра, второй диск соединен с первым резьбовым соединением через груз первого.</p>

1.5 Методы определения остаточных напряжений

Механические методы. Наибольшее распространение определения поверхностных напряжений получили механические методы. В первую очередь из-за простоты работы и конструкции, а также, немаловажным аспектом является использование схожих представлений о напряжен и короблении в твердом теле, как и при определении жесткости, устойчивости и прочности деталей. Это существенно снижает трудозатраты при анализе исследовательских результатов для изделий из различных материалов.

Предположения механического метода основаны на том, что отсечение и снятие поверхностного слоя изделия с остаточными напряжениями эквивалентны процессу внешнего механического воздействия на детали, с вновь образовавшимися обратными напряжениями на поверхности. Сравнивая первоначальные параметры детали с параметрами после процесса деформации, возможно определить остаточные напряжения.

Рентгеновские методы. Образование поверхностных напряжений в металлах, иначе называемыми поликристаллическими телами, способствуют возникновению у рентгеновских лучей, отраженных от поверхности образцов, различных интерференционных эффектов. Эти эффекты образуются в зависимости от размеров зоны уравнивания напряжений. На основании этого предложена классификация остаточных напряжений, которые описывались ранее...

Способы определения остаточных напряжений электромагнитных колебаний поверхностного слоя. Поскольку электромагнитные свойства зависят не только от внутренних напряжений, а сами эпюры остаточных напряжений имеют свойство изменяться по различным законам, то точность этих методов довольно низкая. Однако в производственных условиях эти методы имеют широкое применение из-за простоты использования, высокой производительности, возможности определения остаточных напряжений без

деформации изделия. Однако, как и в предыдущих способах, требуется последовательное снятие поверхностного слоя для построения полной эпюры напряжений. Данный метод необходимо сочетать с рентгеновскими или механическими методами, так как он не позволяет отдельно рассчитывать параметры остаточных напряжений. [12].

1.6 Цель и задачи работы

Опираясь на информацию, приведенную в п. 1.1-1.4, следует отметить:

- Рассмотренные теоретические и экспериментальные исследования по существующим технологическим процессам вибрационной обработки МЖД показывают, что на эксплуатационную точность и размерную стабильность маложестких деталей при их изготовлении доминирующее влияние оказывают физико-механические свойства, уровень остаточных напряжений и их неравномерность в продольном и поперечном сечениях заготовки, а также погрешности, вносимые упругими и пластическими деформациями, технологическими системами и самой обрабатываемой деталью.
- Проанализированные способы вибрационной обработки и устройства для их реализации показывают отсутствие единой и оптимальной технологии, позволяющей обеспечить равномерное напряженное состояние материала маложесткой детали. При этом ни один из существующих способов не обеспечивает возможности высокопроизводительной и точной вибрационной обработки, с учетом сохранения размеров детали с большим соотношением длины к поперечному сечению и эксплуатационного сохранения форм.
- Используемые способы вибрационной обработки не подтверждены адекватными математическими моделями происходящих в процессе воздействия в материале маложестких деталей процессов релаксации.
- В настоящее время нет промышленно применимой конструкции вибровозбуждающего устройства, которое могло бы быть применимо в технологическом процессе вибрационной обработке МЖД, обладая при этом относительной простотой, технологичностью крепления к обрабатываемой детали, удобством регулировок возмущающего усилия, амплитуды и частоты (которая должна обеспечивать возникновение первых трех резонансов)

На основе проведенного анализа сформулирована цель работы – повышение точности и стабильности формы осесимметричных мало жестких деталей, путем снижения и выравнивания остаточных напряжений путем вибрационной обработки.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать методику определения форм колебаний в зависимости от конструкторско-технологических параметров операции.
2. Разработать математическую модель параметров запасной энергии в зависимости от параметров вибрации.
3. Разработать двухчастотную установку для вибрационной обработки.
4. Оптимизировать параметры вибраций по критерию выравнивания запасенной энергии

2. Экспериментальное исследование вибрационной обработки маложестких валов

Как говорилось ранее, вибрационная стабилизация, проводимая в рамках технологического процесса изготовления маложестких деталей, направлена на повышение степени стабилизации геометрии вала в межоперационный и эксплуатационный периоды за счет максимального снижения уровня остаточных технологических напряжений и обеспечения его равномерности по длине детали, на общее снижение времени обработки из-за сокращения промежуточных, стабилизирующих структуру материала операций, на снижение энергоемкости процесса изготовления вала за счет исключения термических стабилизирующих операций. Это может быть достигнуто, дополнительно к традиционным методам, за счет амплитудно-модулированного воздействия на заготовку. Ниже приведено описание устройства для реализации данного метода.

За основу для проведения экспериментального опыта берется устройство для вибрационной обработки из патента № 2355546

“Устройство для вибрационной обработки содержит опоры 1 и 2, которые крепятся соответственно, в патроне станка 3 и обратном вращающемся центре в пиноли задней бабки 4 через конический хвостовик 5, который крепится к опоре винтами 6. Заготовка 7 (вал) фиксируется винтами 8 во втулках 9, которые упруго связаны пружинами 10. Кулачки 11 зафиксированы на хомутах 12 и имеют различный профиль рабочей поверхности 13. Винты 14 фиксируют кулачки 11 на хомутах 12, которые затянуты на валу 7 винтами 15. Ролики 16, контактирующие с профилем кулачков 11, свободно вращаются на осях 17. Держатель 18 через пружину 19 поджимается винтом 20 и перемещается в корпусе 21. Ограничителем хода держателя является стопор 22. Необходимое количество корпусов закрепляется в державке 23, которая крепится в резцедержателе станка (на рис. не показан). В опорах 1 и 2 направляющие 24 поджимают пружины 10.

Устройство для вибрационной обработки работает следующим образом. На заготовке 7 винтами 8 крепятся втулки 9. Направляющими 24 задается степень сжатия пружин 10. На хомутах 12 предварительно крепятся кулачки 11 необходимого профиля исходя из частоты колебаний. Винтом 20 задается усилие поджима держателя 18 с учетом необходимой амплитуды колебаний заготовки и ее жесткости. Зажимают опору 1 в патроне 3, а хвостовик 5 в пиноли 4. Заготовке 7 сообщают вращение с частотой n . При соприкосновении кулачков 11 и роликов 16 генерируются колебания заготовки 7 с частотой $k \cdot n$, где k – число выступов на кулачке 11. Амплитуда колебаний определяется профилем кулачка. Если колебания модулируют по амплитуде, держатели 18 выставляют таким образом, чтобы они находились каждый в пучности колебаний своей гармоники. За счет этого можно проработать всю заготовку с максимально возможной амплитудой.

Ротор в виде кулачков позволяет легко менять место приложения усилия путем их перестановки по длине заготовки, при этом расширяются технологические возможности за счет обработки валов различного диаметра.

Кулачки с многогранным профилем позволяют задавать различные частоты, а также обеспечивать комплексную изгибно-крутильную форму колебаний за счет того, что при повороте заготовки с кулачком последний, соприкасаясь с роликом, закручивается и отжимается вместе с заготовкой.

Расположение кулачков в местах пучностей колебаний соответствующих гармоник в заготовке позволяет обеспечить максимальную амплитуду за счет минимального демпфирования.

Использование нескольких кулачков позволяет одновременно проводить обработку на разных частотах, за счет чего модулировать амплитуду колебаний по длине детали, что позволяет проработать ее одновременно в нескольких необходимых сечениях.

Упорные ролики, подпружиненные к кулачкам с заданным усилием, задают амплитуду колебаний, обеспечивают непрерывность процесса за счет постоянного контакта кулачков и роликов.” [32]

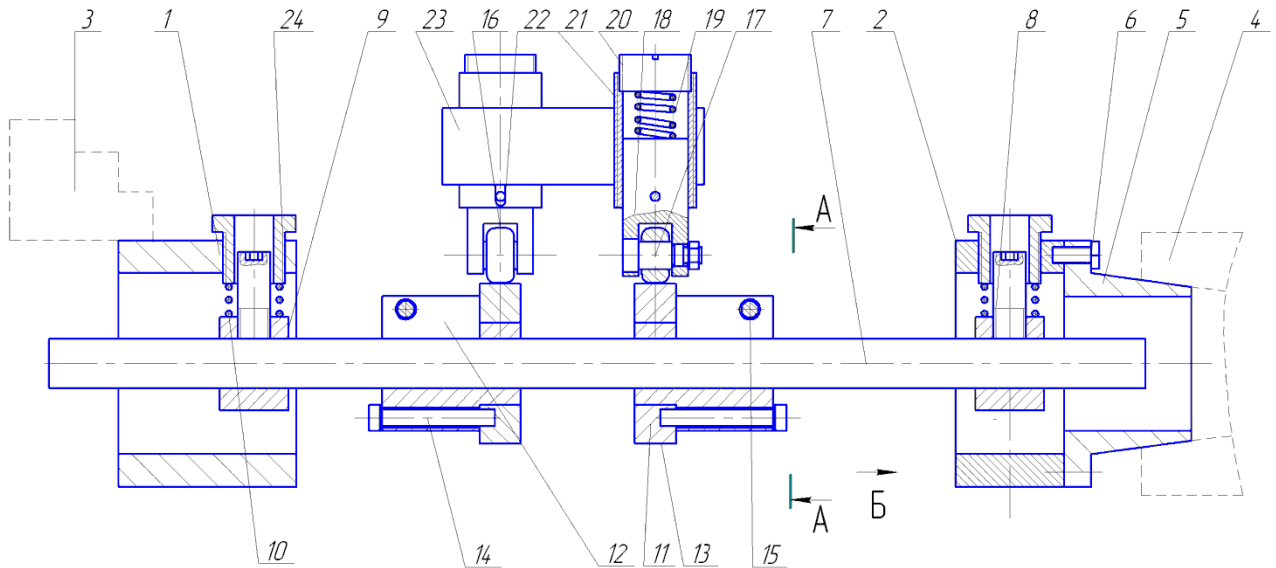


Рисунок 8. Устройство для вибрационной обработки

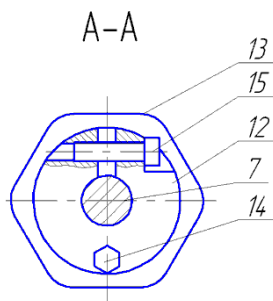


Рисунок 9. Крепление кулачка на валу

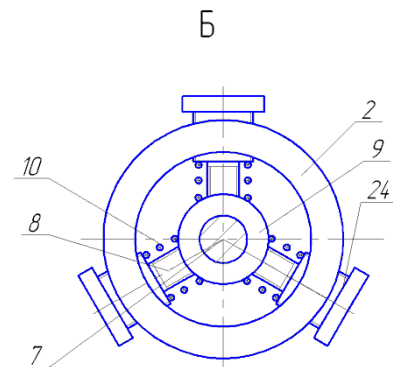


Рисунок 10. Опора вала

В ходе эксперимента будут смоделированы гладкий и многоступенчатый вал, а затем будет создана виртуальные условия закрепления и механические воздействия вибрационного кулачка.

3. Модальный анализ

В любом упруго деформируемом теле однократным импульсным (ударным) воздействием или периодическим действием вынуждающей силы можно возбудить колебания, характер которых может многое сказать о внутренней структуре тела. В случае однократного импульсного воздействия, называемом еще тест-ударом, в теле будут наблюдаться собственные свободные затухающие колебания (моды), а в случае периодической вынуждающей силы – вынужденные колебания с частотой вынуждающей силы.

Модальный расчет осуществляется с целью нахождения форм (мод) и частот собственных колебаний конструкций. Результатами модального анализа являются: формы и собственные частоты, обобщенные массы и декременты собственных тонов колебаний. Эти результаты будут являться исходными данными для последующих видов динамических расчетов, таких как спектральный анализ, гармонический расчет и анализ переходных процессов. Любые виды нелинейности, такие как конечные перемещения, контактные граничные условия, нелинейное поведение материала – игнорируются. В зависимости от своего исходного состояния, контакты остаются закрытыми или открытыми.

В результате импульсного воздействия в упругом теле, в зависимости от его формы, могут возбудиться собственные продольные, поперечные, крутильные, изгибные, поверхностные и другие виды стоячих волн, для которых характерны «узлы» – точки с минимальной амплитудой колебаний и «пучности» – точки с максимальной амплитудой колебаний, располагающиеся между «узлами» (или на свободных концах тела). Каждый вид колебаний (продольные, поперечные и др.) представляется набором мод, причем минимальная по номеру мода имеет минимальную собственную частоту и характеризуется минимальным затуханием по сравнению с модами более высокого порядка.

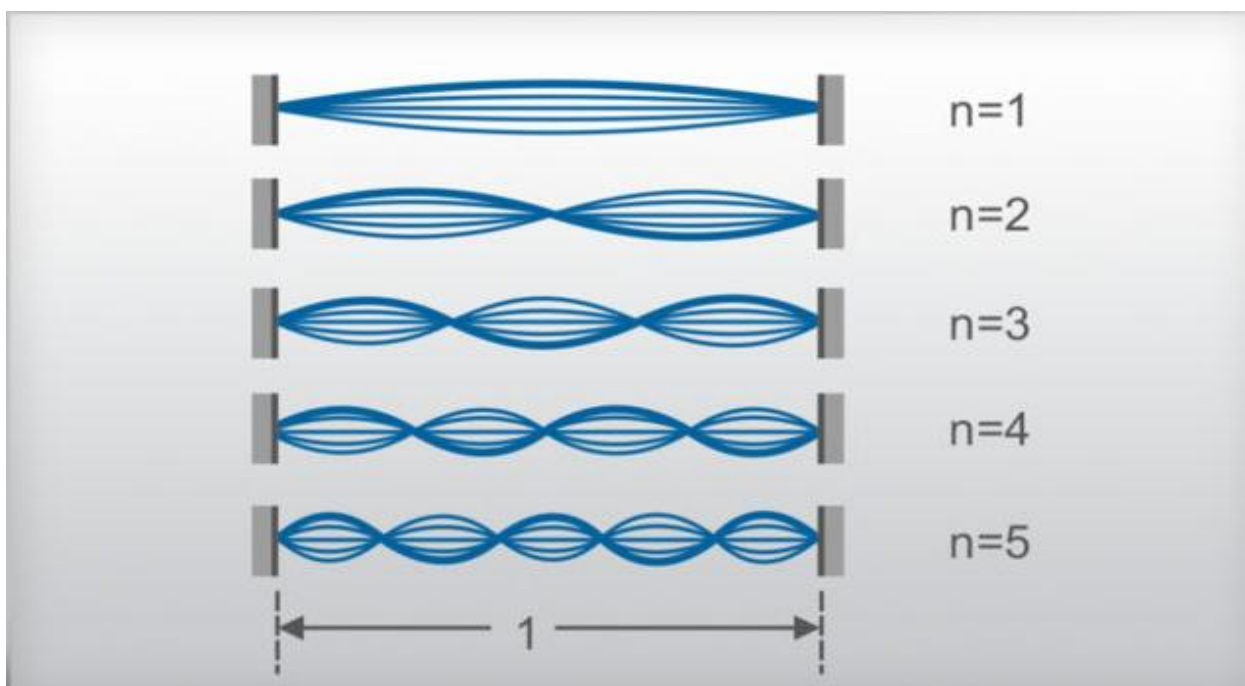


Рисунок 11. Моды поперечных колебаний

Дискретные уравнения движения конструкции можно представить в виде матричного уравнения, используя для этого метод конечных элементов [33]:

$$[M]\{u_1\} + [C]\{u_1\} + K u = \{F\} \quad (1)$$

где u – вектор узловых перемещений для всего тела, $u_1 / \{u_2\}$ – векторы ускорения и скоростей точек тела, $K ; C ; [M]$ – «глобальные» матрицы жесткости, демпфирования и масс для всего тела, $\{F\}$ – вектор эквивалентных узловых сил для всего тела.

3.1. Проведение модального анализа

Процедура модального анализа состоит из шести основных шагов [33]:

1. Задание материала
2. Создание объемной твердотельной модели изделия.
3. Задание закреплений. Наложение граничных условий.
4. Проектирование конечно-элементной сетки
5. Выполнение расчета
6. Анализ результатов.

Вначале создадим модальный расчет в программе ANSYS:

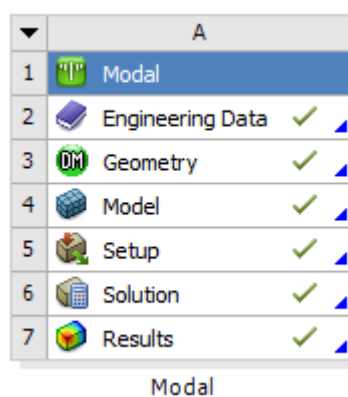


Рисунок 12. Модальный расчет

3.2.1. Задание материала

В начале расчетов задаются свойства материала «С операции». В стандартной версии Ansys это позволяет осуществить библиотека материалов, которую можно использовать в процессе виртуального моделирования. Так же пользователь может изменять библиотеку с помощью функции пополнения базовой библиотеки другими материалами или изменять параметры уже существующих материалов в зависимости от условий будущего расчета. Помимо этого, САЕ-пакет Ansys содержит собственную независимую базу материалов. Она позволяет определить физико-механические параметры анализируемых изделий. Необходимо, чтобы свойства материала были изотропными, ортотропными или

линейными, а также постоянными или зависящими от температуры. Нужно задать как массовые (плотность), так и жесткостные (модули упругости) параметры рабочей среды. Нелинейные свойства: нелинейная упругость, пластичность, ползучесть - игнорируются. В случае, если в расчетной модели присутствует демпфирование, то необходимо определить демпфирующие свойства элементов и материалов.

Выберем для нашего расчета материал «Конструкционную сталь» из стандартной библиотеки материалов. Материал будет содержать следующие свойства:

Таблица 2. Свойства материала

Плотность	7850 кг/м ³
Модуль Юнга	2E+11 Па
Коэффициент Пуассона	0,3
Объемный модуль	1,6667E+11 Па
Модуль сдвига	7,6923E+10 Па
Предел текучести при растяжении	2,5E + 8 Па
Предел текучести при сжатии	2,5E + 8 Па
Предел текучести при растяжении	4,6E + 8 Па

3.2.2 Создание объемной твердотельной модели изделия

В качестве опытных образцов, будут использоваться два типа валов: длинномерный гладкий вал и длинномерный многоступенчатый вал. Для организации расчетов частотного анализа нужно спроектировать трехмерную модель детали. Обе модели будут спроектированы в трехмерном CAD-пакете SolidWorks. Чертежи опытных образцов представлены в приложении. (См. приложение)

Опираясь на технологический чертеж, изобразим математическую модель вала после токарной черновой обработки.

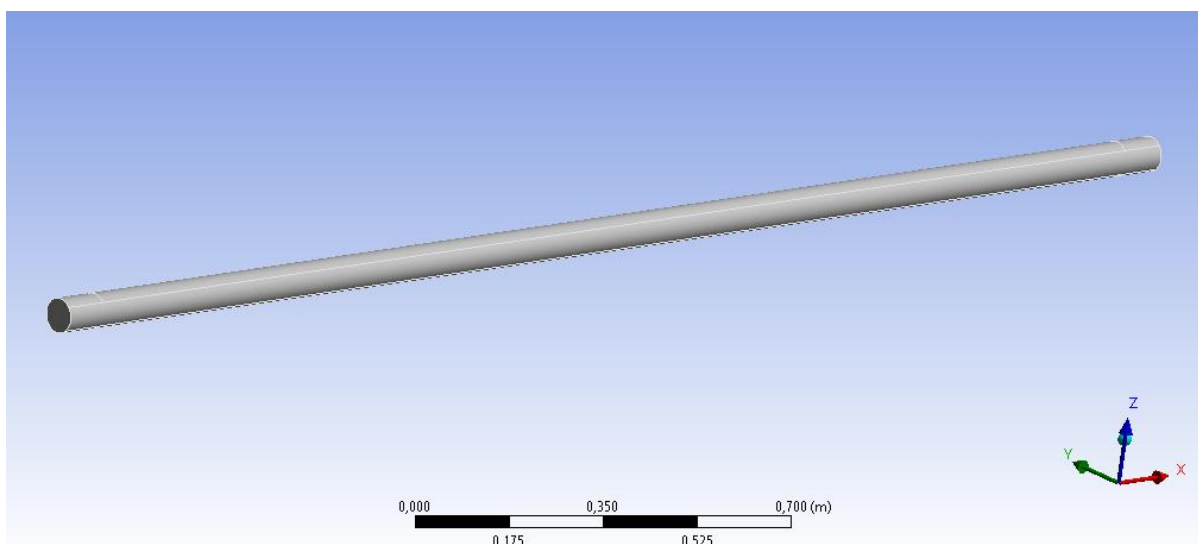


Рисунок 13. Математическая модель длинномерного гладкого вала

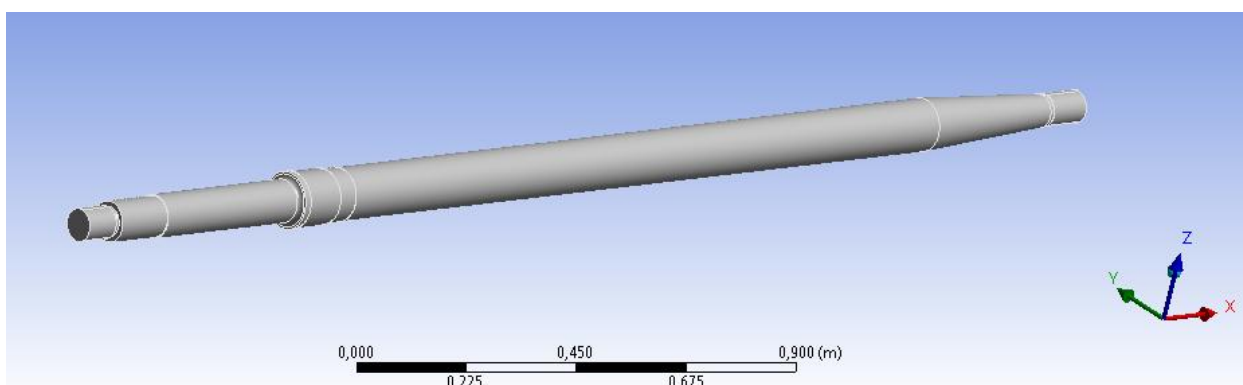


Рисунок 14. Математическая модель длинномерного многоступенчатого вала

3.2.3 Наложение граничных условий. Задание закреплений

Для дальнейших расчетов, после проектирования математических моделей необходимо импортировать из CAD пакета SolidWorks в CAE пакет Ansys.

В первую очередь необходимо правильно определить граничные условия, необходимые для успешного решения физической задачи в конечно-элементной постановке. В модальном анализе к граничным условиям относятся условия закрепления. Для задания закреплений в ANSYS используются две основные команды: «Жесткая опора» и «Упругая опора». Команда «Жесткая опора» применяется к граням, вершинам и ребрам

трехмерного тела и определяет, что данный элемент модели полностью неподвижен. Иными словами, что деталь не меняет своего положения под действием приложенных к системе нагрузок и сохраняет свое первоначальное расположение. С помощью команды «Упругая опора» возможно определить заданное положение элементов трехмерного тела или ограничить изменение положения модели в определенных координатных направлениях.

Несмотря на то, что модальный расчет может быть осуществлен и для незакрепленной (свободной) детали, в данном случае необходимо задать условия базирования, так как нам потребуется выполнять статические расчеты.

Зададим условия закрепления для нашей детали. Необходимо изобразить виртуальную имитацию закрепления заготовки винтами во втулках, которые зажимаются в кулачковом патроне. Для этого используем команду «Жесткая опора», и указываем четыре области закрепления вала, чтобы ограничить его по осям Y и Z глобальной системы координат.

Схема закрепления при модальном расчете для обоих типов валов будет идентична.

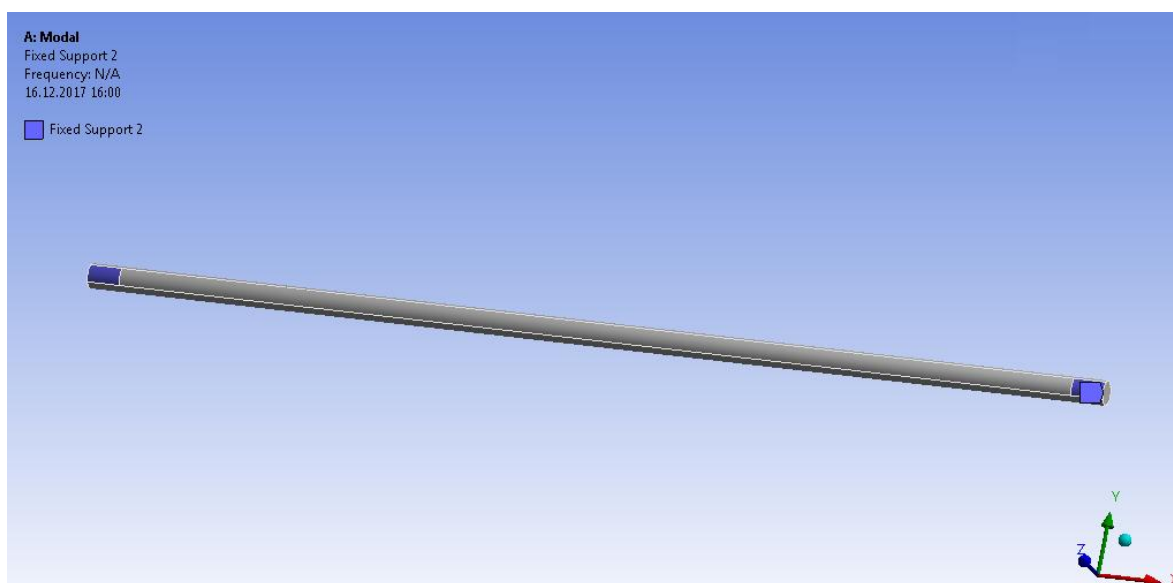


Рисунок 15. Базирование гладкого вала

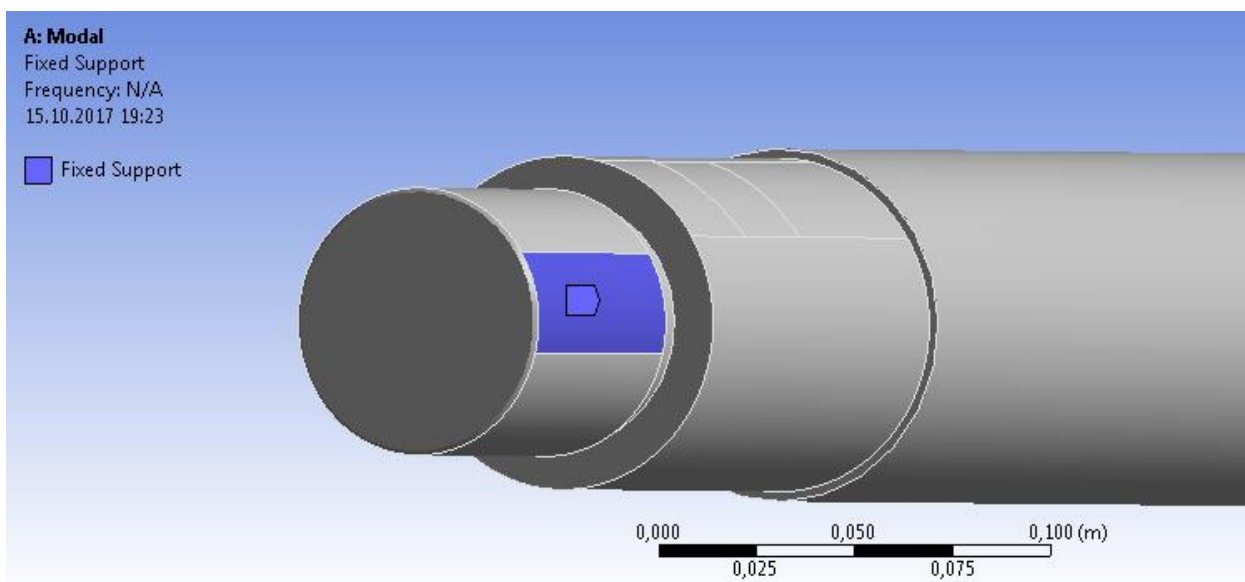


Рисунок 16. Базирование многоступенчатого вала

3.2.4 Генерация конечно-элементной сетки

Для проведения конечно-элементного моделирования нужно осуществить построение расчетной сетки из тетраэдральных элементов. При создании «Задачи» моделирование такой сетки проецируется автоматически. Конечно-элементная сетка может существенно повлиять на точность получаемых решений в случае со сложной пространственной ориентацией изделий. При проецировании сетки необходимо определить степень деления на тетраэды твердотельной модели, указывая в свойствах ориентировочный размер конечных элементов, с помощью которых будет задана математическая модель изделия. Как правило, более мелкое разбиение обеспечивает более точные результаты. Если результаты решения (собственные частоты) перестают заметно меняться при использовании более густой сетки, то можно со значительной долей уверенности считать, что достигнут определенный оптимальный уровень дискретизации и что дальнейшее увеличение дискретизации сетки нерационально.

При помощи команды «Виртуальная топология» необходимо соединить поверхности всех скруглений и фасок. Это позволит добиться более плавного перехода тетраэдов и более равномерного моделирования

конечно-элементной сетки.

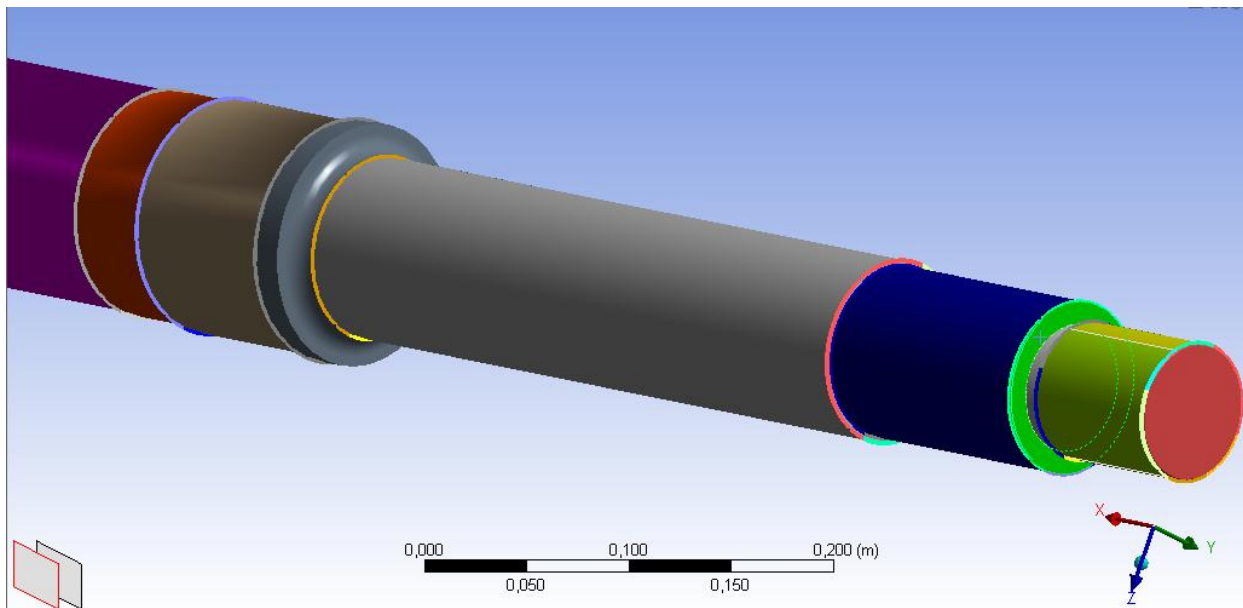


Рисунок 17. Проектирование виртуальной топологии

Методом подбора, моделируем наиболее оптимальную сетку.

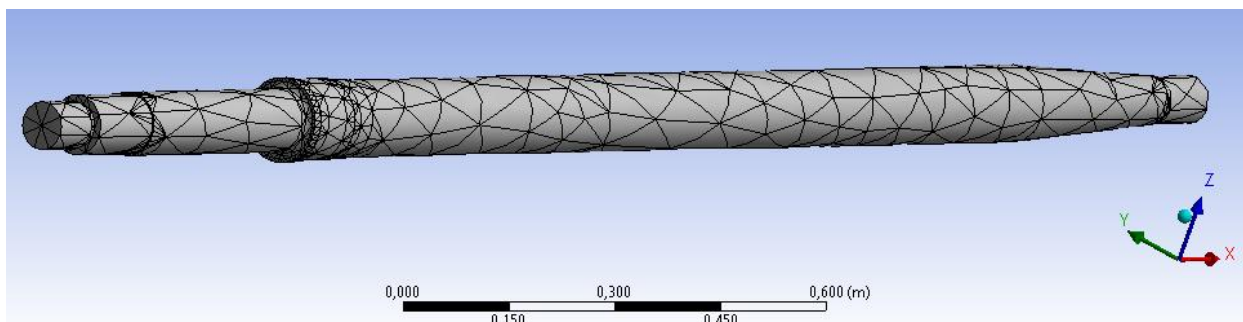


Рисунок 18. Конечно-элементная модель многоступенчатого вала

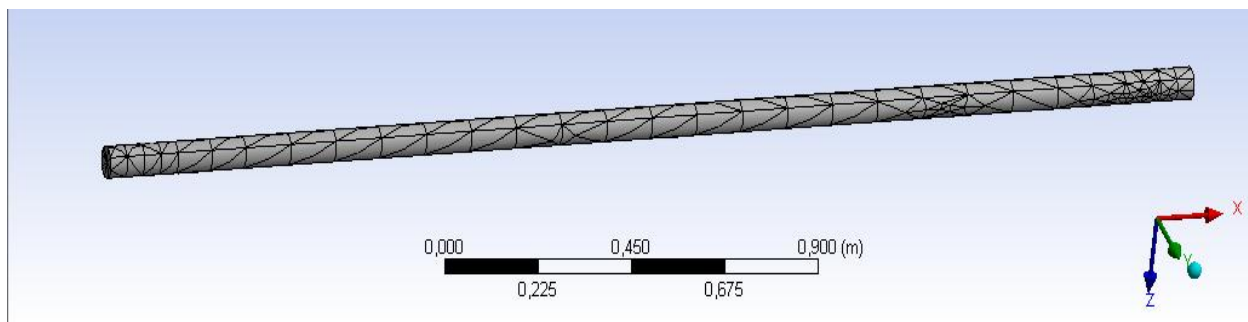


Рисунок 19. Конечно-элементная модель гладкого вала

3.2.5 Выполнение расчета собственных частот

После наложения граничных условий и создания конечно-элементной сетки следует выполнить команду «Расчет» и запустить процесс формирования систем линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) и их решения. В свойствах процессора нужно задать такие дополнительные свойства, как количество нижних собственных частот вала и точность вычислений, подлежащих определению. Почти вся энергия внешних колебаний суммируется с несколькими нижними гармониками детали, поэтому при модальном анализе в первую очередь важно определить первые три-пять наименьших собственных частот.

Задаем шесть мод и рассчитываем валы на собственные частоты.

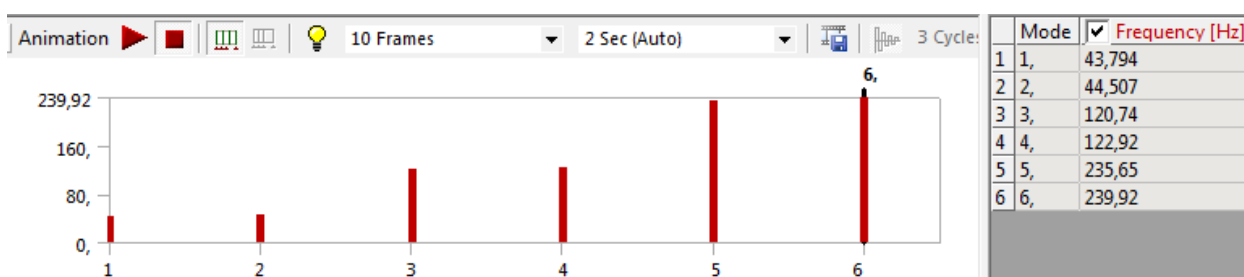


Рисунок 20. Таблица и график собственных частот гладкого вала

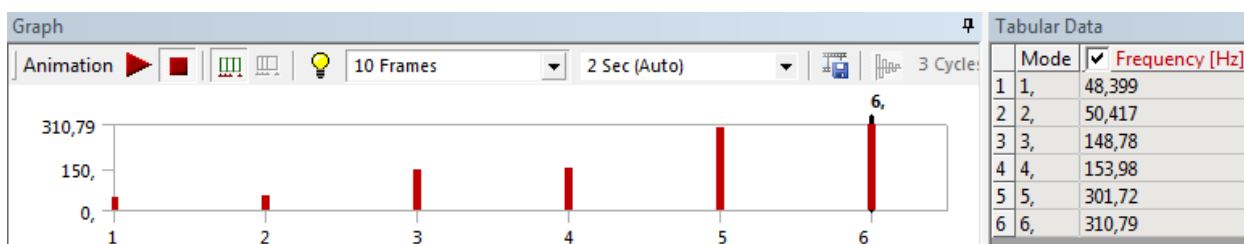


Рисунок 21. Таблица и график собственных частот многоступенчатого вала

Видно, что оболочка обоих валов имеет кратные собственные частоты, что характерно для конструкций с осевой симметрией.

3.2.6. Анализ результатов расчета

Результатами модального расчета являются собственные частоты детали и соответствующие ей собственные формы колебаний. Формы колебаний представляют собой относительные амплитуды перемещений конструкции в узлах конечно-элементной сетки. По ним можно определить характер движения, осуществляемого системой на частоте колебаний, соответствующей собственной. Анализ результатов осуществляется в модуле постпроцессора системы ANSYS. Постпроцессор полностью интегрирован в среду геометрического моделирования и обладает полным набором удобных инструментов по обработке результатов моделирования (анимацией, динамическим зондированием результатов, гибкой настройкой шкалы и т.п.

На следующих рисунках приведены формы собственных колебаний для различных тонов. Все найденные формы имеют некоторое количество полуволн по окружности и одну полуволну по длине образующей.

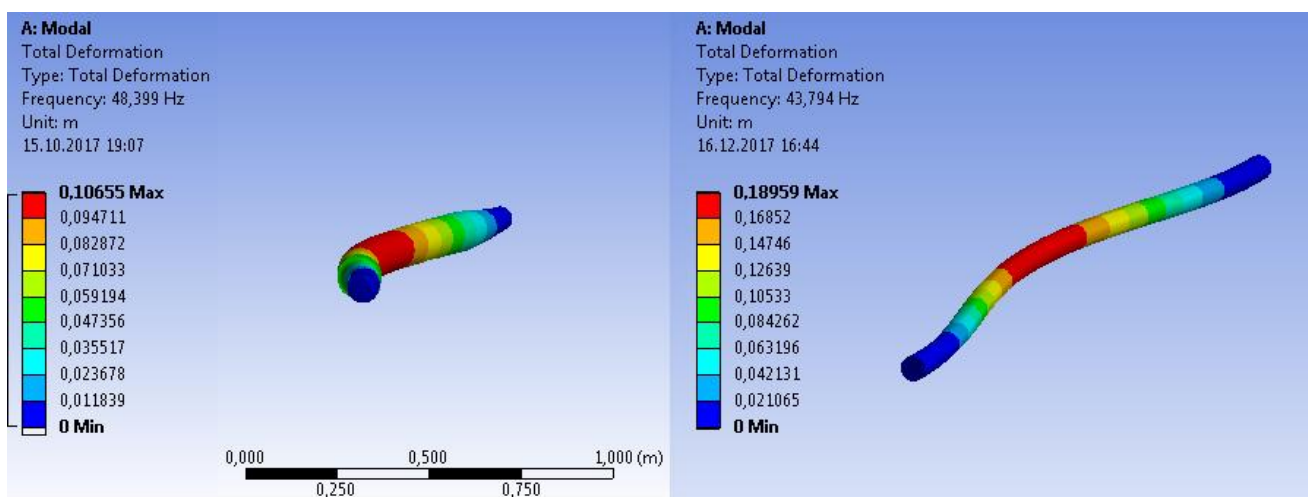


Рисунок 22. Форма колебаний по первой моде

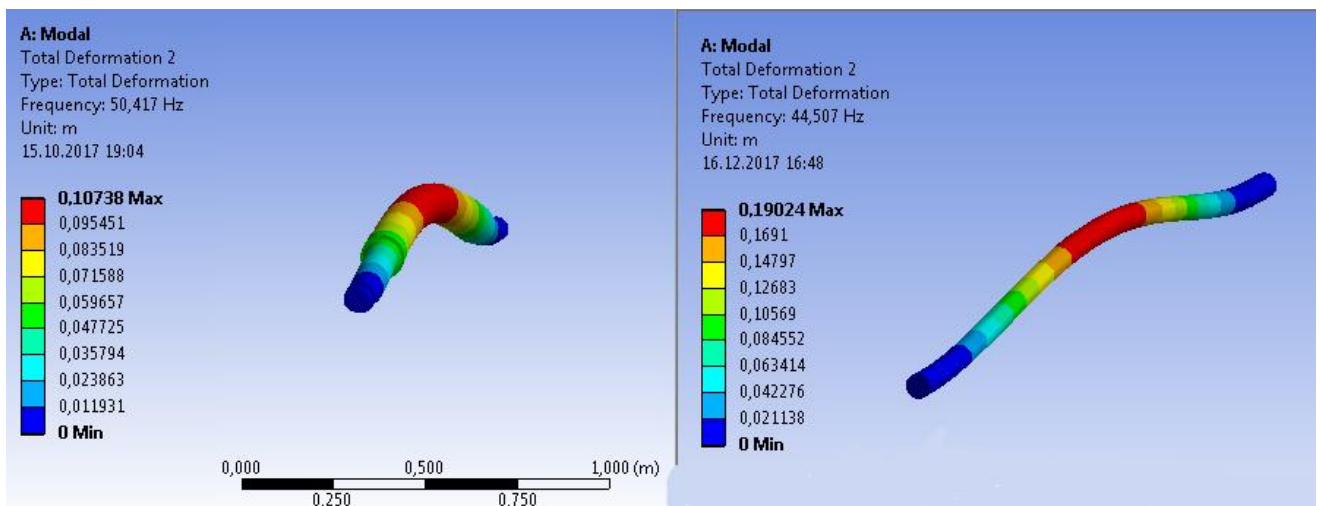


Рисунок 23. Форма колебаний по второй моде

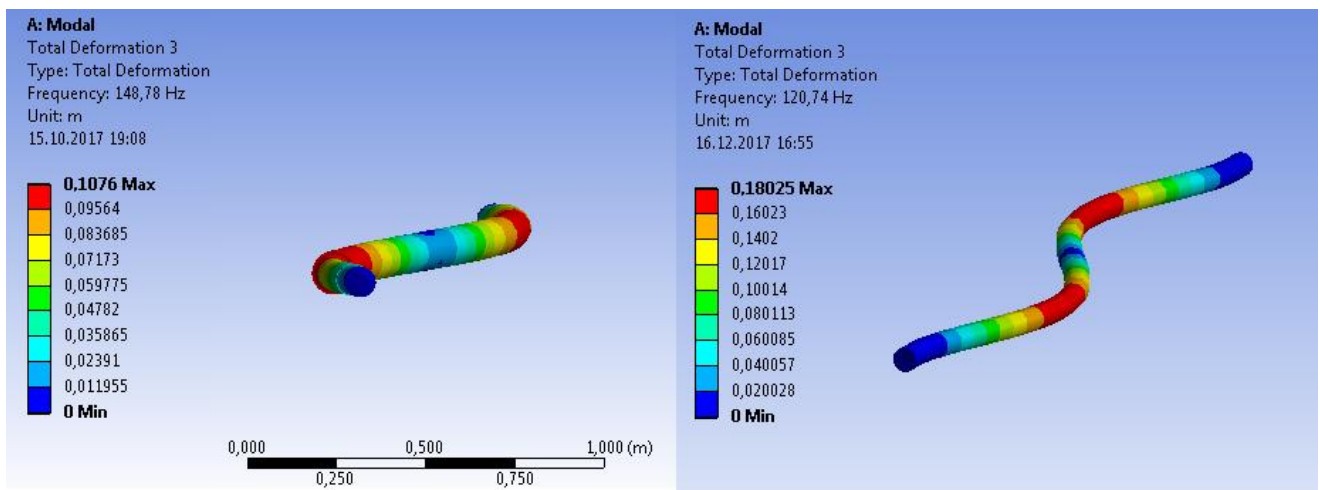


Рисунок 24. Форма колебаний по третьей моде

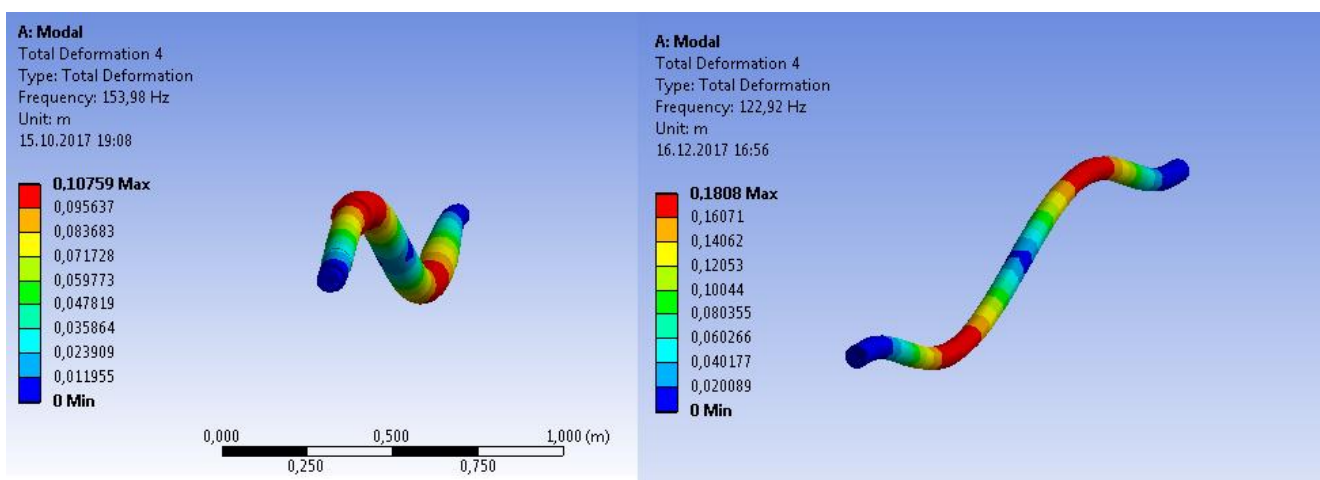


Рисунок 25. Форма колебаний по четвертой моде

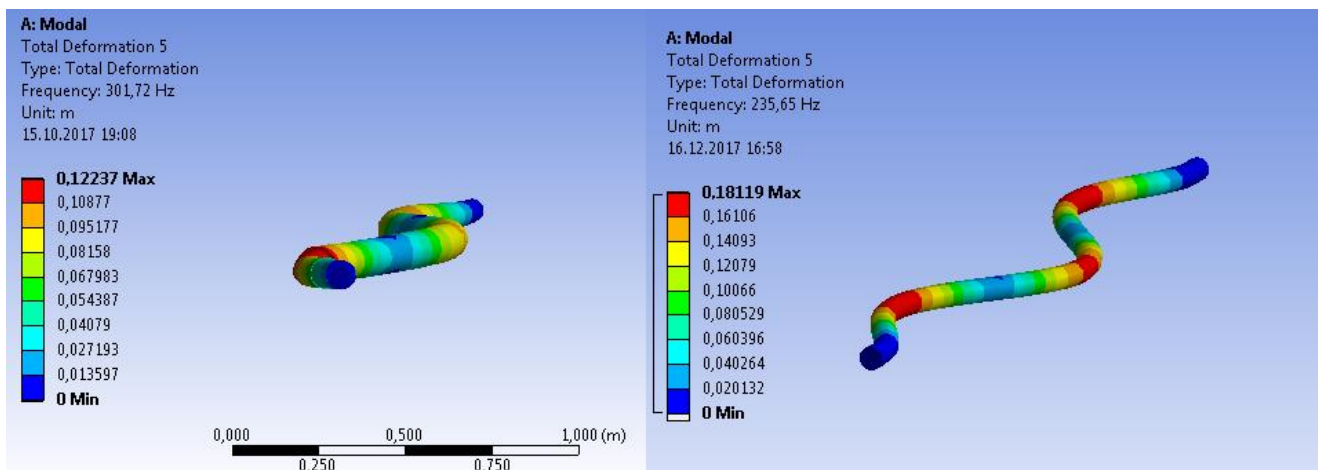


Рисунок 26. Форма колебаний по пятой моде

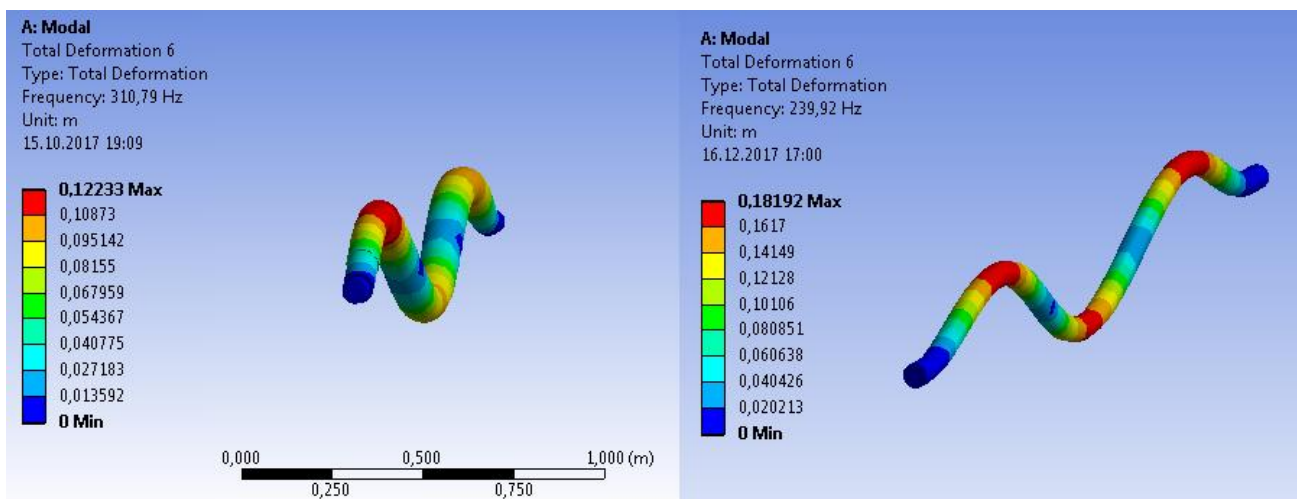


Рисунок 27. Форма колебаний по шестой моде

Для лучшего понимания характера динамических процессов целесообразно использовать специальный инструмент анимации результата, который позволяет увидеть и оценить характер движения в реальном масштабе времени.

4 Гармонический анализ

Гармонический анализ служит для моделирования уравнений движения в процессе установившихся вынужденных колебаний (колебательных процессов).

4.1. Методы решения уравнения

Существует три метода проведения гармонического расчёта в САЕ пакете ANSYS: полный, сокращенный и метод суперпозиции мод. Помимо того, проблема с применением вынужденных колебаниях может быть решена методами переходного интегрирования динамических уравнений (Analysis of Transient Dynamic), но это более требовательный метод в плане мощностей вычислительной техники. Вначале рассмотрим достоинства и недостатки каждого метода.

4.1.1. Полный метод.

Достоинства метода:

- отсутствие необходимости в выборе мастер-степеней свободы и определения гармоник собственных колебаний;
- использует полные матрицы, поэтому необходимость в применении матрицы масс конечного элемента - отсутствует;
- возможность работы с матрицами, (используемыми в акустических расчетах) элементы которой несимметричны относительно главной диагонали;
- за один проход вычисляет все перемещения и напряжения;
- допустимы все виды нагрузок: поверхностные и объемные (элементные) нагрузки (давление и температура), ненулевые перемещения, узловые силы.

К недостаткам относится то, что этот метод более затратный в плане затрат ресурсов вычислительной техники, в особенности при выборе фронтального решателя.

При использовании полного метода уравнение решается непосредственно с помощью комплексной арифметики.

4.1.2. Сокращенный метод.

В отличие от полного, сокращенный метод способен значительно сократить размер задачи, сокращая размер матриц и используя мастер-степени свободы. После вычисления мастер-степеней свободы, Ansys позволят расширить решение до полного состава степеней свободы.

Достоинства метода:

- по сравнению с полным методом, сокращенный – дешевле, в плане технологических ресурсов, быстрее;
- способен учесть предварительные напряжения.

Недостатки метода:

- на начальном этапе определяются только мастер-степени свободы; для определения полного состава степеней свободы необходим второй этап – «экспандирование»;
- все нагрузки необходимо прикладывать к заданным мастер-степеням свободы, что, своевременно, снижает значения поверхностных и объемных нагрузок.

Существуют, так называемые «мастер» - неизвестные, наиболее существенные степени свободы среди всех известных, определяющие поведение конструкции. Считается, что только в «мастер» - неизвестных сосредоточены массы. Через «мастер» - неизвестные выражаются оставшиеся неизвестные, что приводит к решению, идентичному по виду, но меньшего размера, которое затем определяется подобно полному методу.

4.1.3. Метод суперпозиции мод.

Для определения отклика конструкции метод суперпозиции мод использует формы собственных колебаний (собственные векторы).

Достоинства метода:

- для большинства решений данный метод быстрее и «дешевле» полного и сокращенного методов;
- в гармоническом анализе могут быть учтены нагрузки на элементы и прилагаемые в рассмотренном выше модальном анализе;
- позволяет построить кривую зависимости отклика от частоты, а именно получить решение, сгруппированное около собственных частот конструкции;
- возможно учесть предварительные напряжения;
- позволяет учитывать коэффициент демпфирования (модальное демпфирование как частотную функцию)

Недостатком метода суперпозиции мод является невозможность нагружения различными напряжениями.

Ограничения, общие для всех трех методов:

- все нагрузки необходимо изменять с одной и той же частотой, а также по гармоническому закону и по времени;
- гармонический расчет, как и модальный, используется только с линейными моделями; иные нелинейные введения (нелинейные свойства материала, контакты) игнорируются; необходимо задать как модуль упругости (модуль Юнга), так и объемно-массовые характеристики сред;
- эффекты, присущие переходным процессам, не вычисляются.

В те моменты, когда частота воздействий совпадает с собственными частотами конструкции, достигается максимальный отклик на внешнее механическое воздействие. Следовательно, необходимо провести модальный анализ и определить собственные частоты до проведения гармонического расчета.

Для анализа установившихся вынужденных гармонических колебаний, метод суперпозиции мод (МСМ) задействует собственные частоты и формы колебаний.

4.2. Проведение гармонического анализа методом разложения по собственным модам.

Как говорилось выше, МСМ для вычисления отклика на гармоническое воздействие задействует найденные ранее собственные моды. Процедура вычисления этого метода включает четыре основных пункта:

- Проектирование модели;
- Проведение модального расчета;
- Проведение гармонического анализа методом суперпозиции мод;
- Анализ результатов.

Так как решение задачи на собственные частоты и формы и построение модели были выполнены в модальном анализе, при создании расчетного блока гармонического расчета, создадим связь с блоком модального расчета. В этом случае Ansys задействует формы частотных колебаний, полученные в модальном анализе. Файл собственных мод будет содержать ту же самую модель, для которой был проведен модальный анализ.

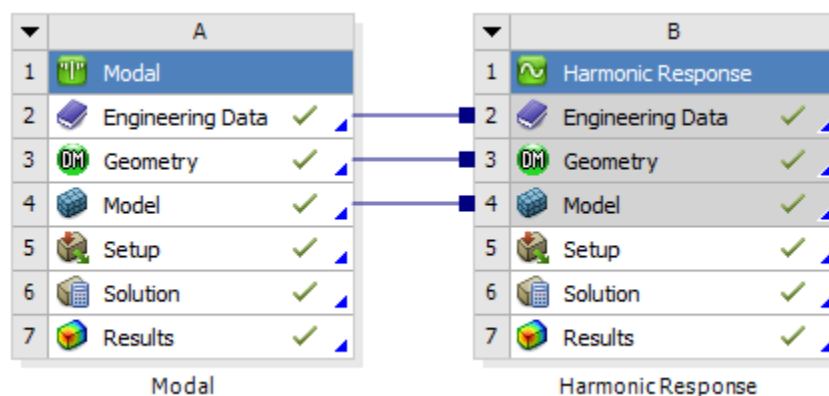


Рисунок 28. Блочная связь

4.2.1. Получение гармонической реакции методом суперпозиции мод

На данном этапе необходимо задать частотный интервал и максимальный/ минимальный диапазон. Число мод должно быть выбрано так, чтобы их частотный диапазон был больше, чем частотный диапазон приложенных сил.

Таблица 3. Задание диапазона

Тип вала	Минималь- ный диапазон (1 мода)	Минималь- ная собственная частота (1 мода)	Максималь- ная собственная частота (6 мода)	Максималь- ный диапазон (6 мода)
Много- ступенчатый	40 Гц	46,672 Гц	306,63 Гц	320 Гц
Гладкий	40 Гц	43,701 Гц	238,3 Гц	245

Частотный интервал задаем в размере 30 делений

Максимальная пластическая деформация достигается при резонансе вынужденных вибраций с собственной частотой колебаний вала. Помимо этого, необходимо задать экспериментальные условия для обоих валов.

Прежде всего необходимо разработать план эксперимента

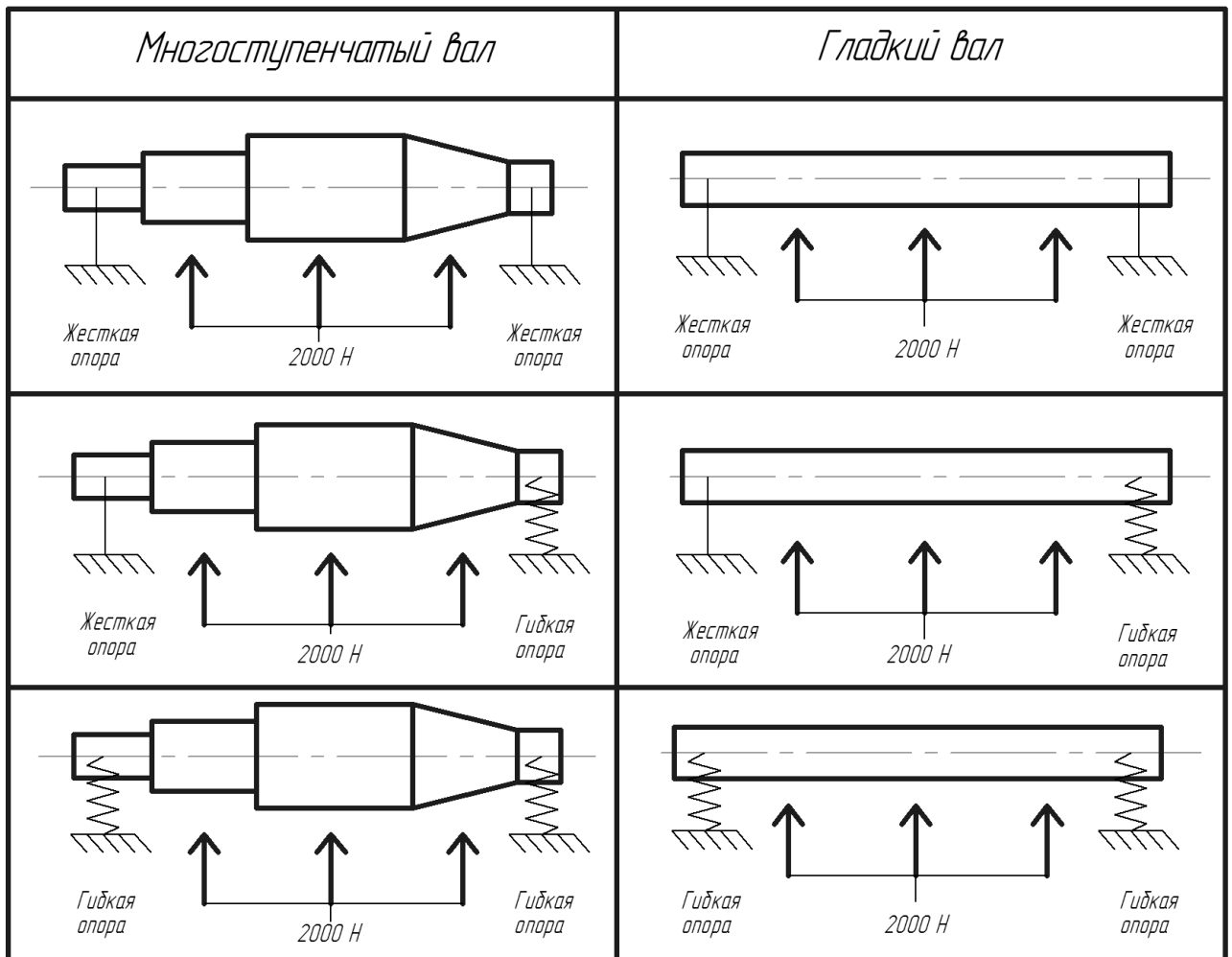


Рисунок 29. План эксперимента

Гладкий и многоступенчатый вал поочередно закрепляются с обеих концов на жесткой и гибкой опоре. Усилие гибкой заделки – 10 Н. Далее на валы поочередно оказывается механическое воздействие при помощи вибрационного кулачка с силой в 2000Н по центру, с левой и правой стороны. Эксперимент проводится в нормальных температурных условиях в 22С°

Прежде всего, необходимо определить частотные характеристики для каждого экспериментального варианта.

Frequency Response

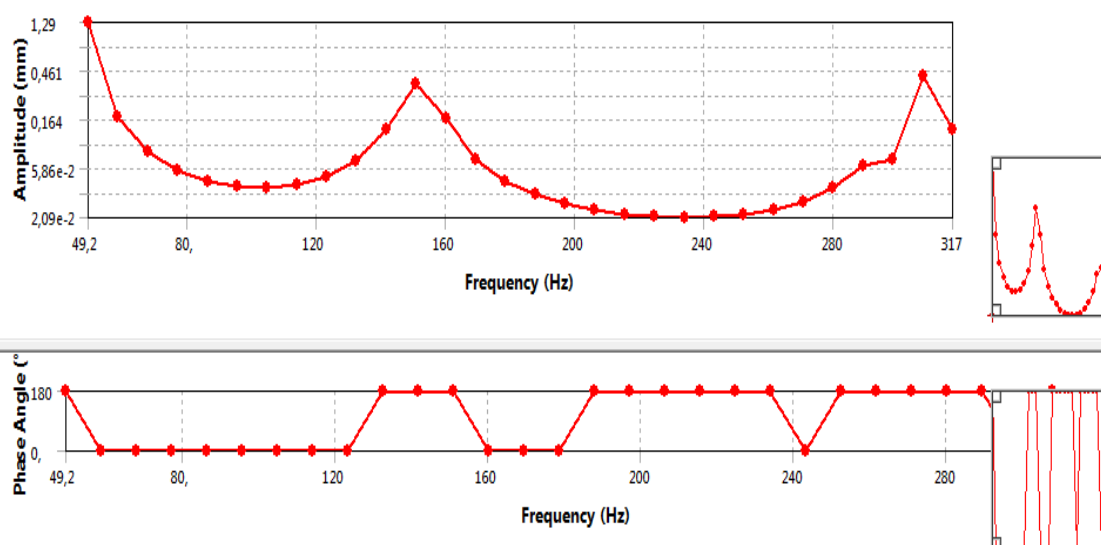


Рисунок 30. Частотная характеристика для многоступенчатого вала, закрепленного жесткой заделкой при воздействии кулачка с левой стороны.

Все полученные результаты АЧХ для каждого экспериментального варианта отображены в приложении данной работы.

На данной АЧХ наглядно видны амплитудные пики, на которых происходит резонанс с собственной частотой колебаний вала. На данных частотах происходит максимальная деформация вала. Исходя из результатов частотных характеристик, аналогично определяем максимальные амплитудные пики для каждого экспериментального варианта.

Таблица 4. Частотные отклики

Тип вала	Частотные отклики, Гц
Многоступенчатый	49,23/ 95,4/ 123,1/ 141,57/ 206,2/ 243,13/ 307,77
Гладкий	46,83/ 94,7/ 163/ 197,17/ 238,17

Затем проведем деформационный расчет вала.

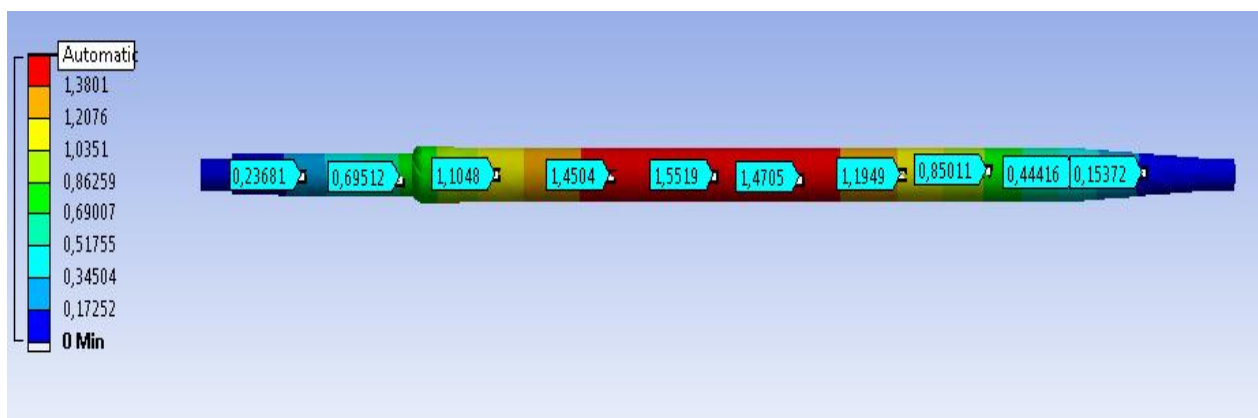


Рисунок 31. Расчет деформации многоступенчатого вала.

На данном примере вал закреплен с обоих концов на жестких опорах. Вибрационный кулачок воздействует с левой стороны с резонансной частотой в 49,23 Гц.

Далее разделяем вал на 12 сечений и определяем величину смещения от оси в каждом из них. По полученным результатам видно, что максимальное смещение вала от оси происходит посередине с величиной 1,55 мм.

Аналогично, опираясь на ранее составленную схему эксперимента, рассчитываем все варианты.

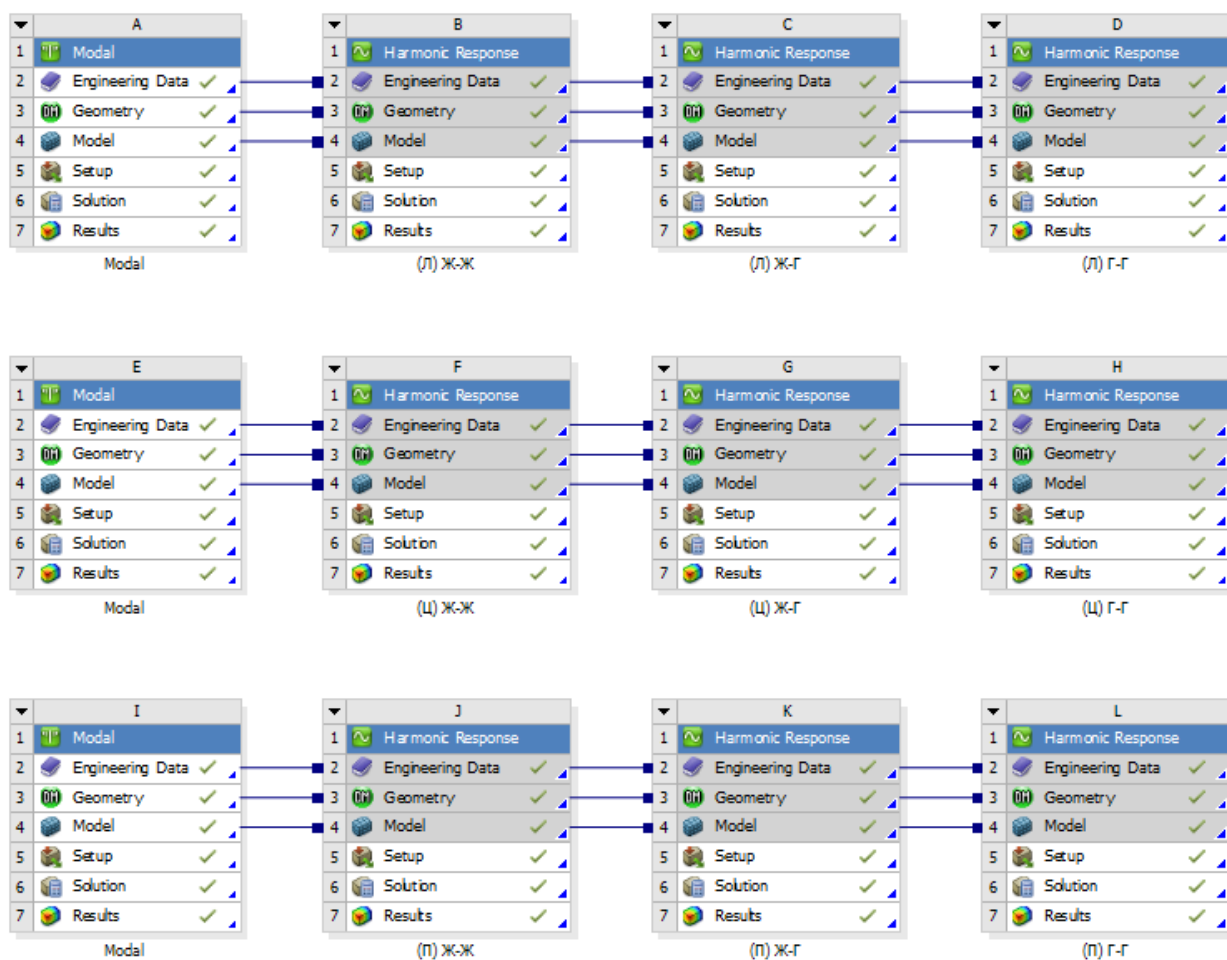


Рисунок 32. Экспериментальный план для многоступенчатого вала.

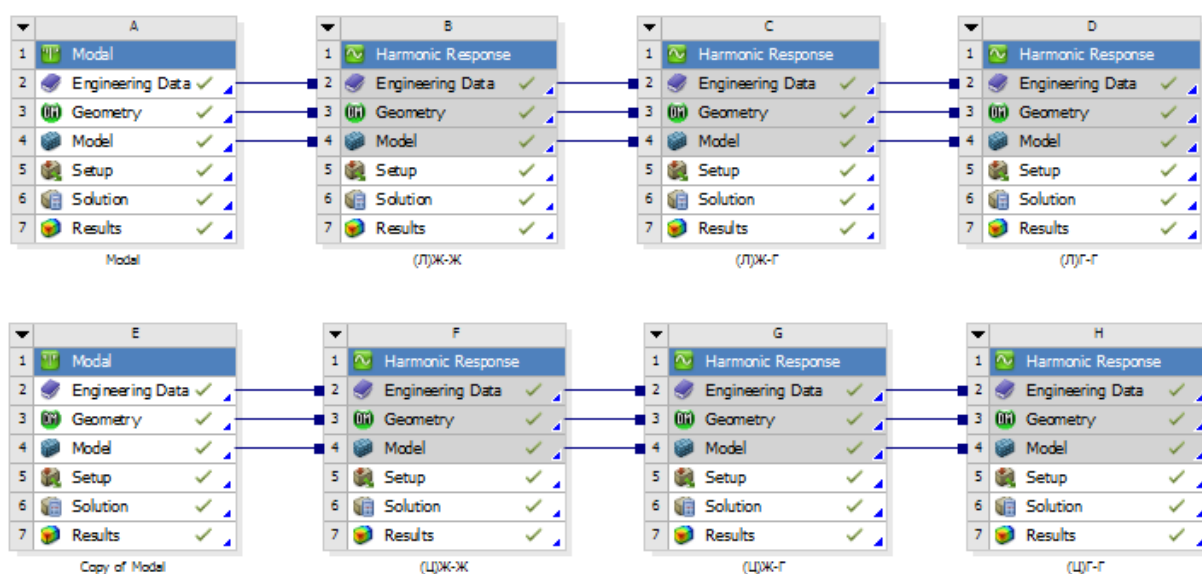


Рисунок 33. Экспериментальный план для гладкого вала.

Для каждого экспериментального положения вибрационного кулачка создана сводная таблица, которая разбита на три блока с различными схемами установки, которые соответствуют плану эксперимента.

Так как гладкий вал является симметричным, то значения при воздействии вибрационного кулачка с левой и правой стороны – являются одинаковыми, из-за чего результаты для левого и правого положения кулачка сведены в единую таблицу.

Для удобства понимания, **красным цветом** отмечены зоны максимального отклонения от оси. **Синим цветом** отмечены частоты с минимальным отклонением. **Зеленым цветом** отмечены частоты с наиболее равномерным распределением деформации по длине вала.

Таблица 5. Смещение оси многоступенчатого вала от прямой при различных схемах установки при воздействии кулачка по левой стороне вала

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Жестка опора - Жесткая опора												
Частота 49,23	0	0,2368	0,6951	1,1048	1,4504	1,5519	1,4705	1,1949	0,8501	0,4441	0,1537	0
Частота 95,4	0	0,0112	0,0234	0,0186	0,0055	0,0178	0,0341	0,0401	0,0368	0,0250	0,0089	0
Частота 123,1	0	0,0139	0,0427	0,0475	0,0322	0,0067	0,0331	0,0489	0,0433	0,0301	0,0109	0
Частота 141,57	0	0,0363	0,1039	0,1442	0,1284	0,0682	0,0479	0,1206	0,1348	0,0873	0,0361	0
Частота 206,2	0	0,0014	0,0013	0,0101	0,0216	0,0231	0,0083	0,0137	0,0239	0,0222	0,0108	0
Частота 243,13	0	0,0064	0,0125	0,0043	0,0132	0,0208	0,0148	0,0047	0,0153	0,0209	0,0096	0
Частота 307,77	0	0,1555	0,4489	0,3277	0,0722	0,3264	0,2857	0,0686	0,3528	0,3665	0,1225	0
Жестка опора - Гибкая опора												
Частота 49,23	0	0,0062	0,0167	0,0412	0,0741	0,1022	0,1208	0,1218	0,1074	0,0884	0,0654	0,0536
Частота 95,4	0	0,0127	0,0353	0,0417	0,0340	0,0229	0,0271	0,0386	0,0460	0,0482	0,0460	0,0447
Частота 123,1	0	0,2175	0,6958	0,9797	0,9448	0,6067	0,1244	0,5619	0,9235	1,0346	0,8911	0,4571
Частота 141,57	0	0,0076	0,0251	0,0444	0,0557	0,0553	0,0355	0,0166	0,0377	0,0573	0,0609	0,0455
Частота 206,2	0	0,0084	0,0236	0,0202	0,0157	0,0243	0,0212	0,0133	0,0223	0,0314	0,0361	0,0368
Частота 243,13	0	0,1545	0,8314	1,0848	0,7185	0,1600	0,2987	0,3115	0,2867	0,8583	1,3576	1,1648
Частота 307,77	0	0,0077	0,0169	0,0138	0,0140	0,0175	0,0137	0,0139	0,0160	0,0144	0,0290	0,0397
Гибкая опора - Гибкая опора												
Частота 49,23	0,5114	0,4894	0,4473	0,3733	0,3032	0,2285	0,1558	0,1987	0,2935	0,3796	0,4597	0,5158
Частота 95,4	1,9179	1,5266	0,9372	0,4948	0,5366	0,7845	0,7583	0,4848	0,6151	1,1129	1,6204	1,9570
Частота 123,1	0,0796	0,0723	0,0812	0,0912	0,0905	0,0680	0,0326	0,0419	0,0751	0,0915	0,0806	0,0537
Частота 141,57	0,0496	0,0372	0,0325	0,0418	0,0530	0,0510	0,0306	0,0117	0,0407	0,0560	0,0555	0,0353
Частота 206,2	0,2487	0,3342	0,3414	0,2237	0,0674	0,1449	0,2386	0,1836	0,0482	0,2351	0,3276	0,2268
Частота 243,13	0,0252	0,0302	0,0373	0,0315	0,0184	0,0699	0,0231	0,0225	0,0069	0,0202	0,0367	0,0302
Частота 307,77	0,0553	0,0436	0,0081	0,0244	0,0351	0,0201	0,0205	0,0358	0,0147	0,0294	0,0552	0,0566

Таблица 6. Смещение оси многоступенчатого вала от прямой при различных схемах установки при воздействии кулачка по центру вала

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Жестка опора - Жесткая опора												
Частота 49,23	0	0,4282	1,8583	3,2940	4,5391	5,4688	5,6038	4,7852	2,8953	1,1894	0,3275	0
Частота 95,4	0	0,0090	0,0379	0,0699	0,0851	0,0884	0,0822	0,0682	0,0515	0,0348	0,0130	0
Частота 123,1	0	0,0075	0,0368	0,0578	0,0634	0,0521	0,0327	0,0175	0,0084	0,0041	0,0017	0
Частота 141,57	0	0,0153	0,0722	0,1038	0,1051	0,0717	0,0164	0,0416	0,0573	0,0389	0,0142	0
Частота 206,2	0	0,0006	0,0024	0,0030	0,0031	0,0042	0,0089	0,0163	0,0232	0,0264	0,0152	0
Частота 243,13	0	0,0027	0,0089	0,0091	0,0055	0,0009	0,0014	0,0095	0,0206	0,0218	0,0099	0
Частота 307,77	0	0,0766	0,2972	0,2678	0,0784	0,1712	0,2540	0,1283	0,1658	0,2854	0,1290	0
Жестка опора - Гибкая опора												
Частота 49,23	0	0,0345	0,1571	0,2691	0,3707	0,4523	0,5035	0,5154	0,4716	0,3575	0,2319	0,1543
Частота 95,4	0	0,0101	0,0337	0,0537	0,0677	0,0685	0,0629	0,0584	0,0537	0,0438	0,0320	0,0259
Частота 123,1	0	0,0102	0,0507	0,0677	0,0763	0,0691	0,0444	0,0177	0,0053	0,0113	0,0138	0,0097
Частота 141,57	0	0,0054	0,0196	0,0297	0,0313	0,0233	0,0168	0,0205	0,0275	0,0286	0,0238	0,0171
Частота 206,2	0	0,0054	0,0245	0,0297	0,0198	0,0047	0,0123	0,0149	0,0186	0,0304	0,0355	0,0349
Частота 243,13	0	0,2752	0,9178	1,0581	0,6023	0,0833	0,3753	0,1268	0,6824	1,1945	1,3941	1,1205
Частота 307,77	0	0,0046	0,0130	0,0101	0,0013	0,0099	0,0139	0,0128	0,0101	0,0098	0,0194	0,0281
Гибкая опора - Гибкая опора												
Частота 49,23	0,0435	0,0909	0,1685	0,2229	0,2592	0,2748	0,2568	0,2269	0,1973	0,1824	0,1713	0,1687
Частота 95,4	1,5698	1,2123	0,6877	0,2892	0,3886	0,5849	0,5513	0,2508	0,3033	0,7269	1,2202	1,5021
Частота 123,1	0,0500	0,0344	0,0099	0,0076	0,0215	0,0287	0,0350	0,0478	0,0591	0,0563	0,0447	0,0335
Частота 141,57	0,0334	0,0233	0,0128	0,0139	0,0173	0,0178	0,0179	0,0275	0,0395	0,0436	0,0337	0,0205
Частота 206,2	0,1918	0,2120	0,2142	0,1277	0,0751	0,1556	0,1355	0,0628	0,0995	0,1679	0,1995	0,1762
Частота 243,13	0,0253	0,0285	0,0225	0,0080	0,0151	0,0217	0,0181	0,0103	0,0072	0,0099	0,0156	0,0209
Частота 307,77	0,0450	0,0407	0,0188	0,0077	0,0231	0,0153	0,0045	0,0113	0,0068	0,0155	0,0227	0,0246

Таблица 7. Смещение оси многоступенчатого вала от прямой при различных схемах установки при воздействии кулачка по правой стороне вала

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Жестка опора - Жесткая опора												
Частота 49,23	0	0,0357	0,2088	0,3726	0,5327	0,6407	0,6692	0,5744	0,4019	0,2232	0,0615	0
Частота 95,4	0	0,0031	0,0100	0,0140	0,0162	0,0146	0,0093	0,0019	0,0073	0,0077	0,0028	0
Частота 123,1	0	0,0029	0,0154	0,0197	0,0184	0,0117	0,0030	0,0139	0,0182	0,0136	0,0486	0
Частота 141,57	0	0,0103	0,0439	0,0592	0,0553	0,0314	0,0152	0,0453	0,0577	0,0439	0,0141	0
Частота 206,2	0	0,0025	0,0087	0,0106	0,0072	0,0020	0,0062	0,0098	0,0070	0,0021	0,0014	0
Частота 243,13	0	0,0025	0,0083	0,0095	0,0056	0,0033	0,0088	0,0071	0,0016	0,0054	0,0025	0
Частота 307,77	0	0,0618	0,2182	0,1968	0,0608	0,1455	0,1688	0,0413	0,1931	0,1648	0,0482	0
Жестка опора - Гибкая опора												
Частота 49,23	0	0,0212	0,0931	0,1528	0,2019	0,2345	0,2405	0,2195	0,1662	0,0931	0,0427	0,0977
Частота 95,4	0	0,0138	0,0531	0,0780	0,0916	0,0827	0,0521	0,0193	0,0291	0,0759	0,1149	0,1345
Частота 123,1	0	0,2599	1,0613	1,4484	1,5168	1,1250	0,5115	0,4749	1,1847	1,6037	1,2582	0,6761
Частота 141,57	0	0,0175	0,0696	0,0894	0,0919	0,0654	0,0160	0,0462	0,0790	0,0907	0,0620	0,0120
Частота 206,2	0	0,0097	0,0400	0,0444	0,0208	0,0194	0,0372	0,0330	0,0066	0,0253	0,0516	0,0613
Частота 243,13	0	0,3884	1,4466	1,5326	0,9040	0,0526	0,9073	0,8445	0,2711	1,1392	1,9697	1,6033
Частота 307,77	0	0,0085	0,0253	0,0216	0,0053	0,0175	0,0181	0,0044	0,0179	0,0227	0,0141	0,0047
Гибкая опора - Гибкая опора												
Частота 49,23	0,5881	0,5191	0,4195	0,3290	0,2174	0,1070	0,1325	0,2280	0,3396	0,4063	0,4582	0,4759
Частота 95,4	3,1317	2,3565	1,2296	0,4059	0,7176	1,1559	1,2467	0,8856	0,3106	1,1809	2,2135	2,9373
Частота 123,1	0,0749	0,0745	0,0796	0,0711	0,0526	0,0312	0,0398	0,0619	0,0659	0,0612	0,0685	0,0801
Частота 141,57	0,0497	0,0497	0,0526	0,0442	0,0292	0,0186	0,0314	0,0409	0,0381	0,0302	0,0374	0,0455
Частота 206,2	0,3147	0,3323	0,3017	0,1813	0,1073	0,2136	0,1996	0,1065	0,1836	0,2757	0,3199	0,2842
Частота 243,13	0,0410	0,0423	0,0300	0,0126	0,0200	0,0274	0,0174	0,0140	0,0297	0,0286	0,0246	0,0290
Частота 307,77	0,0950	0,0879	0,0478	0,0130	0,0466	0,0303	0,0252	0,0469	0,0219	0,0394	0,0720	0,0783

Таблица 8. Смещение оси гладкого вала от прямой при различных схемах установки при воздействии кулачка по левой/ правой стороне вала

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Жестка опора - Жесткая опора												
Частота 46,83	0	0,0088	0,0998	0,3043	0,5811	0,8219	0,9586	0,8646	0,6118	0,3262	0,1015	0
Частота 94,7	0	0,0032	0,0404	0,0826	0,0573	0,0411	0,0889	0,0959	0,0718	0,0363	0,0097	0
Частота 163	0	0,0033	0,0070	0,0228	0,0545	0,0536	0,0154	0,0392	0,0596	0,0359	0,0087	0
Частота 197,17	0	0,0051	0,0330	0,0339	0,0137	0,0536	0,0504	0,0130	0,0481	0,0548	0,0201	0
Частота 238,17	0	1,0199	6,968	12,038	11,778	2,323	10,984	7,9671	6,9348	12,576	5,4282	0
Жестка опора - Гибкая опора												
Частота 46,83	0	0,0034	0,0259	0,0355	0,0074	0,0655	0,1165	0,1452	0,1425	0,1019	0,0495	0,0091
Частота 94,7	0	0,0549	0,5036	1,018	1,3614	1,3384	0,6799	0,6336	1,3118	1,1793	0,5667	0,1207
Частота 163	0	0,0053	0,0380	0,0535	0,0173	0,0443	0,0658	0,0361	0,0197	0,0537	0,0576	0,0091
Частота 197,17	0	1,322	11,306	20,948	9,7128	14,006	17,913	3,1119	14,761	20,161	12,257	2,8657
Частота 238,17	0	0,0020	0,0106	0,0344	0,0443	0,0129	0,0300	0,0472	0,0166	0,0332	0,0461	0,0078
Гибкая опора - Гибкая опора												
Частота 46,83	0,0226	0,1117	0,1679	0,1308	0,02933	0,1609	0,3458	0,4478	0,4412	0,3154	0,1461	0,0253
Частота 94,7	0,0251	0,0560	0,1772	0,2708	0,3081	0,2120	0,0359	0,2024	0,2889	0,2269	0,1091	0,0241
Частота 163	1,2131	6,7697	11,055	10,917	4,9043	6,4282	11,524	5,4802	6,1719	11,752	7,4978	1,4058
Частота 197,17	0,0122	0,0356	0,0931	0,1156	0,0509	0,0573	0,1089	0,0415	0,0870	0,1089	0,0690	0,0138
Частота 238,17	0,0174	0,0283	0,0086	0,0597	0,0822	0,0155	0,0778	0,0479	0,0610	0,0827	0,0499	0,0146

Таблица 9. Смещение оси гладкого вала от прямой при различных схемах установки при воздействии кулачка по центру вала.

Сечение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Жестка опора - Жесткая опора												
Частота 46,83	0	0,1083	0,9092	3,022	5,5451	7,0142	7,6685	6,8117	4,3557	2,0565	0,4264	0
Частота 94,7	0	0,0082	0,0800	0,1620	0,2118	0,2304	0,2263	0,1849	0,1107	0,0425	0,0054	0
Частота 163	0	0,0056	0,0445	0,0856	0,0700	0,0318	0,0381	0,0725	0,0816	0,0511	0,0089	0
Частота 197,17	0	0,0070	0,0620	0,1074	0,0513	0,0243	0,0187	0,0643	0,1068	0,0708	0,0134	0
Частота 238,17	0	1,247	12,989	22,066	17,132	3,9174	18,388	12,453	10,204	22,281	7,0898	0
Жестка опора - Гибкая опора												
Частота 46,83	0	0,0118	0,1413	0,3637	0,6250	0,8742	1,0817	1,2061	1,2313	1,0215	0,5788	0,0654
Частота 94,7	0	0,0577	0,7009	1,5702	2,1552	1,9941	1,1153	0,4331	1,6739	2,4111	1,7179	0,2196
Частота 163	0	0,0066	0,0895	0,1596	0,1606	0,0821	0,0232	0,0102	0,0735	0,0885	0,0433	0,0101
Частота 197,17	0	1,3503	19,569	35,886	33,825	7,5432	23,114	34,543	14,606	21,727	35,618	6,6817
Частота 238,17	0	0,0026	0,0235	0,0394	0,0259	0,0376	0,0801	0,0909	0,0312	0,0631	0,0793	0,0186
Гибкая опора - Гибкая опора												
Частота 46,83	0,0343	0,1311	0,3677	0,5704	0,6911	0,7366	0,7451	0,733	0,6761	0,4874	0,2329	0,0348
Частота 94,7	0,0126	0,0925	0,1569	0,1793	0,1467	0,0914	0,0955	0,1470	0,1722	0,1290	0,0593	0,0143
Частота 163	1,3784	7,6654	12,769	5,5983	6,371	12,245	10,504	1,8961	9,2252	12,646	6,8534	1,3853
Частота 197,17	0,0120	0,0759	0,0922	0,0349	0,0661	0,1249	0,1262	0,0522	0,0681	0,0976	0,0619	0,0136
Частота 238,17	0,0077	0,0325	0,0330	0,0067	0,0454	0,0595	0,0488	0,0144	0,0282	0,0422	0,0275	0,0092

4.2.2. Анализ результатов гармонической реакции для многоступенчатого вала

Результаты исследований показали, что при жестком закреплении с обеих сторон многоступенчатого и гибкого вала, смещения оси от прямой в зонах закрепления и на торцах не происходит

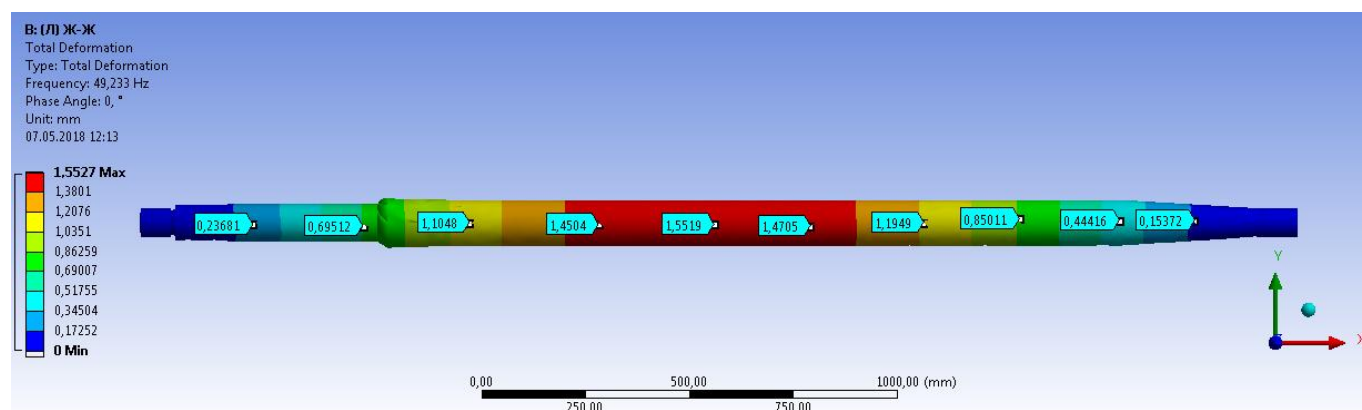


Рисунок 34. Результат деформации многоступенчатого вала при жестком закреплении с обеих концов.

Максимальное смещение оси от прямой на 3,1317 мм возникает в случае воздействия вибрационного кулачка по правой стороне вала при условии гибкого закрепления с обеих сторон на частоте 95,4 Гц. Следует заметить, что проработка вала на данной частоте осуществляется неравномерно.

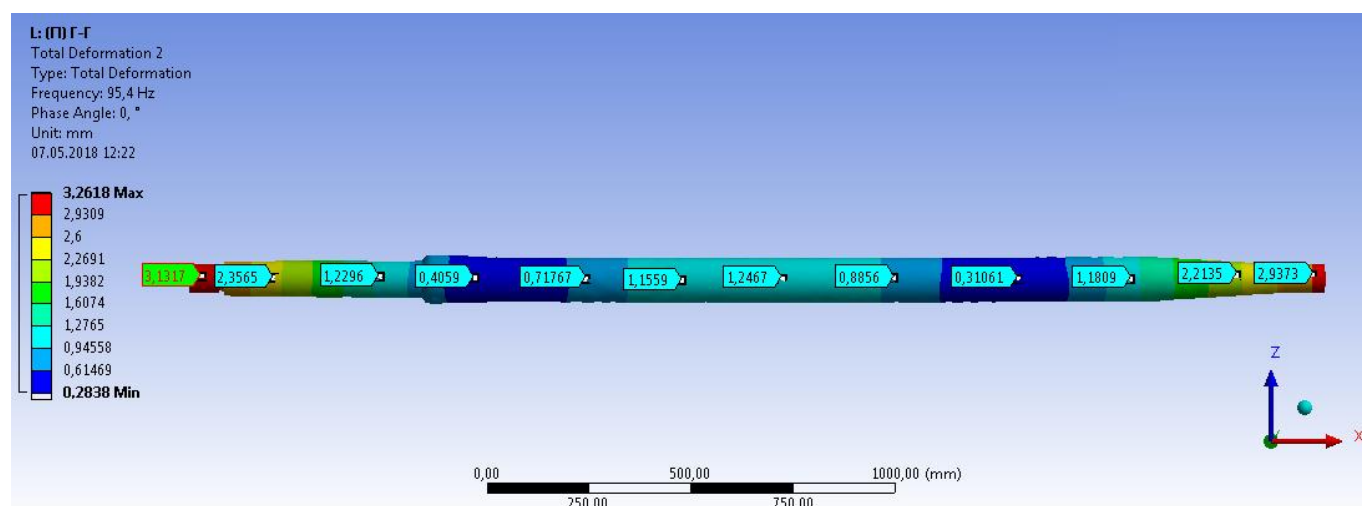


Рисунок 35. Максимальная деформации многоступенчатого вала.

Наименьшее смещение оси от прямой в 0,009 мм возникает в случае жесткого закрепления с обеих сторон вала на частоте 243,13 Гц

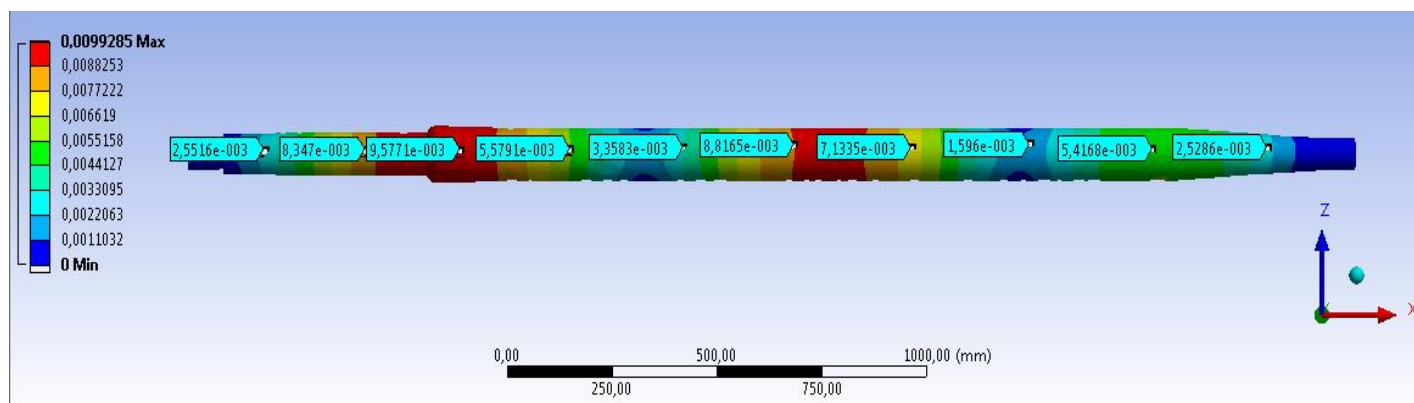


Рисунок 36. Минимальная деформации многоступенчатого вала при воздействии вибрационного кулачка с правой стороны

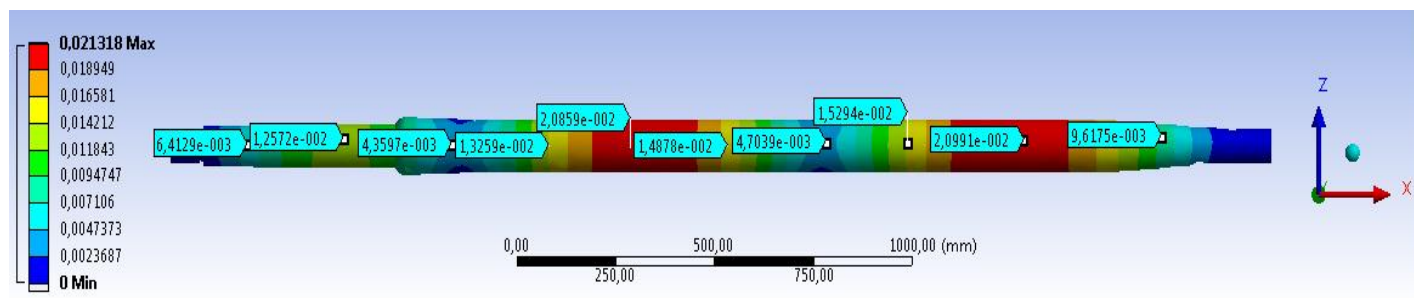


Рисунок 37. Минимальная деформации многоступенчатого вала при воздействии вибрационного кулачка с левой стороны

Наиболее равномерное распределение деформации по длине вала происходит при жестком закреплении с левого конца, и гибком закреплении – с правого, на частотах 206,2 Гц и 307,77 Гц. Но следует также заметить, что величина деформаций на данных частотах относительно небольшая (до 0,0613 мм)

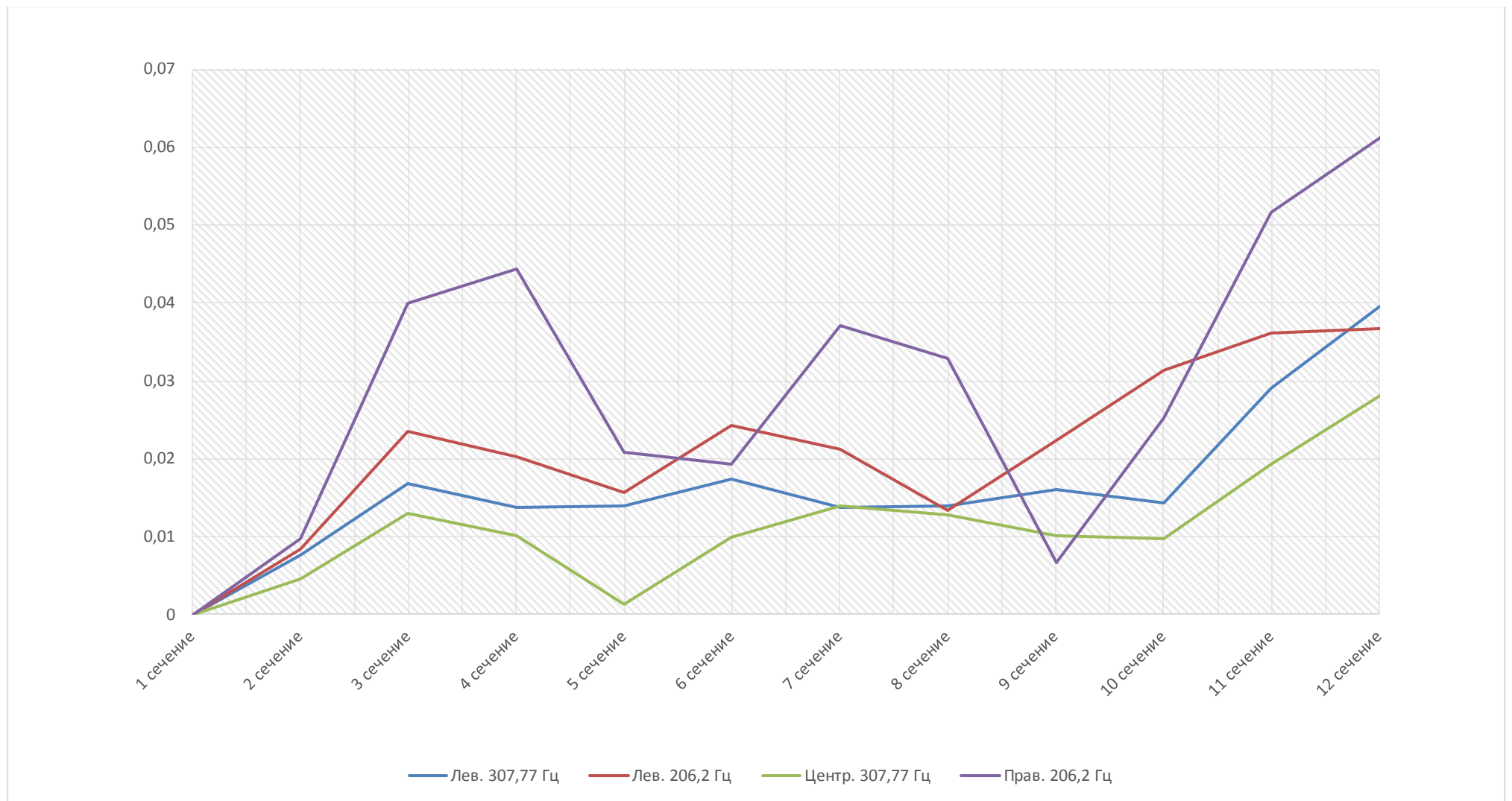


Рисунок 38. График наиболее равномерного распределения деформации по длине многоступенчатого вала

4.2.3. Анализ результатов гармонической реакции для гладкого вала

Максимальные деформационные значения гладкого вала достигаются при условии жесткой заделки с левого конца и гибкой заделки – с правого, на частоте 197,17 Гц. При воздействии вибрационного кулачка с правой или левой стороны вала, максимальная деформация достигает 21,18 мм. При воздействии по центру вала – 37,4 мм.

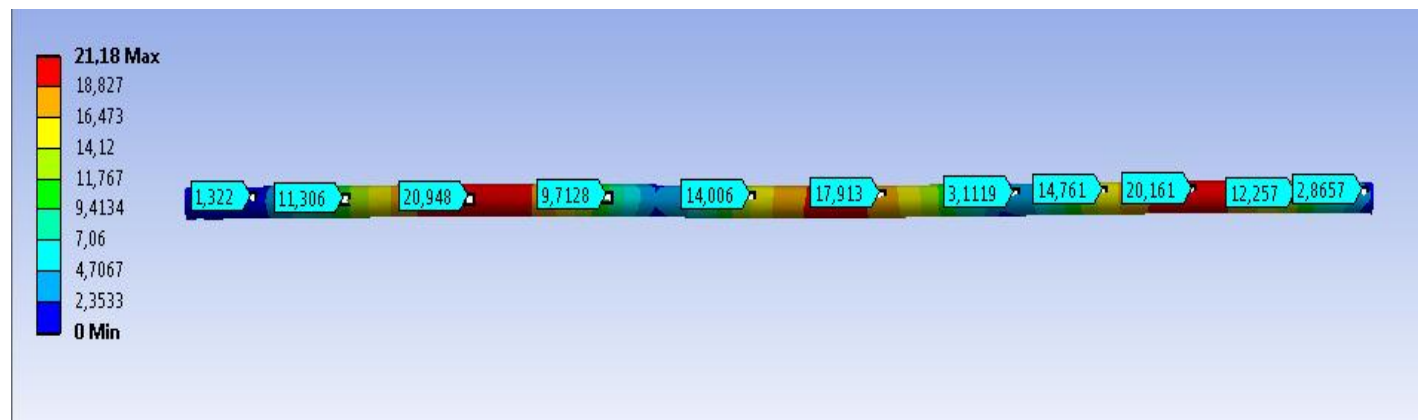


Рисунок 39. Максимальная деформации гладкого вала при воздействии вибрационного кулачка с левой/ правой стороны

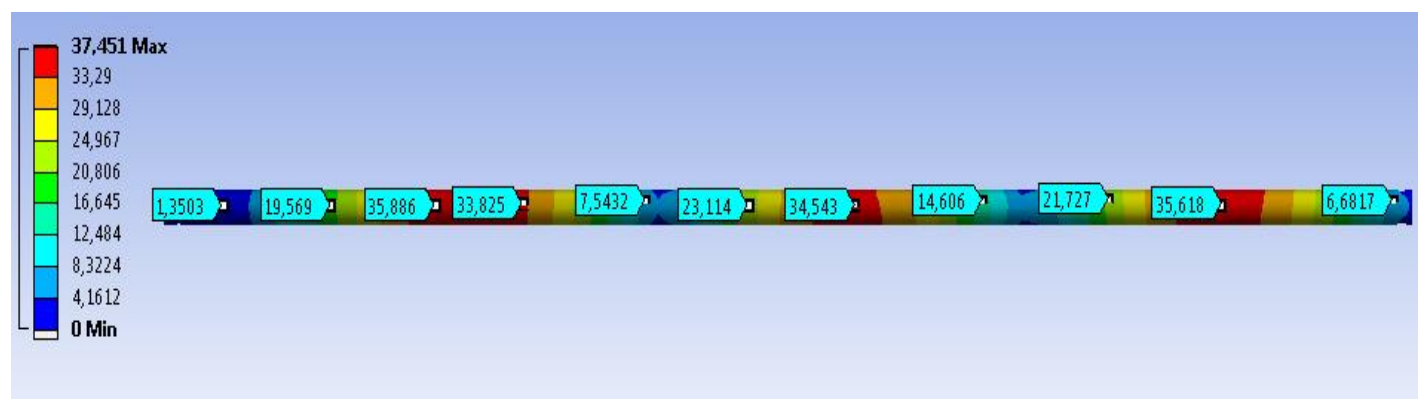


Рисунок 40. Максимальная деформации гладкого вала при воздействии вибрационного кулачка по центру вала

Минимальные деформационные показания возникают при условии жесткой заделки с левого конца и гибкой заделки – с правого, или гибкой заделки с обоих концов на частоте 238,17 Гц. При воздействии вибрационного кулачка с правой или левой стороны вала, минимальное смещение от оси достигает 0,048 мм.

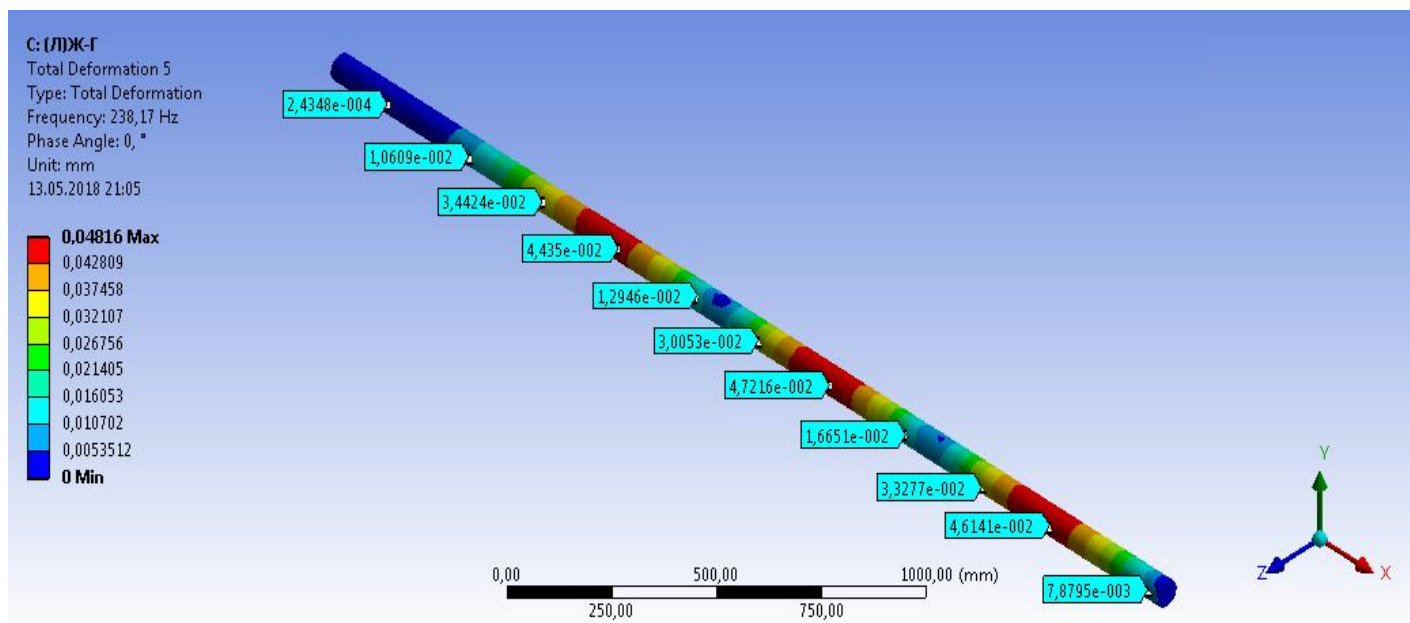


Рисунок 41. Минимальная деформации гладкого вала при воздействии вибрационного кулачка с левой/ правой стороны на частоте 238,17 Гц

На этой же частоте, происходит наиболее равномерное распределение деформации по всей длине вала. Но, как и в случае с многоступенчатым валом – проработка происходит с относительно небольшими значениями.

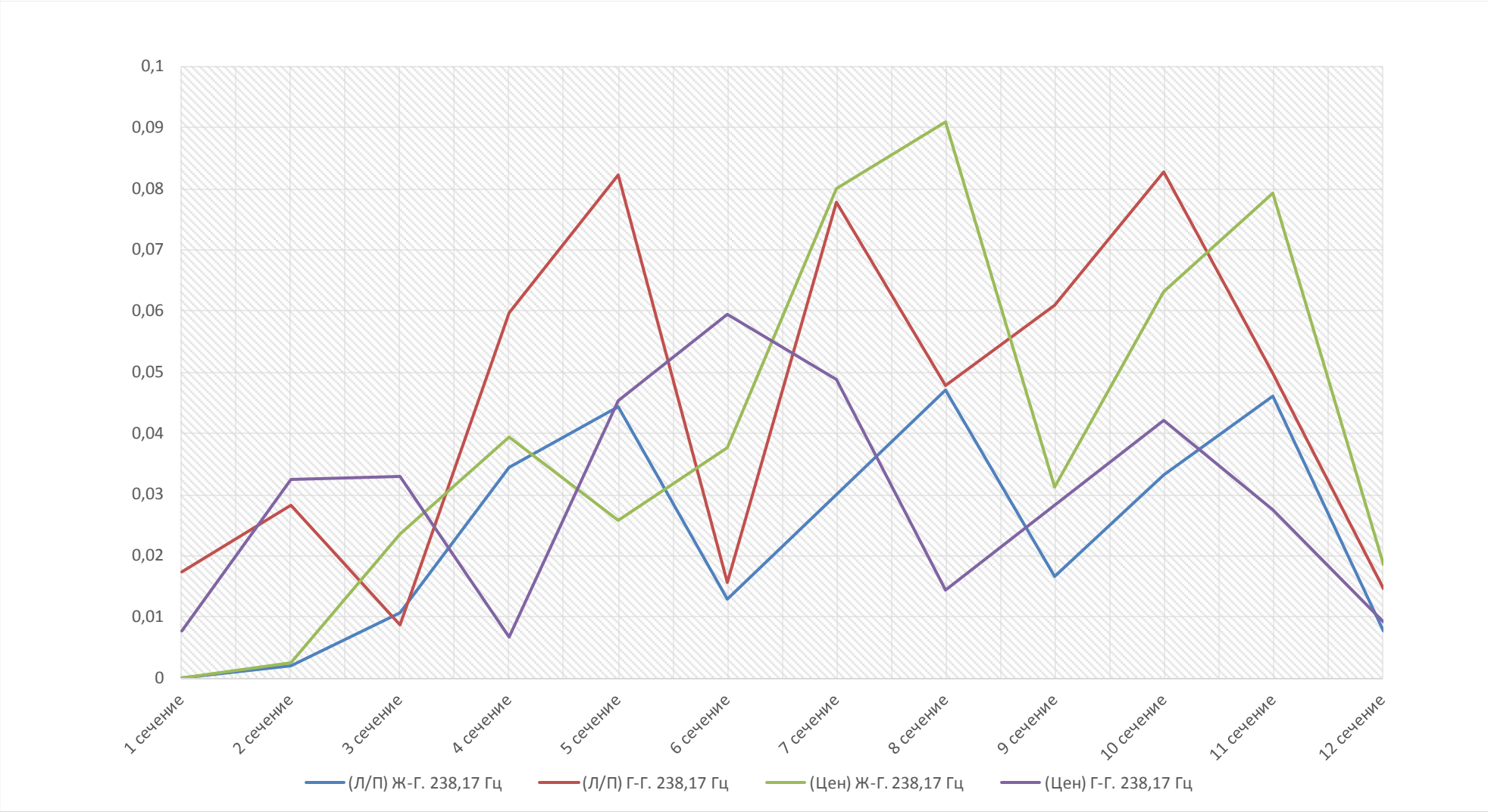


Рисунок 42. График наиболее равномерного распределения деформации по длине гладкого вала

Тем не менее, не смотря на относительно низкую проработку вала, условия гибкой заделки с обоих концов и воздействием вибрационного кулачка с частотой 238,17 – являются единственным вариантом, на котором прорабатываются торцы вала.

Это означает, что усилие закрепления в 10Н являются оптимальными в случае проработки многоступенчатого вала. Но для гладкого вала усилия закрепления гибкой опоры следует задавать менее 10Н. В противном случае, проработка торцов гладкого вала не будет осуществляться.

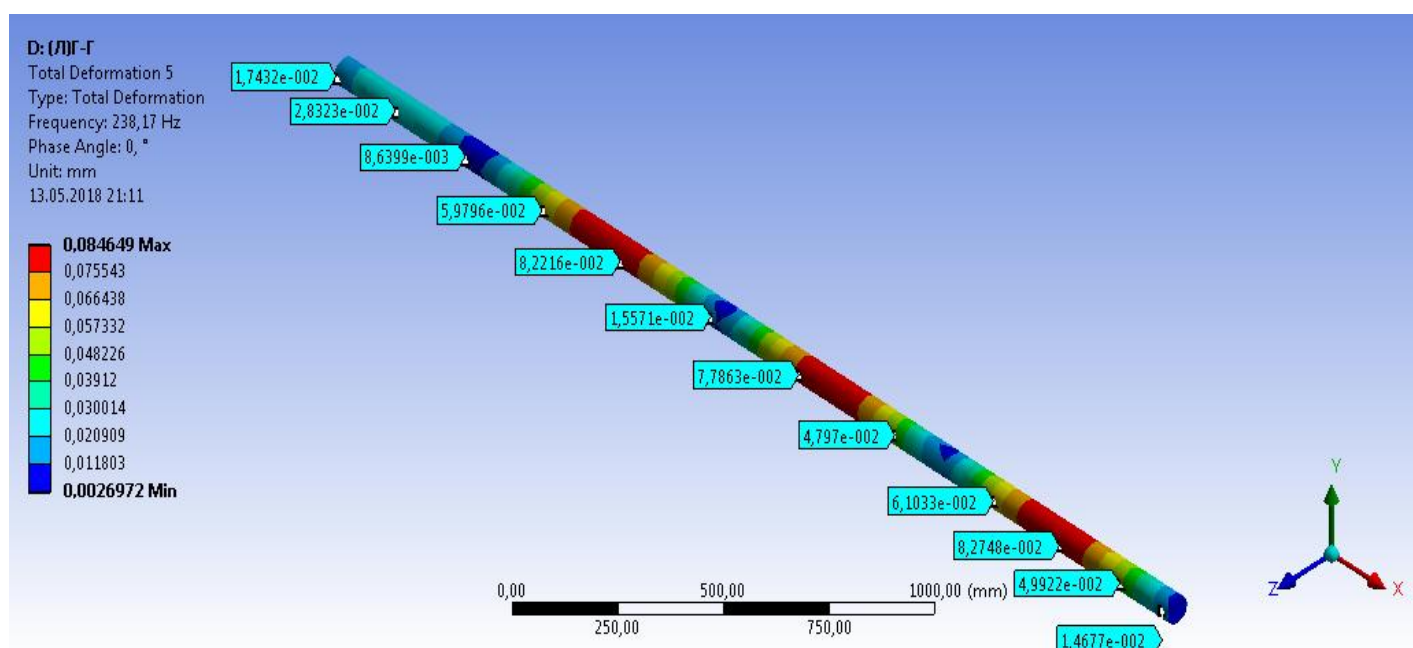


Рисунок 43. Проработка торцов вала при гибкой заделки на частоте 238,17 Гц

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения экспериментального исследования было выявлено, что наиболее оптимальными условиями закрепления для многоступенчатого и гладкого вала является схема жесткого закрепления с одного конца и упругого закрепления – с другого. В этом случае происходит наиболее равномерное распределение деформаций по всей длине вала. Однако, те технологические параметры, которые приемлемы для гладкого вала, не всегда рациональны для многоступенчатого вала. Так же, было выявлено что сила закрепления гибкой опоры при обработки многоступенчатого вала должна быть выше, чем при закреплении гладкого вала. При этом, величина закрепления для гладкого вала не должна превышать 10Н.

Результаты работы:

Спроектированы математические модели маложестких длинномерных валов.

Созданы виртуальные условия, аналогичные действующей вибрационной установки по патенту № 2355546.

Заданы параметры технологической системы для вибрационной обработки;

Проведены экспериментальные исследования по определению режимов вибрационного воздействия для гладкого и многоступенчатого вала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кудрявцев, П.И. Наумченков, Н.Е. Усталость сварных конструкций. - М.: Машиностроение, 1976.-270 с.
2. Теория термической обработки металла. И.И. Новиков
3. Обзор существующих и перспективных тенденций развития технологий изготовления мало жестких длинномерных валов. Воронв Д.Ю., Логинов Н.Ю., Шевелев И.В.
4. Справочник машиностроителя/ Под ред. Сашеля Э.А., т. 3. - М.: Машиностроение, 1964
5. Технологические остаточные напряжения/ Под ред. А.В. Подзая. - М.: Машиностроение, 1973,-216 с.
6. Драчев, А. О. Термосиловая обработка ступенчатых осесимметричных деталей [Текст] / А. О. Драчев, О. И. Драчев, Г. В. Тараненко, В. А. Тараненко, А. В. Свиць// Автоматизация: проблемы, идеи, решения : материалы международ. науч.-техн. конф. – 2009. – С. 18-21.
7. Мальцев, С. А.Термосиловая стабилизация мало жестких валов[Текст] / С. А. Мальцев, О. И. Драчев // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении : сб. науч. тр. серия «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении». – Краматорск, 2014. – С. 78-84.
8. Вибрации в технике/ Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова. - М.: Машиностроение, т.3, 1980.-544 с.
9. Вибрация в технике/Под ред. К.В. Фролова. М.: Машиностроение, т. 6. - 1981. - 456 с.
10. Русаков А.А. Рентгенография металлов. МИФИ, 1969

11. Горелик С.С. и др. Рентгенографический и электроннооптический анализ. М., "Металлургия", 1970
12. Александров Б.И. и др. Изучение остаточных напряжений в упрочненном поверхностном слое методом вихревых токов. Сб. "Повышение прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием". М., ЦНИИТМАШ, 1970.
13. Фёплъ и Мёнх. Практика оптического моделирования. Новосибирск, "Наука", 1966
14. Биргер И.А. Остаточные напряжения. - Машгиз, 1963. - 232 с.
15. Бобровский А.В. Повышение точности обработки маложестких длинномерных деталей путем автоматического регулирования. // Юбилейная научно-техническая конференция. Тольятти, 1997. - 60 с.
16. Драчев О.И. Технология вибрационной обработки и вибрационного точения маложестких деталей. Ирбит, 2015. - 261 с.
17. Бернст Р., Бемер З., Гюнтер Д. Бернштейн М.Л. (ред.). Технология термической обработки стали. Лейпциг, 1976. Пер. с нем. М. Metallургия, 1981. - 608 с.
18. Борздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. - М.:Металлургия, 1972. - 304 с.
19. Вивденко Ю.Н. Равнодействующая технологических остаточных напряжений в поверхностном слое и ее применение для оценки влияния условий обработки на коробление деталей / Оптимизация технологических процессов по критериям. - М.: Наука. 1987. - 115 с.
20. Гечузин Я.Е. Диффузионная зона. - М.: Наука, 1975. - 344 с.
21. Дольский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. - М.: Машиностроение, 1975. - 23 с.

22. Писаренко Г.С. Колебания механических систем с учетом несовершенной упругости материала. - Киев.: АН УССР, 1970. - 379 с.
23. Поздеев А.А., Няшин Ю.Н., Трусов П.В. Остаточные напряжения, теория и приложения. - М.: Наука думка, 1982. - 291 с.
24. Гойтвуд Б.Е. Температурные напряжения. М.ИЛ. 1959. - 220 с.
25. Гринченко Г.И. Упрочнение деталей из жаропрочных и титановых сплавов. - М. Машиностроение, 1971 - 120 с.
26. Давиденко И.А., Чучман Т.Н. Влияние температуры на диаграммы сжатия металлов. // Физика металлов и металловедение, 1960. т 9, вып. 5-741-750.
27. Вейнер Д., Ландау Г. Температурные напряжения в упругопластических телах. /Пластичность и термопластичность. - Библ. сб. Механика. - М.: ИЛ, 1962. - 89 с.
28. Новик А., Берри Б. Релаксационные явления в кристаллах. Пер с англ. Под ред. Э.М. Надгорного Я.М., Соифера М., Атомиздат, 1975. - 472 с.
29. Скороходов А.Н., Зудов Е.Г., Киричков А.А., Петчеренко Ю.П. Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения. // Под ред. Полухина П.И. - М.: Металлургия, 1985. - 185 с.
30. Сжатие внутренних напряжений и стабилизация формы сварных и литейных деталей вибрационной обработкой [Текст] / Отчет инв. М3984 698. - Куйбышев, 1980.
31. Драчев О.И Автоматическое управление процессом точения мало жестких деталей [Текст] / О.И. Драчев, А.Н. Кравцов, ВолГТУ - Тольятти: ЗАО "ОНИКС", 2012 - 250 с.: ил., табл.; - (Серия: Управление качеством технологических процессов в машиностроение / Под общ. ред. Ю.М. Соломенцева).

32. Патент РФ № 2355546, кл. В23В27/00. Устройство для вибрационной обработки, 2007

33. S.A. Raza Baqar1 , Y.R.Jain , P. Khanna, Vibratory Stress Relief Techniques: A Review of Present Trends and Future Prospects, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 4, Issue 11, November 2014.

34. Bragatto P., Site C.D., Faragnoli A., 2012, Opportunities and Threats of Risk Based Inspections: the new Italian Legislation on Pressure Equipment Inspection, Chemical Engineering Transactions 26, 177-182.

35. Eto S, Miura Y, Tani J, Fujii T (2014) Effect of residual stress induced by pulsed-laser irradiation on initiation of chloride stress corrosion cracking in stainless steel. Mater Sci Eng A 590:433–439

36. Fang XY, Zhang JX (2014) Effect of underfill defects on distortion and tensile properties of Ti-2Al-1.5Mn welded joint by pulsed laser beam welding. Int J Adv Manuf Technol 74:699–705

37. Gu BP, Yang ZS, Pan L, Wei W (2016) Evolution of the microstructure, mechanical properties, and high-order modal characteristics of AISI 1045 steel subjected to a simulative environment of surface grinding burn. Int J Adv Manuf Technol 82:253–263

38. Patra A, Zhu T, McDowell DL (2014) Constitutive equations for modeling non-Schmid effects in single crystal bcc-Fe at low and ambient temperatures. Int J Plast 59:1–14

39. Dai J, Liu Z, Yang L, Wang Y, Zhou CY, Zhang YC (2015) Research on pulsed laser welding of TiB₂-enhanced aluminum matrix composites. Int J Adv Manuf Technol. doi:10.1007/ s00170-015-7887-3

ПРИЛОЖЕНИЕ

Амплитудно-частотные характеристики многоступенчатого вала:

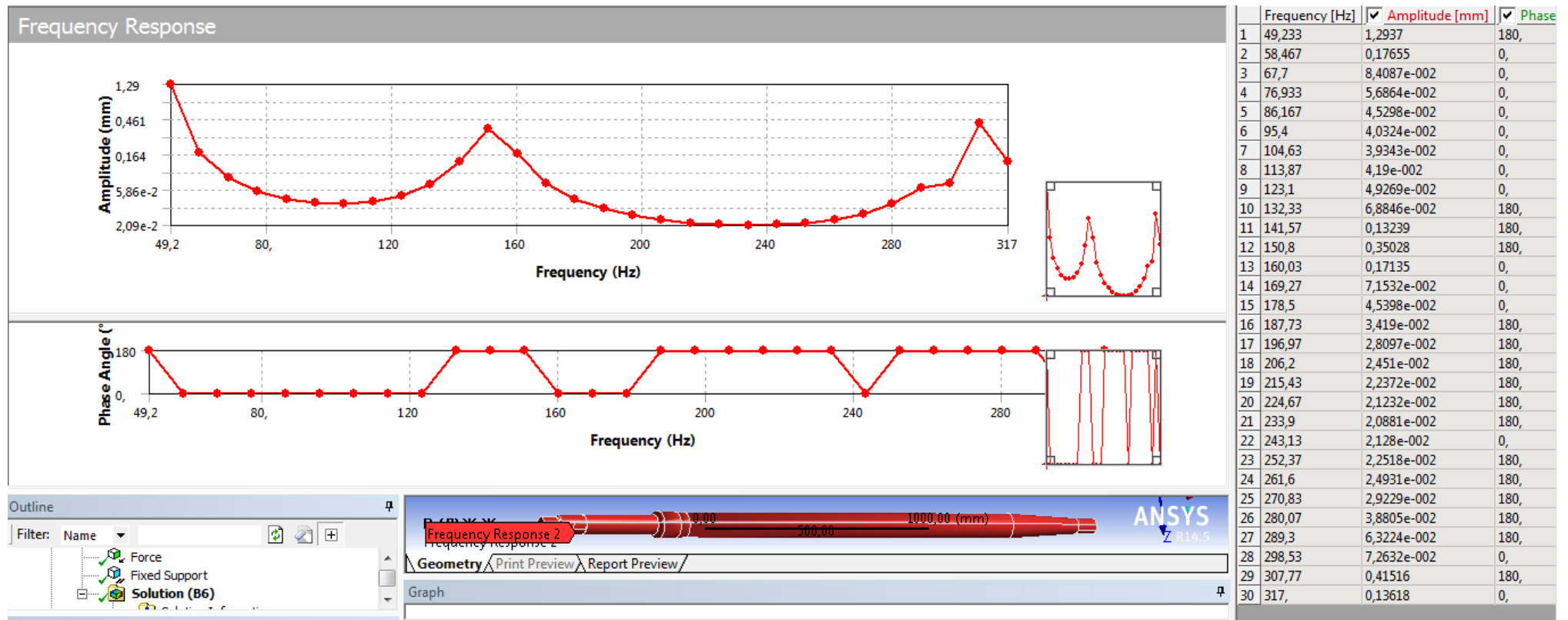


Рисунок 1. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка с левой стороны при условии закрепления на жестких опорах с обоих концов вала

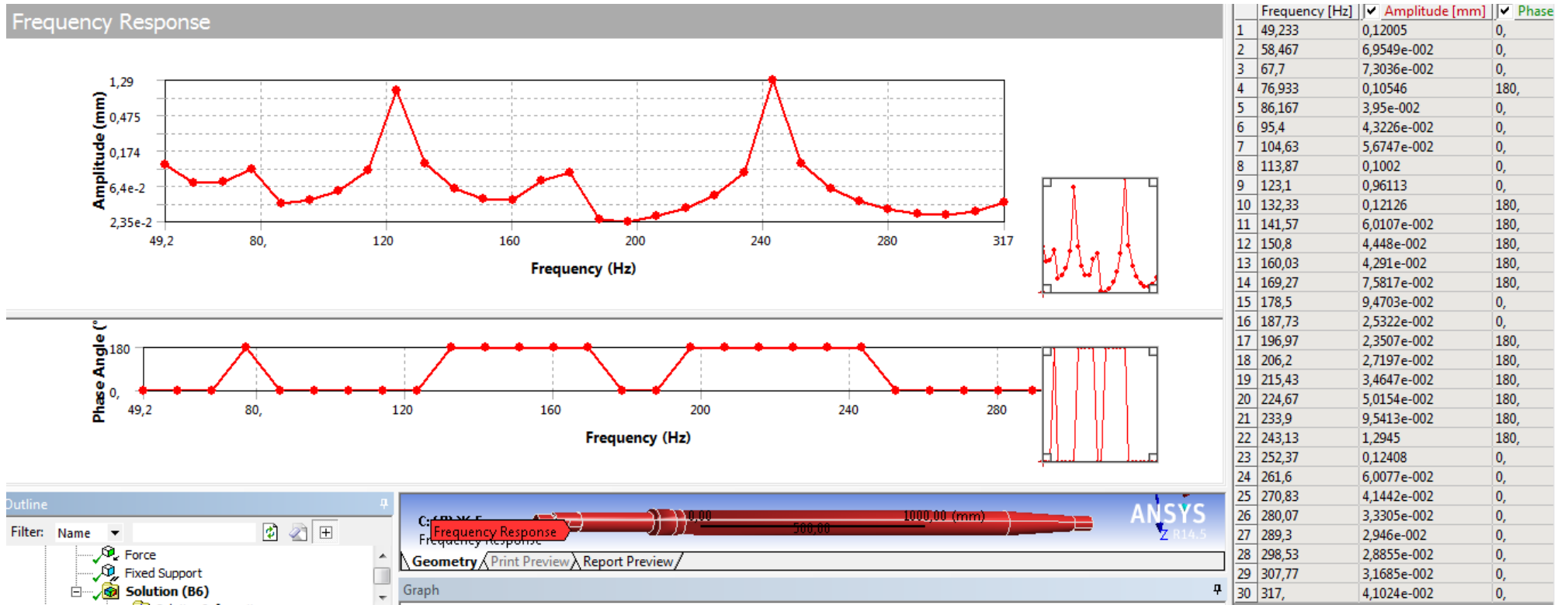


Рисунок 2. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка с левой стороны при условии закрепления на жесткой опоре с левой стороны, и гибкой опоре – с правой

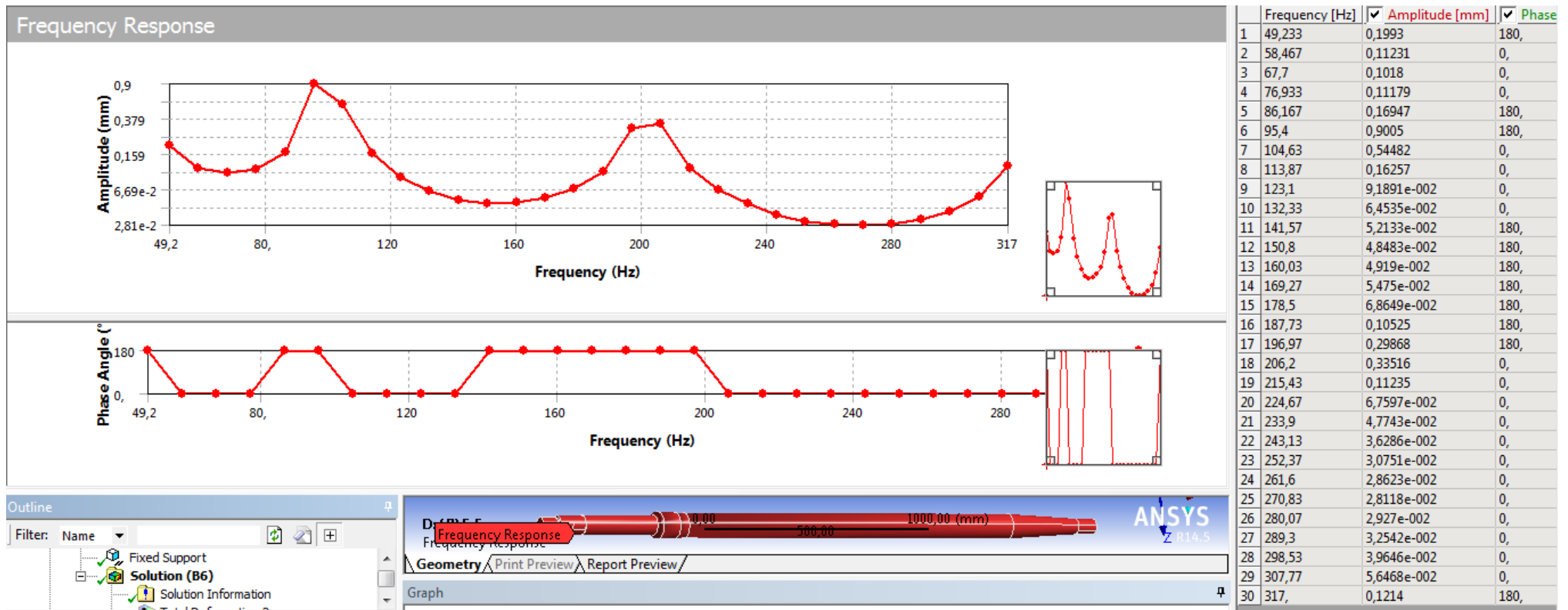


Рисунок 3. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка с левой стороны при условии закрепления на гибких опорах с обоих концов вала

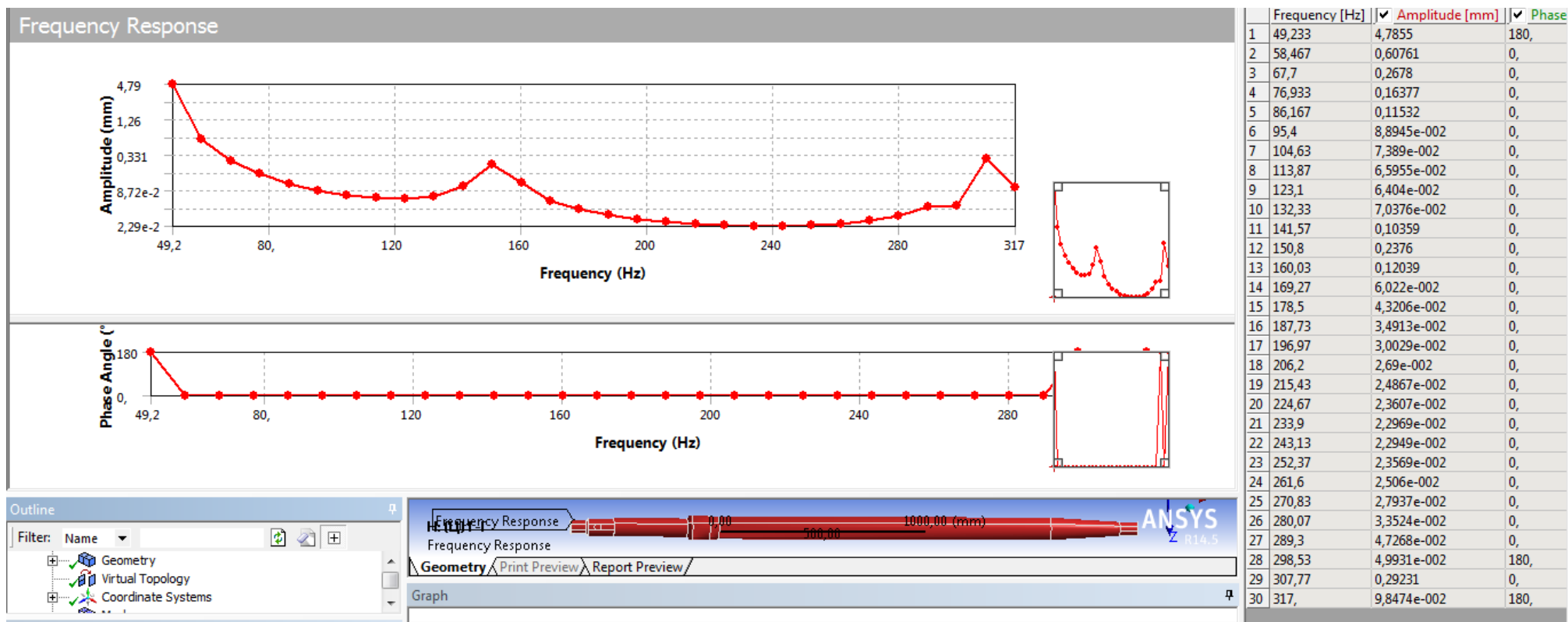


Рисунок 4. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка по центру при условии закрепления на жестких опорах с обоих концов вала

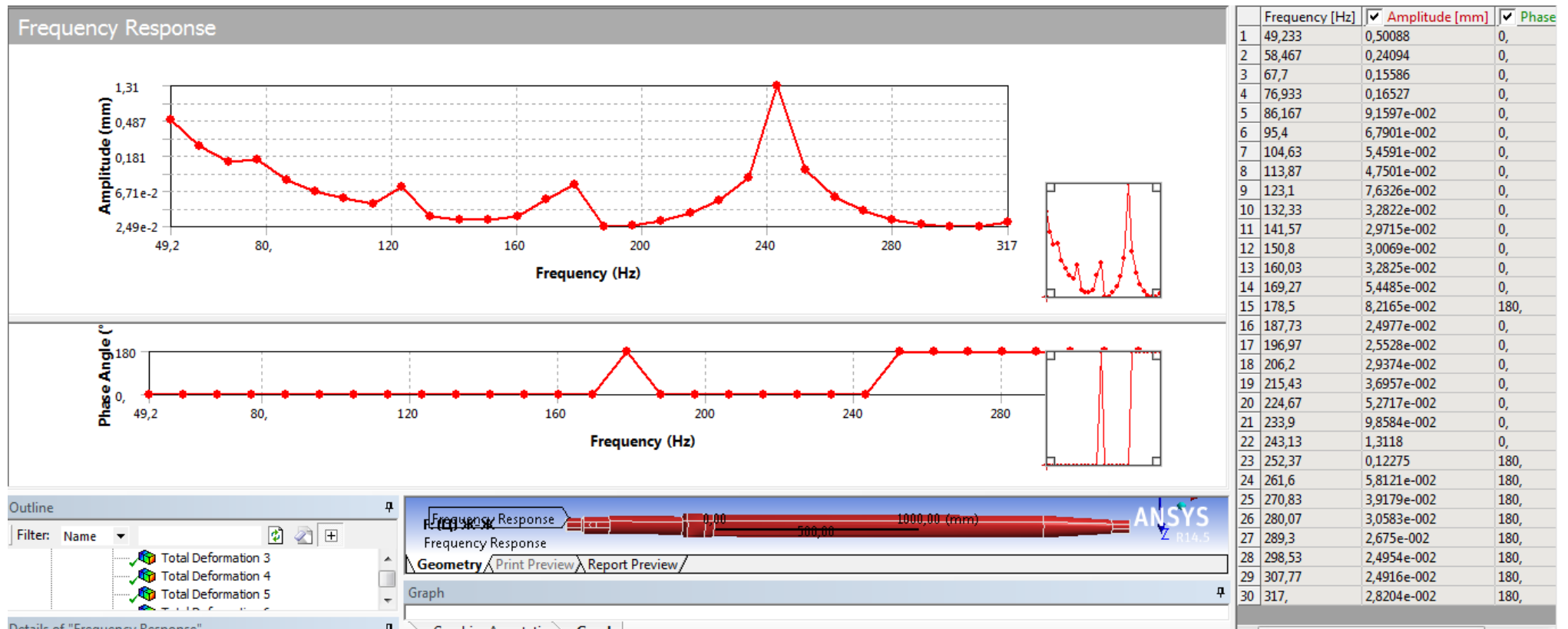


Рисунок 5. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка по центру при условии закрепления на жесткой опоре с левой стороны, и гибкой опоре – с правой

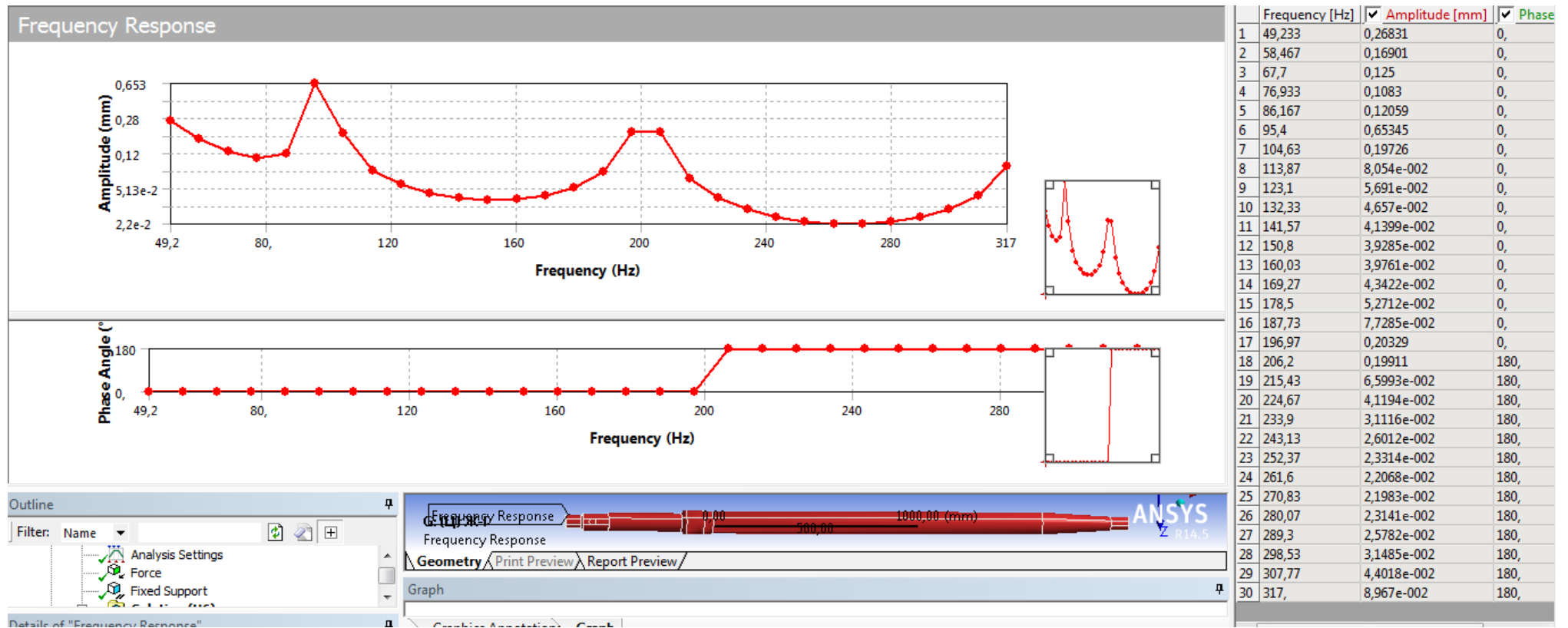


Рисунок 6. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка по центру при условии закрепления на гибких опорах с обоих концов вала

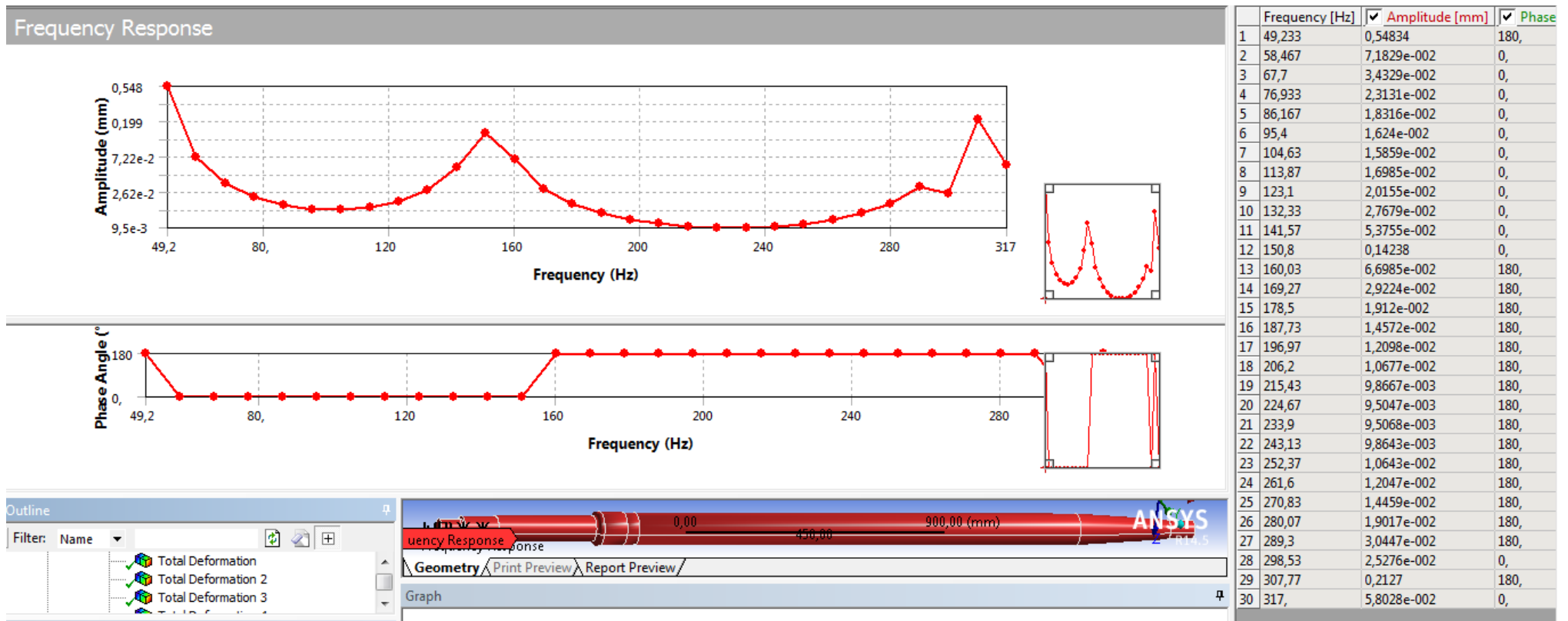


Рисунок 7. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка с правой стороны при условии закрепления на жестких опорах с обоих концов вала

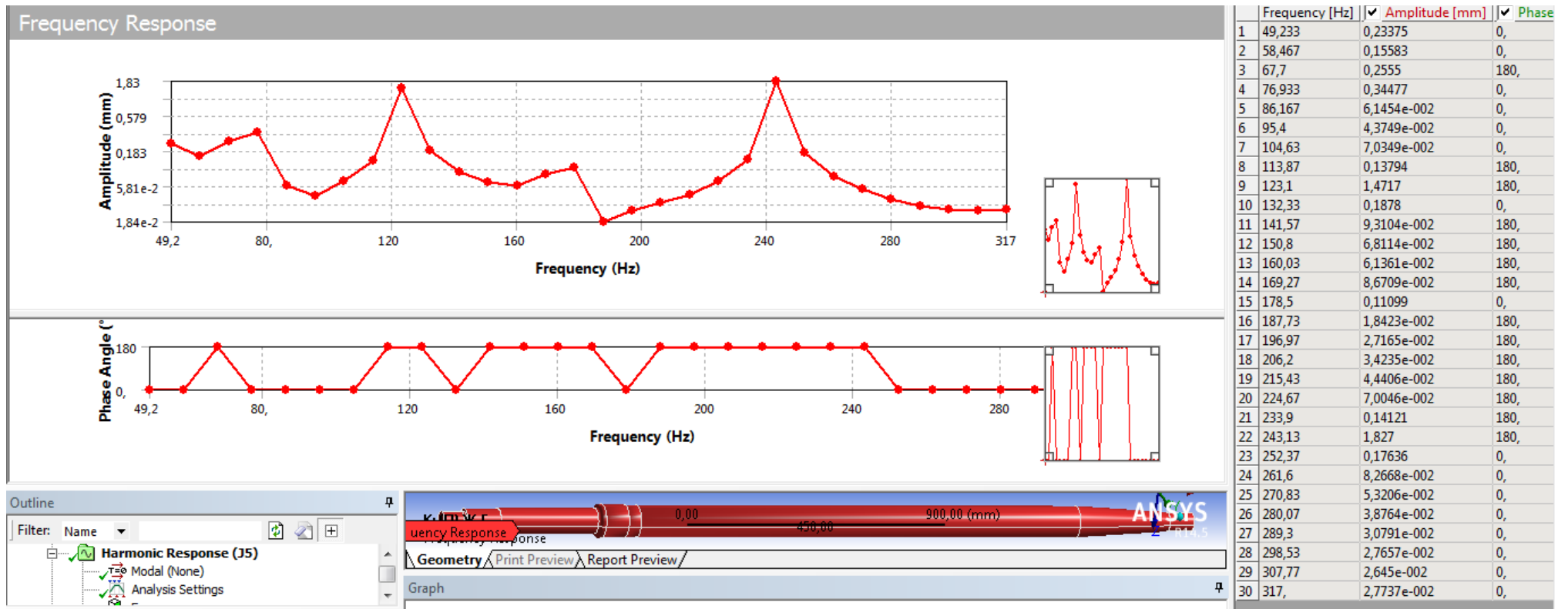


Рисунок 8. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка с правой стороны при условии закрепления на жесткой опоре с левой стороны, и гибкой опоре – с правой

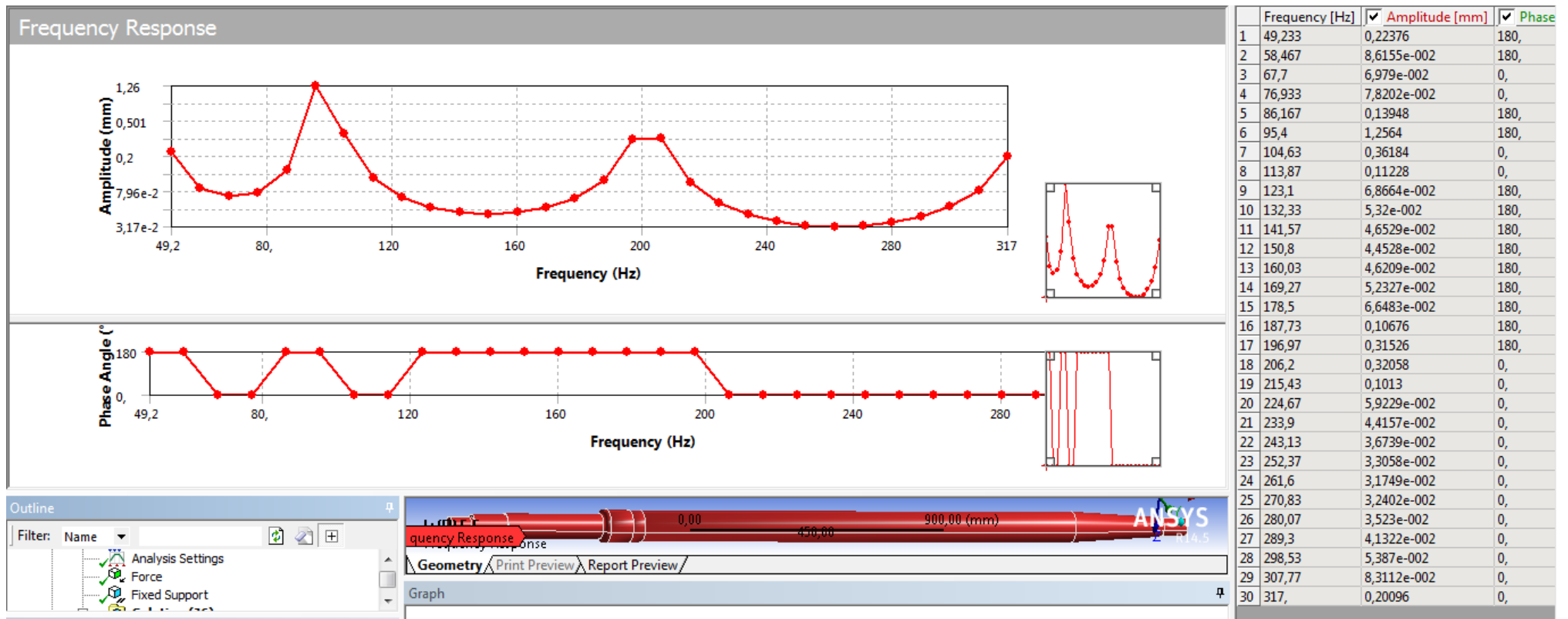


Рисунок 9. Амплитудно-частотная характеристика воздействия вибрационного кулачка с правой стороны при условии закрепления на гибких опорах с обоих концов вала

А.Э. Дубылкин

**СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МАЛОЖЕСТКИХ
ВАЛОВ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Научный руководитель: Д.А. Расторгуев, к.т.н., доцент

Тольяттинский государственный университет

(Россия, г. Тольятти, asv.93@mail.ru)

При изготовлении малоожестких деталей главным фактором, который приводит к короблению заготовок и деталей в эксплуатационный период является неравномерность остаточных напряжений. Основной причиной возникновения остаточных технологических напряжений является неоднородность деформированного состояния материала по объему, в поверхностном слое. Данная неоднородность формируется при действии различных силовых факторов, термического воздействия на изделие (причем влияет и неоднородная тепловая деформация, так и различные фазовые переходы, например переход структуры аустенита в структуру мартенсита). Если не принимать меры по выравниванию и снижению остаточных технологических напряжений, заготовка-деталь подвергается короблению, а на рабочей поверхности образуются усталостные трещины [1].

Существует множество способов стабилизации геометрических параметров деталей в процессе их изготовления и эксплуатации. Одним из способов снижения остаточных технологических напряжений деталей является вибрационная обработка.

На фоне основных тепловых методов снижения остаточных напряжений (отпуск, отжиг, старение) виброобработка имеет преимущество за счет достаточной простой реализации и из-за простоты конструкции источника колебаний, так и из-з малой энергоемкости процесса при небольшой продолжительности.

Задачей вибрационной обработки является упругопластическое деформирование поверхностного слоя изделия за счет воздействия продольных, крутильных и поперечных колебаний, которые вызывают неравномерные микроскопические сдвиги, способствующие релаксации

напряжений. Максимальный эффект вибрационной обработки обеспечивается за счет повышения амплитуды колебаний, что наиболее просто реализуется на собственных частотах заготовки.

При вибрационной обработке длинномерных осесимметричных маложестких валов могут использоваться все формы колебаний [2]. При горизонтальном базировании вал закрепляют не менее чем на трех опорах, для предотвращения провисания заготовки под собственным весом.

Регулирование параметров амплитуды, частоты и формы колебаний на вибрационных установках в основном достигается за счет конструкций вибрационных дебалансов, а так же скорости их вращения и их относительного расположения.

Максимальная пластическая деформация достигается при резонансе вынужденных вибраций с собственной частотой колебаний вала, которая определяется помимо конструктивных параметров вала и схемой его установки. Для варьирования положения по длине вала максимальных амплитуд колебаний используется изменение положения источника вибраций, настраиваемые опоры, которые выставляются таким образом, чтобы положение пучностей колебаний менялось в пределах своей гармоник.

Проблемой данного способа является неравномерная проработка детали по ее длине. Положение пучностей колебаний, где проходит максимально эффективная проработка вала, определяется формой колебаний, соответствующей определенной гармонике колебаний. Технически реализовать частоты более четвертой технически трудно. При высокой рабочей частоте проработки вала большой дебаланс применять невозможно. Возникает задача в перераспределении положения пучностей колебаний по длине вала на различных частотах с целью выравнивания проработки всех сечений. Критерием проработки может считаться количество энергии внесенной при обработке

$$Q = \omega^2 A \quad (1)$$

где ω - круговая частота колебаний, рад/с;

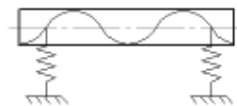
A – амплитуда колебаний, м.

На рис. 1 показаны гармоники колебаний для двух частот.

Места локального вибрационного воздействия на осесимметричный вал



а - на частоте 50 Гц

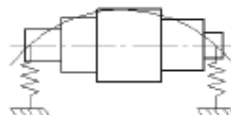


б - на частоте 150 Гц

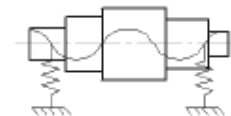
Рис. 1. Форма колебаний гладкого вала на первых двух гармониках

Данным способом возможно равномерное снижение остаточных технологических напряжений для осесимметричных валов. Задача усложняется, если вал имеет ступенчатую конфигурацию, что усложняет форму колебаний заготовки. На рис. 2 показана форма колебаний ступенчатого вала на первых двух гармониках.

Места локального вибрационного воздействия на несимметричный вал



а - на частоте 50 Гц



б - на частоте 150 Гц

Рис. 2. Форма колебаний ступенчатого вала на первых двух гармониках

Актуальной темой является изучение вопроса обеспечения равномерного распределения вибрационных колебаний в длинномерных не осесимметричных многоступенчатых маложестких валах.

В качестве инструмента для проведения эксперимента использовался САЕ-пакет Ansys. Вначале были спроектированы заготовки многоступенчатого и гладкого вала. Оба вала являются осесимметричными и имеют одинаковую длину. В качестве материала была выбрана из стандартной библиотеки программы конструкционная сталь. Затем были заданы одинаковые условия закрепления обеих валов, имитирующие зажимное устройство вибрационной установки [3], а также одинаковые температурные условия в 22С°. После этого на оба вала оказывалось внешнее механическое воздействие с силой в 1000Н.

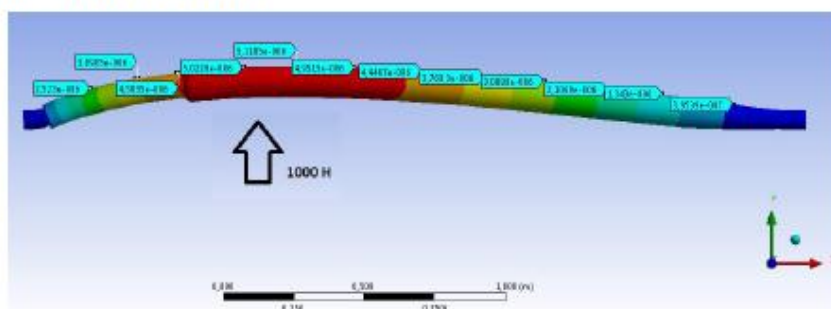


Рис. 3. Деформация многоступенчатого вала

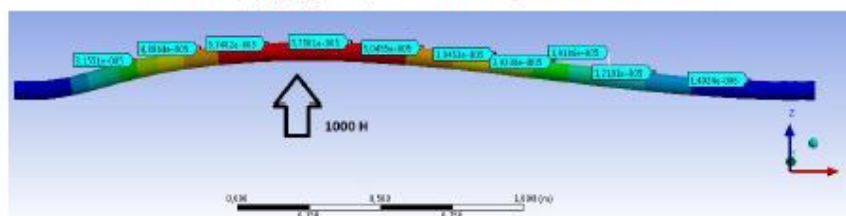


Рис. 4. Деформация гладкого вала

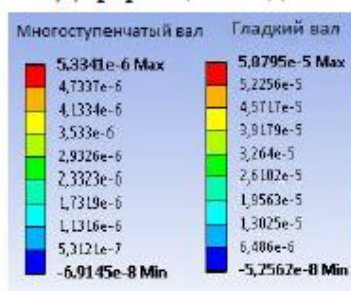


Рис. 5. Результаты исследований

Исходя из результатов исследований, следует отметить, что деформация гладкого вала выше, чем многоступенчатого. Так же, наблюдается неравномерное распределение деформаций в зонах диаметального перепада на многоступенчатом валу.

Список использованных источников

1. Мальцев, С. А. Термосиловая стабилизация мало жестких валов [Текст] / С. А. Мальцев, О. И. Драчев // Проблемы проектирования и автоматизации в машиностроении : сб. науч. тр. серия «Проектирование и применение режущего инструмента в машиностроении». – Краматорск, 2014
2. Драчев О.И. Технология вибрационной обработки и вибрационного точения мало жестких деталей. Ирбит, 2015. - 261 с.
3. Бойченко О.В., Драчев О.И., Гранченко Д.В. Патент №2416475 Установка для виброобработки мало жестких деталей. РФ, 20.03.2011г.

УДК 004

Н. Н. Егорочкин

ИЗУЧЕНИЕ ДЕТЕКТОРА ОСТАВЛЕННЫХ ПРЕДМЕТОВ В ПРОГРАММНОМ ПАКЕТЕ MATLAB

Научный руководитель: Е. С. Глибин, к.т.н., доцент

Тольяттинский государственный университет

(Россия, г. Тольятти, n.egorochkin@mail.ru)

В ряде случаев, для предотвращения террористических актов на станциях метро, автовокзалах недостаточно лишь наличия персонала по обеспечению безопасности, так как человеческий фактор в данном случае играет решающую роль [1].

Создание электронного детектора оставленных предметов позволит сократить вероятность происхождения катастрофы с человеческими жертвами, поскольку будет происходить круглосуточный мониторинг интересующих областей.

ДИПЛОМ

победителя I этапа

научно-практической конференции
«СТУДЕНЧЕСКИЕ ДНИ НАУКИ В ТГУ»

НАГРАЖДАЕТСЯ

Дубылкин Андрей Эдуардович
за III место

в конкурсе докладов по направлению/секции
«Технология машиностроения»

Проректор по научно-инновационной
деятельности ТГУ

С.Х. Петерайтис

Тольятти 2018 г