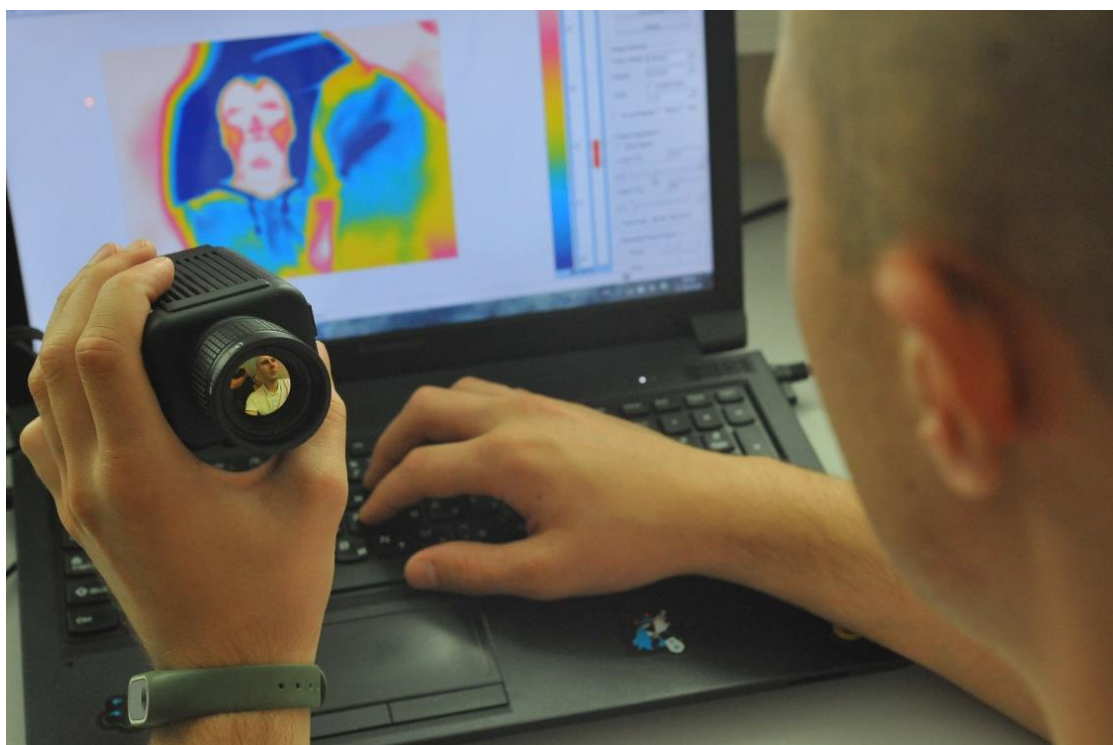


**А. Г. ДИВИН, П. В. БАЛАБАНОВ, Д. А. ЛЮБИМОВА**

# **ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ МЕХАТРОНИКИ И РОБОТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА**

**В двух частях**

**Часть 2**



**Тамбов**

**Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»**

**2023**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

**Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Тамбовский государственный технический университет»**

**А. Г. ДИВИН, П. В. БАЛАБАНОВ, Д. А. ЛЮБИМОВА**

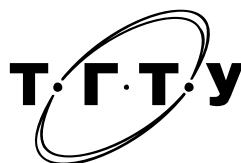
**ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ  
МЕХАТРОНИКИ И РОБОТИЗИРОВАННЫЕ  
КОМПЛЕКСЫ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ  
КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА**

**В двух частях**

**Часть 2**

Утверждено Ученым советом университета  
в качестве учебного пособия для студентов 3 курса,  
обучающихся по направлениям 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»,  
27.03.02 «Управление качеством», очной и заочной форм обучения

*Учебное электронное издание*



---

Тамбов  
Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
2023

УДК 796(075.8)  
ББК Ч-448.005.5я73  
Д44

Рецензенты:

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Транспортные машины»  
ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

*А. А. Генералова*

Кандидат технических наук, доцент кафедры «Компьютерно-интегрированные  
системы в машиностроении» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

*С. В. Карпов*

**Дивин, А. Г.**

Д44 Информационно-сенсорные системы мехатроники и роботизированные комплексы в неразрушающем контроле качества [Электронный ресурс] : учебное пособие. В 2-х ч. / А. Г. Дивин, П. В. Балабанов, Д. А. Любимова. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ».

ISBN 978-5-8265-2454-1

Ч. 1. – 2022. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 43,7 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2455-8

Ч. 2. – 2023. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Системные требования : ПК не ниже класса Pentium II ; CD-ROM-дисковод ; 3,6 Мб ; RAM ; Windows 95/98/XP ; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-8265-2678-1

Изложены основные сведения о датчиках (сенсорах) информационно-сенсорных систем роботов и роботизированных комплексов, применяемых в активном тепловом контроле качества материалов, а также в ультразвуковой дефектоскопии и магнитном контроле изделий из ферромагнитных материалов. Большое внимание уделено изучению сенсоров и актюаторов, применяемых в стендах и машинах для испытания материалов и изделий на воздействие вибрации.

Предназначено для студентов 3 курса, обучающихся по направлениям 15.03.06 «Мехатроника и робототехника», 27.03.02 «Управление качеством», очной и заочной форм обучения.

УДК 796(075.8)  
ББК Ч-448.005.5я73

*Все права на размножение и распространение в любой форме остаются за разработчиком.  
Нелегальное копирование и использование данного продукта запрещено.*

**ISBN 978-5-8265-2454-1 (общ.)**  
**ISBN 978-5-8265-2678-1 (ч. 2)**

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»), 2023

## ВВЕДЕНИЕ

---

Объем мирового рынка неразрушающего контроля (NDT) в 2021 году оценивался в 6,3 млрд долларов США с прогнозируемым среднегодовым темпом роста (CAGR) 13,66% в период с 2022 по 2029 год и достигал общей рыночной стоимости в 16,66 млрд долларов США [1]. Этот высокий уровень роста можно объяснить появлением понятия NDT 4.0, предусматривающим методы неразрушающего контроля изделий с интегрированными в них датчиками, позволяющими автоматизировать и роботизировать процесс контроля.

При неразрушающем контроле и мониторинге качества изделий обычно используются датчики, обеспечивающие непрерывную обратную связь в режиме передачи информации о структурной целостности компонента и наличии в нем дефекта. В настоящее время технология неразрушающего контроля представляет собой независимую междисциплинарную область исследований, посвященную разработке интеллектуальных методов и средств, а также материалов и конструкций с интегрированными в них сенсорами. Для повышения объективности и производительности контроля применяют роботизированные комплексы на основе роботов-манипуляторов, способные при помощи сенсоров обследовать крупногабаритные изделия любой конфигурации. Особое внимание уделяют материалам, называемых в научно-технической литературе умными материалами. Умные материалы с внедренными в них сенсорами можно сравнить с нервной системой человека, основанной на применении различного рода рецепторов (нервных окончаний), способных обнаруживать повреждения человеческого тела через боль. Такие материалы применяются в изделиях на стадии эксплуатации, когда в совокупности с программным обеспечением системы обеспечивается возможность интерпретировать входящие сигналы и реагировать на них соответствующим образом. Эта реакция обычно включает в себя активацию исполнительных механизмов или мышц, чтобы вывести контролируемый объект из опасной ситуации.

Подавляющее большинство рынка неразрушающего контроля основано на контроле внутреннего качества дорогостоящих изделий и компонентов, таких как автомобильные/аэрокосмические компоненты или инфраструктура

общественного железнодорожного транспорта, в первую очередь с использованием радиографического и ультразвукового контроля. Благодаря такой популярности автоматизация подобных методов является наиболее развитой в отрасли неразрушающего контроля. Ожидается, что дальнейший рост автоматизации и роботизации неразрушающего контроля внутреннего качества будет происходить одновременно с развитием других методов неразрушающего контроля, поскольку инновации сместились в сторону более новых и сложных методов, а также внедрением передовых технологий визуализации и машинного обучения. Примеры этих тенденций включают проведение объемного и поверхностного контроля при производстве дорогостоящих компонентов, выполнение контроля с помощью БПЛА, оптимизацию объема собираемых данных и применение машинного/глубокого обучения при анализе созданных наборов данных.

# 1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ

---

## 1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ

Физические методы контроля активно используются в научных исследованиях, производстве и повседневной жизни. В зависимости от воздействия на объект контроль может быть разрушающим или неразрушающим. Разрушающие методы используются для выборочного контроля, основанного на результатах испытаний образца из большой партии продукции. Обычно такие методы используются в лабораторных условиях или при разработке новых материалов и объектов. Если дефект может быть обнаружен только после того, как изделие готово, то проведение разрушающих испытаний оправдано.

Однако особый интерес представляет неразрушающий контроль. Это позволяет проверять качество продукции, не нанося ущерба ее эксплуатационным возможностям. Все дефекты приводят к изменению физических свойств материалов, таких как плотность, электропроводность, магнитная проницаемость и упругие характеристики. Изучение этих изменений и обнаружение дефектов составляют физическую основу методов неразрушающего контроля. Для этой цели используется проникающее излучение, такое как рентгеновские лучи и гамма-лучи, а также ультразвуковые и звуковые волны, магнитные и электромагнитные поля, оптические спектры и капиллярные явления.

Неразрушающий контроль имеет ряд преимуществ, таких как скорость и надежность, возможность механизации и автоматизации процессов контроля, использование изделий сложной формы при испытаниях, возможность использования машин и конструкций без демонтажа, а также относительно низкая стоимость. Согласно ГОСТ 18353–79 [2], методы неразрушающего контроля подразделяются на акустические, магнитные, оптические, проникающие, радиационные, радиоволновые, тепловые, электрические и электромагнитные. Наиболее автоматизируемыми являются методы, перечисленные ниже.

*Тепловой контроль или термография* основан на регистрации температурного поля на поверхности изделия после воздействия тепловой энергии. *Акустический контроль* основан на регистрации параметров упругих волн в контролируемом объекте. *Магнитный контроль* основан на регистрации магнитных полей в контролируемом объекте во время его намагничивания. Это позволяет обнаруживать поверхностные и подповерхностные дефекты в материалах различных типов.

*Оптический контроль* на основе систем технического зрения обладает низкой чувствительностью и надежностью, он используется для поиска крупных поверхностных трещин, повреждений от коррозии и эрозии, вмятин, открытых пор, а также для обнаружения утечек, грязи и других неисправностей.

Каждый метод неразрушающего контроля имеет свои преимущества и применяется в различных областях. Таким образом, тепловой контроль широко используется для обнаружения поверхностных и подповерхностных дефектов, а акустический контроль используется для проверки сварных соединений и элементов конструкции. В целом, неразрушающий контроль является эффективным инструментом обеспечения качества продукции без ее повреждения. Это позволяет выявлять дефекты на ранней стадии, предотвращая серьезные последствия и повышая надежность продукции.

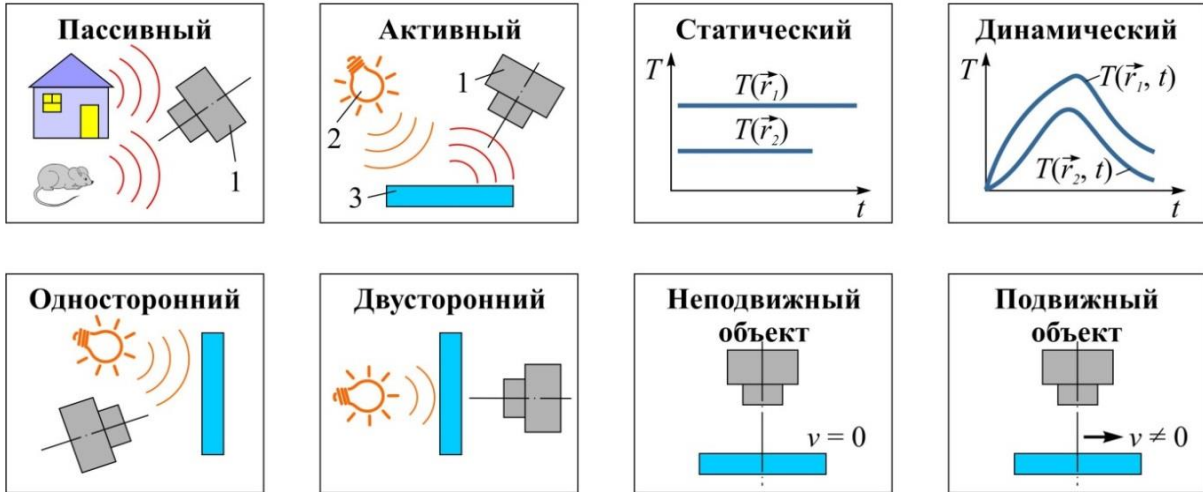
## **1.2. МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ**

Как уже упоминалось, тепловые методы контроля основаны на регистрации аномалий поверхностного температурного поля, являющихся признаками наличия неоднородности в структуре материала.

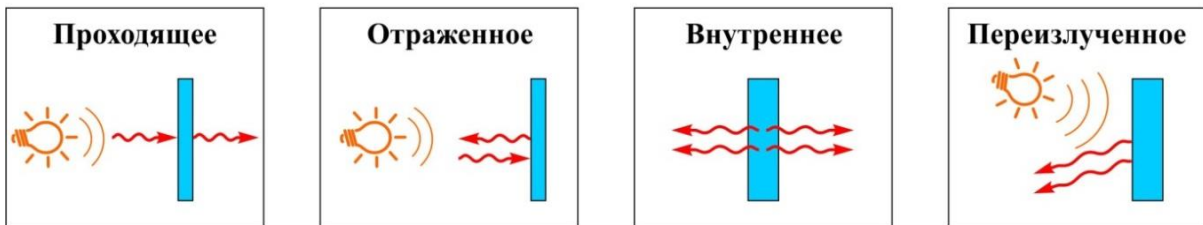
Все тепловые методы инспекции делятся на пассивные и активные (по отсутствию или наличию внешнего источника энергии, возбуждающего тепловое поле). При этом пассивные методы контроля, как правило, применяются, когда в объекте контроля имеется свой внутренний источник тепловой энергии (рис. 1.1).

По характеру температурного поля – зависящему или не зависящему от времени методы контроля можно разделить соответственно на динамические и статические. В зависимости от способа регистрации температурного поля методы теплового контроля могут быть контактными и бесконтактными. В последнем случае применяют тепловизоры или пирометры. Наконец, любые методы исследования материалов могут быть рассчитаны на применение в лаборатории или в производственных условиях на готовых изделиях. Лабораторные методы, как правило, более точны, но требуют тщательной подготовки образцов определенной формы и размеров. Эти образцы приходится вырезать из материала изделия, подготавливать их поверхности, что требует больших трудозатрат и снижает выпуск готовой продукции. Для контроля готовых изделий в производственных или полевых условиях это совершенно недопустимо или невозможно, так что требуются портативные устройства, реализующие полностью неразрушающие методы исследования.

## ПОДХОДЫ



## ИК-ИЗЛУЧЕНИЕ

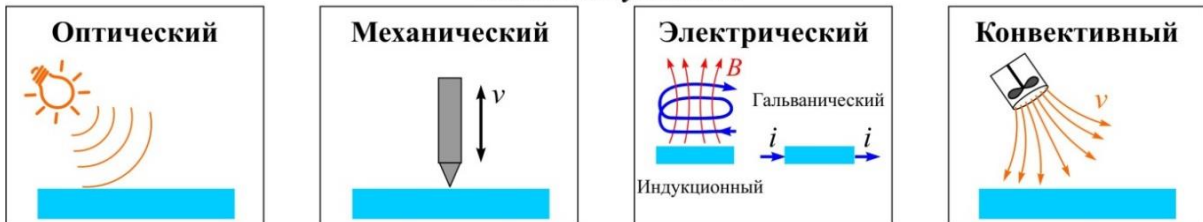


## ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЗБУЖДЕНИЯ

### Пространственное распределение



### Способ возбуждения



### Временной профиль возбуждения



Рис. 1.1. Классификация наиболее распространенных тепловых способов технической диагностики (ТД) и НК:

1 – тепловизор; 2 – источник внешнего возмущения (энергии); 3 – объект контроля

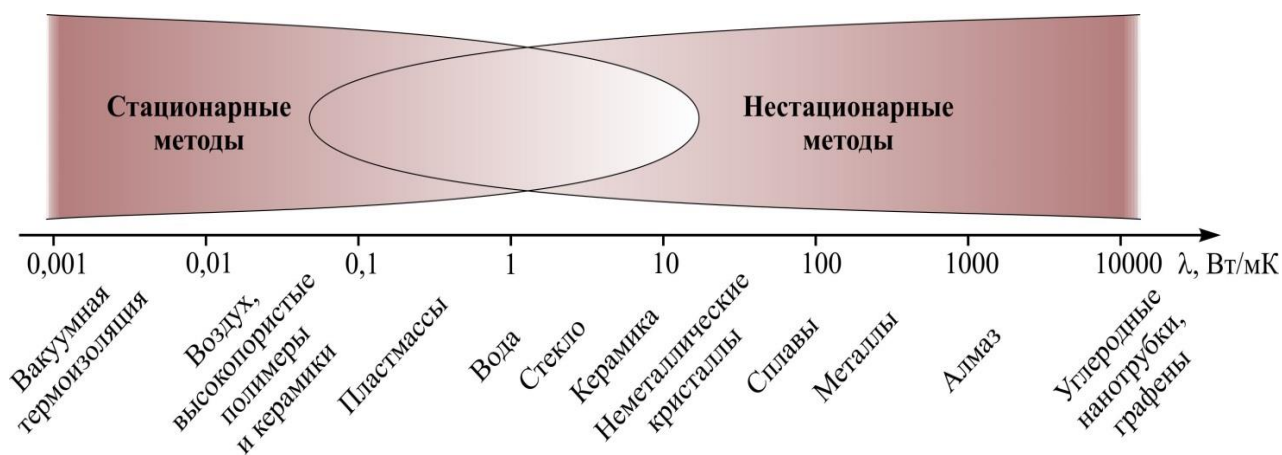


Пассивные методы чаще используются для проверки технологического и энергетического оборудования, транспорта, зданий и сооружений, а также для медицинской диагностики и контроля терапевтических методов. Их особенностью является возможность проверять большие поверхности и крупногабаритные объекты без сканирования, простота реализации и ясность результатов. К недостаткам пассивных методов можно отнести невозможность контроля процессов теплогенерации и характера температурного поля в объекте. Неопределенность в истинном распределении источников тепла в объеме уменьшает информативность этих методов, так как требуется решение обратной математической задачи при отсутствии необходимых полных исходных данных или использование эмпирических данных.

Активные стационарные методы чаще всего используются для определения теплофизических характеристик материала или объекта в целом. Как правило, они требуют образцов определенной формы и размеров, много времени для установления стационарного режима, но это в определенной степени компенсируется простотой реализации и тепловыми моделями процесса. Динамические методы потенциально информативнее статических, поскольку позволяют измерять не только коэффициент теплопроводности  $\lambda$ , но и температуропроводность  $a$ , а также удельную теплоемкость  $c_p$ . Они также широко применяются для неразрушающего контроля различных изделий, в том числе и крупногабаритных (например, авиационно-космической техники). Нестационарные методы теплодинамики и неравновесных кинетических явлений могут быть реализованы очень быстро, что позволяет их встраивать в технологические линии для контроля объекта на месте. Однако они требуют более сложного и дорогостоящего оборудования, более сложных математических моделей и программного обеспечения для получения нужных данных и более квалифицированного обслуживания.

Стационарные методы лучше подходят для испытания теплоизолирующих материалов, таких как газы, высокопористые полимеры, керамика, пластмассы, огнеупоры, которые характеризуются низкими значениями  $\lambda$ , а нестационарные методы – для неметаллических кристаллов, металлов, сплавов, нанокристаллических материалов с высокими значениями  $\lambda$  (рис. 1.2). В среднем диапазоне (в области  $0,1 < \lambda < 10$  Вт/м·К) оба типа методов могут быть использованы с одинаковым успехом.

По типу симметрии создаваемого зондирующего теплового поля все методы ТД и НК можно разделить на 3 класса: создающие и использующие поле плоских, цилиндрических и сферических изотерм.



**Рис. 1.2. Преимущественные области применения стационарных и нестационарных методов теплового контроля и типичные представители некоторых классов материалов в шкале их теплопроводности**

Каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Поле с плоскими изотермами труднее всего создавать (поскольку необходимо исключать или подавлять краевые эффекты), но проще всего интерпретировать результаты. Поле с цилиндрическими изотермами создавать легче и его математическое описание не намного сложнее плоского случая. Наконец, сферическое поле изотерм тоже нетрудно создать точечными источниками тепла. Математическая модель в этом случае проста, и в большинстве случаев не требуется принимать специальных мер для устранения неконтролируемых утечек тепла из нагреваемой зоны, в отличие от первых двух.

В стационарных условиях и в отсутствие теплообмена с окружающей средой (что само по себе является задачей разной сложности для этих 3 ситуаций) тепловой поток  $Q$  через любую замкнутую поверхность должен быть равен интегральной мощности источников тепла, лежащих внутри ограничиваемого этой поверхностью объема. Исходя из обычно принимаемого эмпирического закона теплопроводности Фурье

$$q = -\lambda dT/dx,$$

стационарности распределения и отсутствия источников тепла в материале, получаем

$$Q = F \lambda dT/dr,$$

где  $F$  – площадь поверхности;  $q$  – плотность теплового потока;  $T$  – температура;  $x, r$  – координаты.

Таким образом, коэффициент теплопроводности в этих трех геометриях, в которых  $F = S$ ,  $F = 2\pi r\delta$  и  $F = 2\pi r^2$  соответственно, определяется простыми соотношениями:

Исходя из вышесказанного, суть задачи сводится к следующему: используя локальный нагрев материала и термофильмирование, просканировать поверхность образца для поиска дефектов, залегающих в подповерхностном слое изделия.

Исходя из предполагаемых областей применения, можно выделить типичные материалы, дефекты в которых будут выявляться при помощи этого метода. К таким материалам относятся: полимеросотопласты, полимеры, армированные углеродным волокном, стеклопластики на основе различных наполнителей, углепластики, гибридные стеклоуглепластики и прочие.

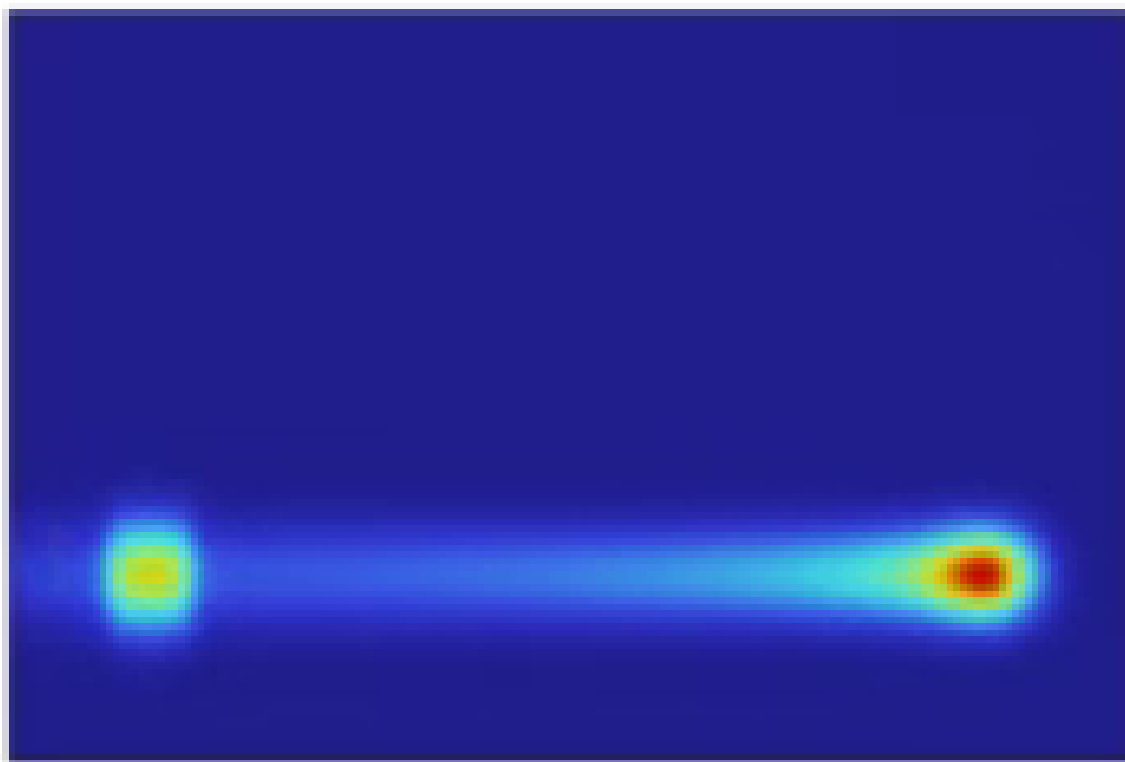
В материалах, указанных выше, дефектами являются:

- пористость – нарушение целостности материала с образованием микро- или макропор – газовых (воздушных) полостей;
- расслоение – разрушение связующего между слоями внутри материала;
- непрочлей – разрушение клеевого соединения между монолитными деталями из стеклопластика или углепластика;
- отслоение заполнителя – непрочлей между обшивкой и заполнителем;
- влага в сотах – попадание и накопление влаги в сотовых конструкциях.

Все перечисленные дефекты представляют собой объемы инородного вещества, включенного в постоянную или единообразную структуру материала. Инородное вещество (обычно – воздух или вода с примесями) обладает коэффициентами теплопроводности и температуропроводности, значительно отличающимися от аналогичных показателей составляющих веществ композиционного материала, что обуславливает возможность применения термографического метода контроля.

### **1.2.1. Применение роботов-манипуляторов для автоматизации теплового контроля изделий**

Целесообразность применения роботов-манипуляторов в тепловых методах контроля вытекает из необходимости обследовать крупногабаритные изделия, имеющие сложную конфигурацию с криволинейной поверхностью. В этом случае имеет смысл использовать локальный нагрев образца при помощи движущегося источника тепла в виде лазера достаточно большой мощности и тепловизионную камеру с частотой видеопотока от 25 кадров в секунду. Использование лазера в качестве рабочего органа манипулятора позволяет выдерживать заданное направление светового потока к нормали поверхности и таким образом обеспечить равномерность нагрева образца вдоль траектории движения.



**Рис. 1.3. Температурное поле поверхности образца после нагрева движущимся лазером (результат численного моделирования в среде Comsol)**

При наличии любых структурных неоднородностей в материале будут возникать зоны с аномалиями температуры на его поверхности, наблюдаемые при помощи тепловизионной камеры (рис. 1.3).

Преимущество нагрева объекта контроля лазером перед нагревом галогенными лампами в том, что в этом случае тепловизор воспринимает только тепловое излучение от объекта контроля. В противном случае возникает помеха в виде отраженного излучения нагретой лампы от образца.

В качестве примера стенда для теплового контроля рассмотрим роботизированный комплекс на основе учебно-исследовательского манипулятора со сферической зоной обслуживания PASKAL DELTA 5X-ARMDUINO (далее – Delta 5X), изготовленный в г. Челябинск (Россия). Робот Delta 5X (рис. 1.4 и рис. 1.5), который относится к классу манипуляторов, оснащенных системой прямого компьютерного управления класса PCNC.

Блок управления роботом 4 получает готовые данные от компьютера 5, осуществляет их интерпретацию и управление движением рабочим органом 2 (лазером) манипулятора 1. Робот имеет 5 вращательных сочленений (рис. 1.6), которые обозначены как Z, Y, X, A, B. Тепловизионная камера 6 типа FLIR A35 служит для получения информации о температурном поле объекта контроля 7.

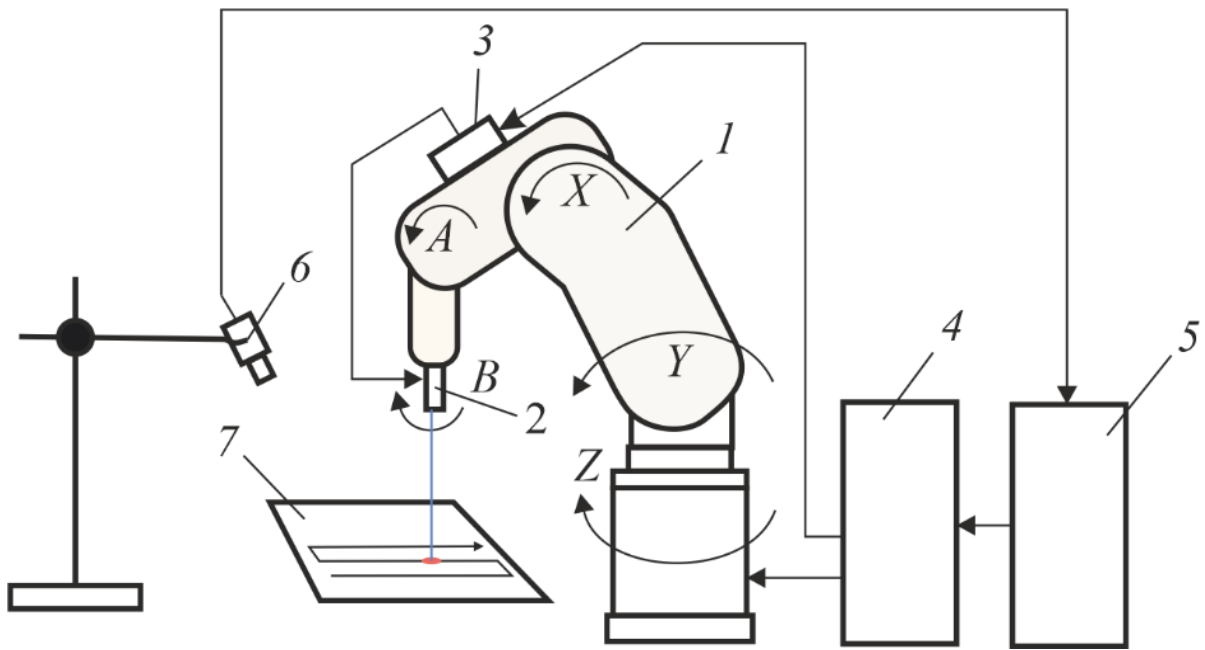


Рис. 1.4. Структурная схема установки с роботом Delta 5X и расположение осей робота

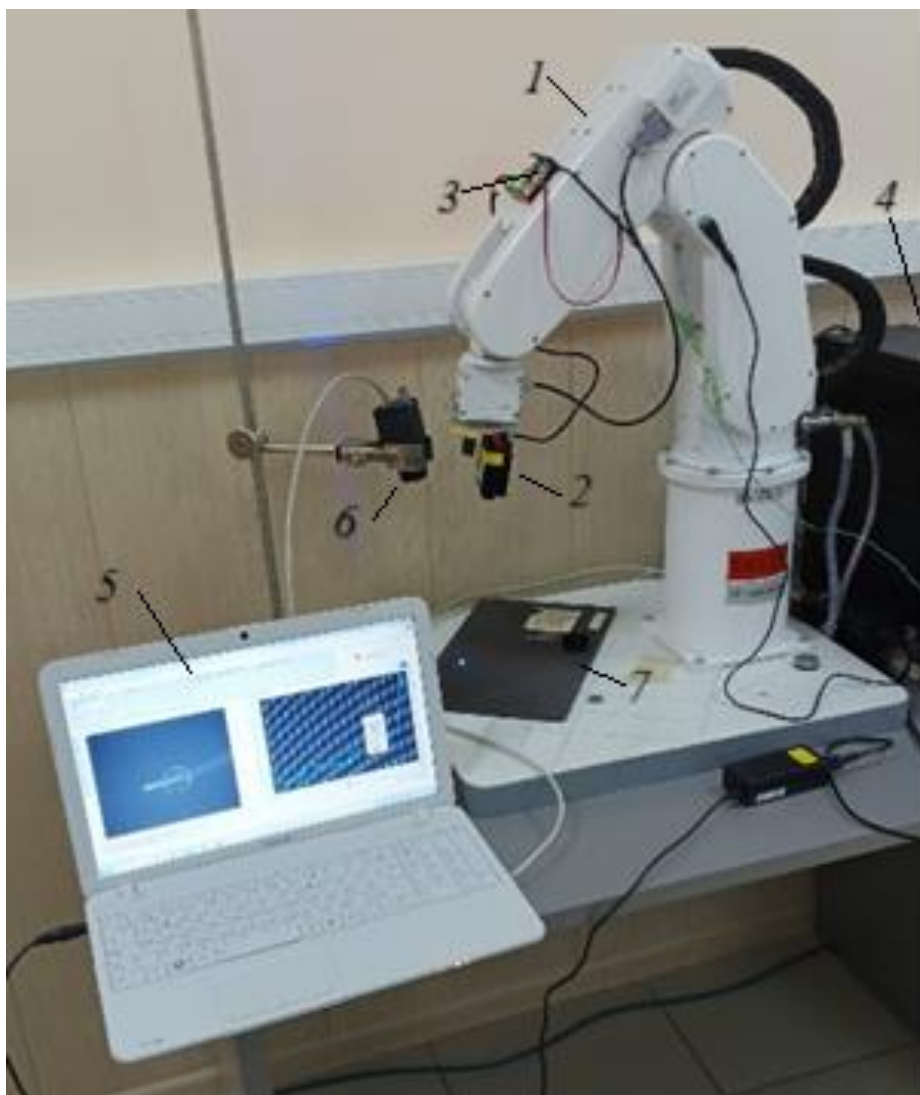
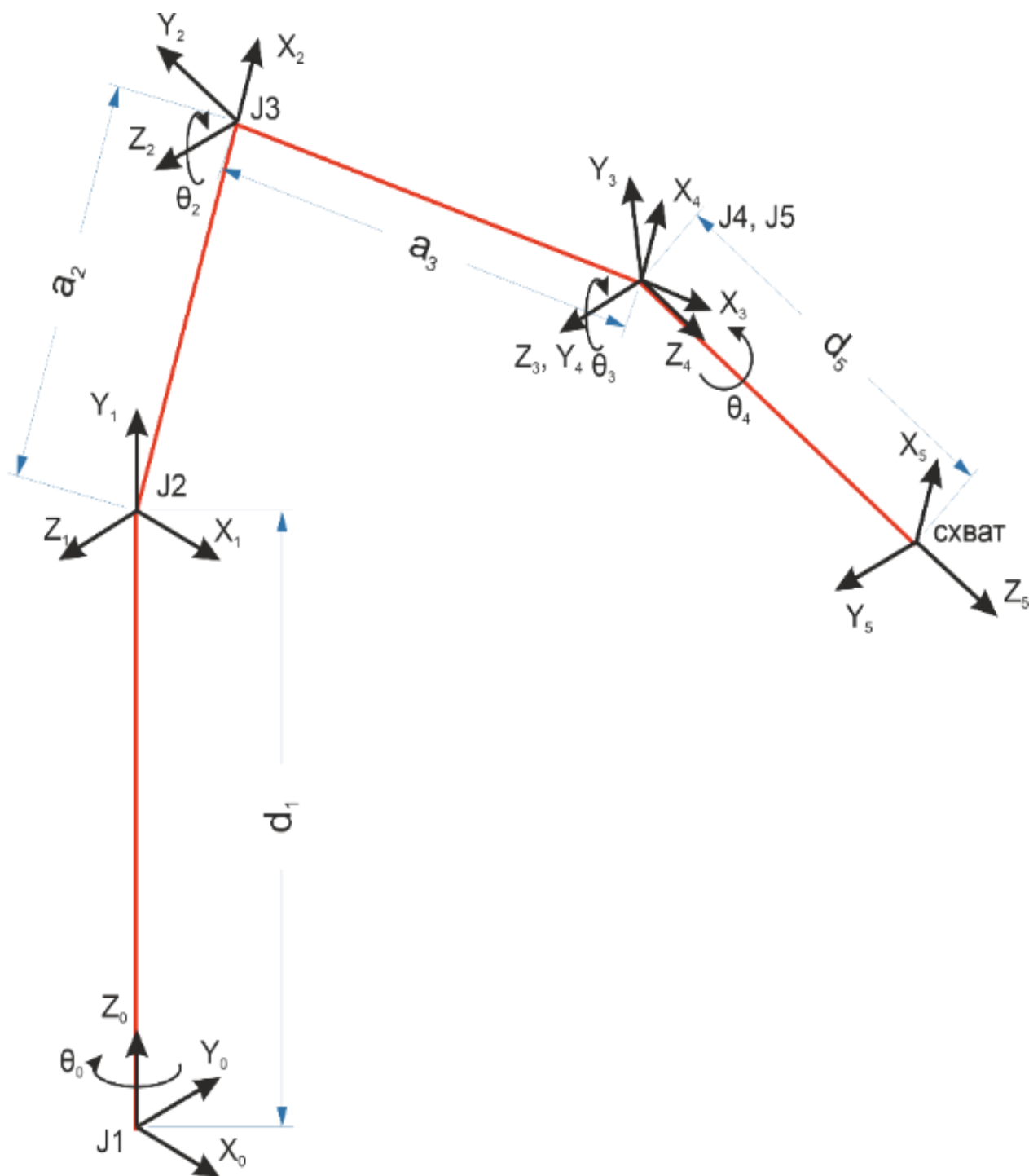


Рис. 1.5. Общий вид установки с роботом Delta 5X



**Рис. 1.6. Кинематическая схема робота Delta 5X**

При проведении экспериментов в качестве источника тепловой энергии на первом этапе использовался лазер фирмы XINRUI (Китай) мощностью 500 мВт с длиной волны 405 нм и тепловизор Flir A35 (США).

В связи с тем, что комплекс предназначен для выявления дефектов на образцах со сложной формой поверхности, должна быть реализована возможность движения эндэффектора (конечной точки последнего звена) с лазером по сложной траектории с огибанием «рельефа» поверхности.

Для управления движением рабочего органа робота решается обратная задача кинематики (далее – ОЗК) с применением метода Денавита–Хартенберга [3]. При этом необходимо определить углы поворота каждого звена робота так, чтобы лазер оказался в заданной точке пространства с известными координатами в базовой системе координат и с заданной ориентацией последнего звена.

Перед началом перемещения звеньев робот должен занять исходное положение, при котором углы поворота осей сочленений  $Z, Y, X, A, B$  принимаются нулевыми. При этом для определения обобщенных координат  $\Theta_i$  – углов поворота вокруг оси  $Z_i$  следует учесть эти начальные углы.

В представлении Денавита–Хартенберга положение звеньев кинематической схемы (рис. 1.6) зависит от четырех геометрических параметров, соответствующих каждому звену.

Эти четыре параметра полностью описывают любое вращательное или поступательное движение и определяются следующим образом:

- $\alpha_i$  – угол, на который надо повернуть ось  $Z_{i-1}$  вокруг оси  $X_{i-1}$ , чтобы она стала сонаправленной с осью  $Z_i$  (знак определяется в соответствии с правилом правой руки);
- $d_i$  – расстояние между пересечением оси  $Z_{i-1}$  с осью  $X_i$  и началом  $(i-1)$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси  $Z_{i-1}$ ;
- $a_i$  – линейное смещение – расстояние между пересечением оси  $Z_{i-1}$  с осью  $X_i$  и началом  $i$ -й системы координат, отсчитываемое вдоль оси  $X_i$ , т.е. кратчайшее расстояние между осями  $Z_{i-1}$  и  $Z_i$ ;
- $\Theta_i$  – угол, на который надо повернуть ось  $X_{i-1}$  вокруг оси  $Z_i$ , чтобы она стала сонаправленной с осью  $X_i$  (знак определяется по правилу правой руки).

В таблице 1.1 указаны параметры Денавита–Хартенберга для схемы, показанной на рис. 2 (табл. 1).

Решение ОЗК заключается в нахождении обобщенных координат  $\Theta_i$ ,  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  обеспечивающих заданные координаты  $(x, y, z)$  лазера в пространстве. При этом необходимо решить две подзадачи:

- ОЗК по положению (определение  $\Theta_0, \Theta_1$  и  $\Theta_2$ );
- ОЗК по ориентации (определение  $\Theta_3$  и  $\Theta_4$ ).

Зная величины  $d_5$ , а также угол ориентации запястья  $\alpha$  по отношению к нормали поверхности объекта контроля, можно определить значения обобщенных координат  $\Theta_1, \Theta_2$  и  $\Theta_3$ , используя тригонометрический подход (рис. 1.7).

Таблица 1.1

Нулевые углы	Номер звена	$\Theta_i$	$\alpha_i$ , рад	$d_i$ , мм	$a_i$ , мм
$0^\circ$	1	$\Theta_0$	$\alpha_1 = 0,5\pi$	$d_1 = 307$	0
$88^\circ$	2	$88^\circ + \Theta_1$	0	0	$a_2 = 231$
$-61^\circ$	3	$-61^\circ + \Theta_2$	0	0	$a_2 = 251$
$-18^\circ$	4	$-18^\circ + \Theta_3$	$\alpha_4 = -0,5\pi$	0	0
$0^\circ$	5	$\Theta_4$	0	$d_5 = 174$	0

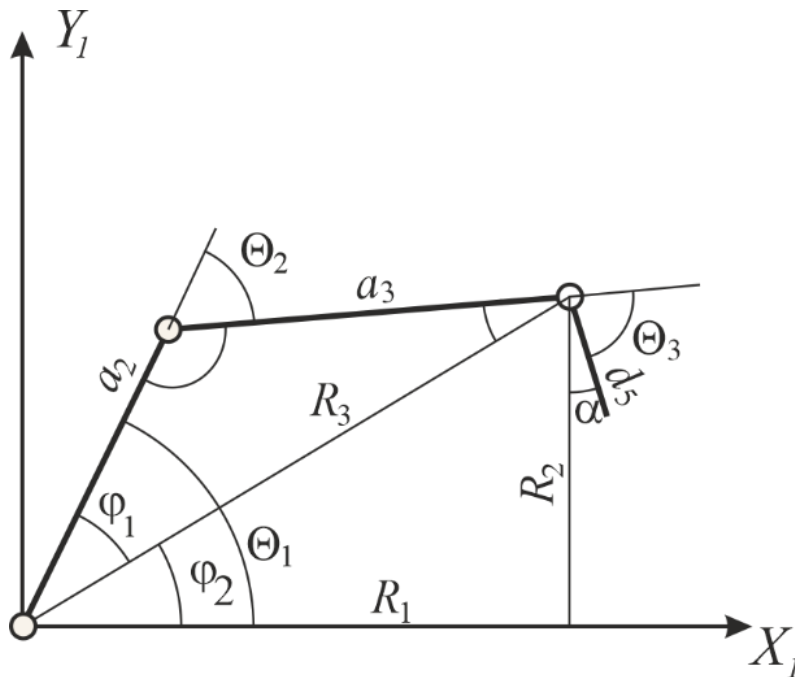


Рис. 1.7. Тригонометрический подход для решения ОЗК

При этом легко показать, что выражения для их вычисления будут иметь вид:

$$\Theta_0 = \text{atan2}(x, y); \quad (1)$$

$$\varphi_2 = \text{atan2}(R_1, R_2); \quad (2)$$

$$R_2 = z + d_5 \cos \alpha - d_1; \quad (3)$$

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad (4)$$

$$R_3 = \sqrt{R_1^2 + R_2^2}; \quad (5)$$

$$\varphi_1 = \arccos \left( \frac{a_3^2 - a_2^2 - R_3^2}{-2a_2 R_3} \right); \quad (6)$$



$$\Theta_1 = \Phi_1 + \Phi_2; \quad (7)$$

$$\Theta_2 = \left( \pi - \arccos \frac{(R_3^2 - a_2^2 - a_3^2)}{-2a_2a_3} \right). \quad (8)$$

Углы  $\Theta_3$  и  $\Theta_4$  определяются исходя из того, что комбинация последовательных вращений вокруг текущих осей может быть описана перемножением соответствующих матриц поворота, т.е. матрицу поворота  $R_5^0$  системы координат  $X_5Y_5Z_5$  относительно системы  $X_0Y_0Z_0$  можно выразить как

$$R_5^0 = R_3^0 R_5^3,$$

откуда:

$$R_5^3 = (R_3^0)^{-1} R_5^0. \quad (9)$$

Матрица поворота  $R_3^0$  находится путем решения прямой задачи кинематики по известному вектору обобщенных координат  $(\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2)$  и матрицам однородного преобразования (здесь функции косинуса обозначены как символом «с», а синуса – «s»):

$$T_i = \begin{pmatrix} c_{\Theta_{i-1}} & -s_{\Theta_{i-1}} c_{\alpha_i} & s_{\alpha_i} s_{\Theta_{i-1}} & \alpha_i c_{\Theta_{i-1}} \\ s_{\Theta_{i-1}} & c_{\alpha_i} c_{\Theta_{i-1}} & -s_{\alpha_i} c_{\Theta_{i-1}} & \alpha_i s_{\Theta_{i-1}} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad i = 1, 2, 3. \quad (10)$$

Итоговую матрицу можно получить последовательным перемножением:

$$T_3^0 = T_1 T_2 T_3 = \begin{pmatrix} R_3^0 & p \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $p$  – вектор, соединяющий центры шарниров первого и третьего сочленений.

Из (11) получим компоненты матрицы поворота  $R_3^0$ , а затем, с использованием (9) находим искомую матрицу  $R_5^3$

$$R_5^3 = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix},$$

позволяющую определить угол поворота  $\Theta_4$  по расчетной зависимости:

$$\Theta_3 = \text{atan2}(r_{23}, r_{33}).$$

Угол  $\Theta_5$  рассчитывается с учетом ориентации объекта по формуле:

$$\Theta_4 = \text{atan2}(\sqrt{1-r_{33}^2}, r_{33}).$$

Опорные точки траектории движения эндэфектора манипулятора с лазером последовательно рассчитываются методом решения ОЗК по заданным координатам  $x_i, y_i$ , описанным выше.

Для испытания предложенного подхода был использован контрольный образец 1 (рис. 1.8) толщиной 5 мм, изготовленный из композиционного материала (стеклоуглепластик) с искусственно заложенным дефектом типа «расслоение». Дефект был образован путем закладки ленты из титанового сплава и фоторопластовой пленки с последующим их извлечением. При этом образуется разрушение межслойных связей между слоями наполнителя площадью не менее  $0,5 \text{ см}^2$  и на расстоянии не менее 10 мм от края образца.

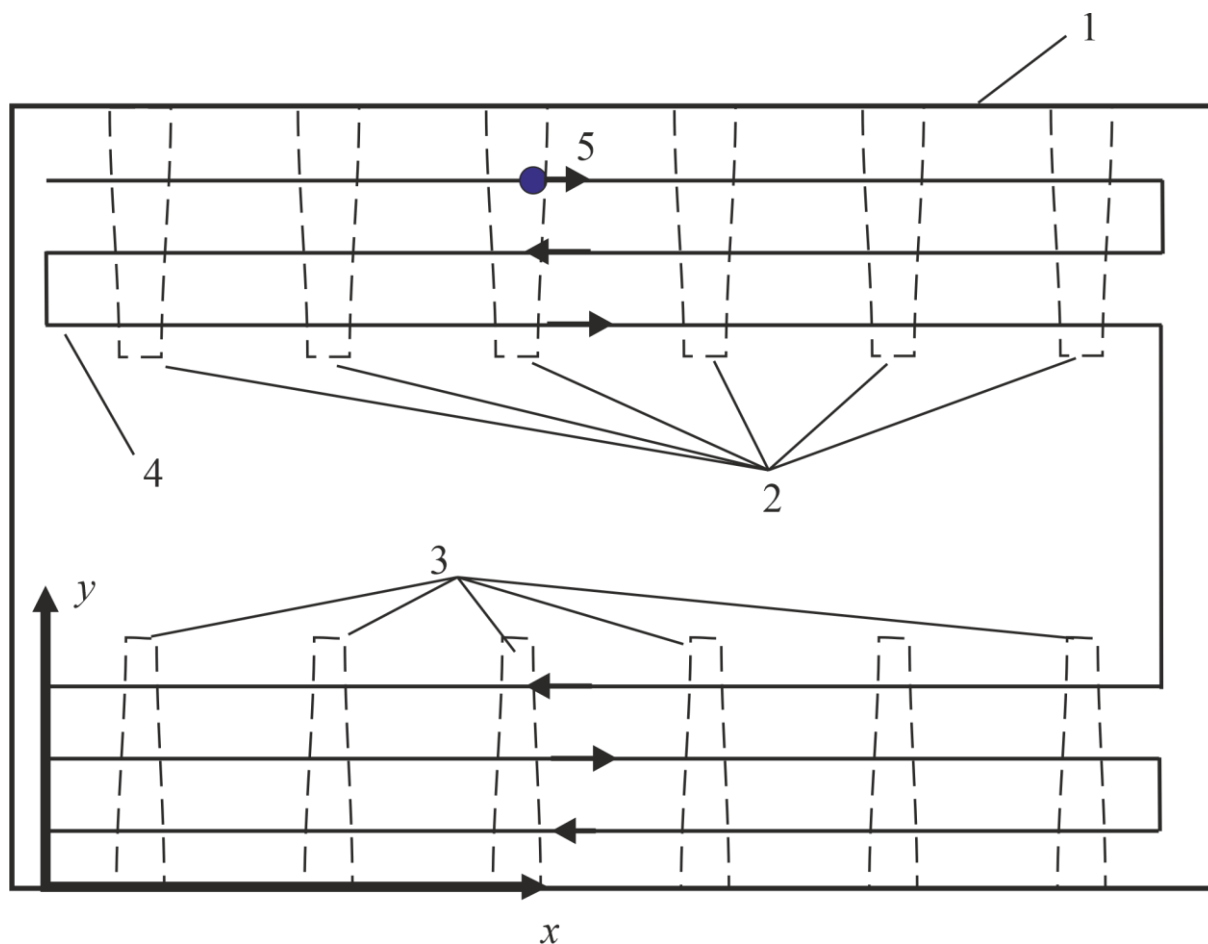
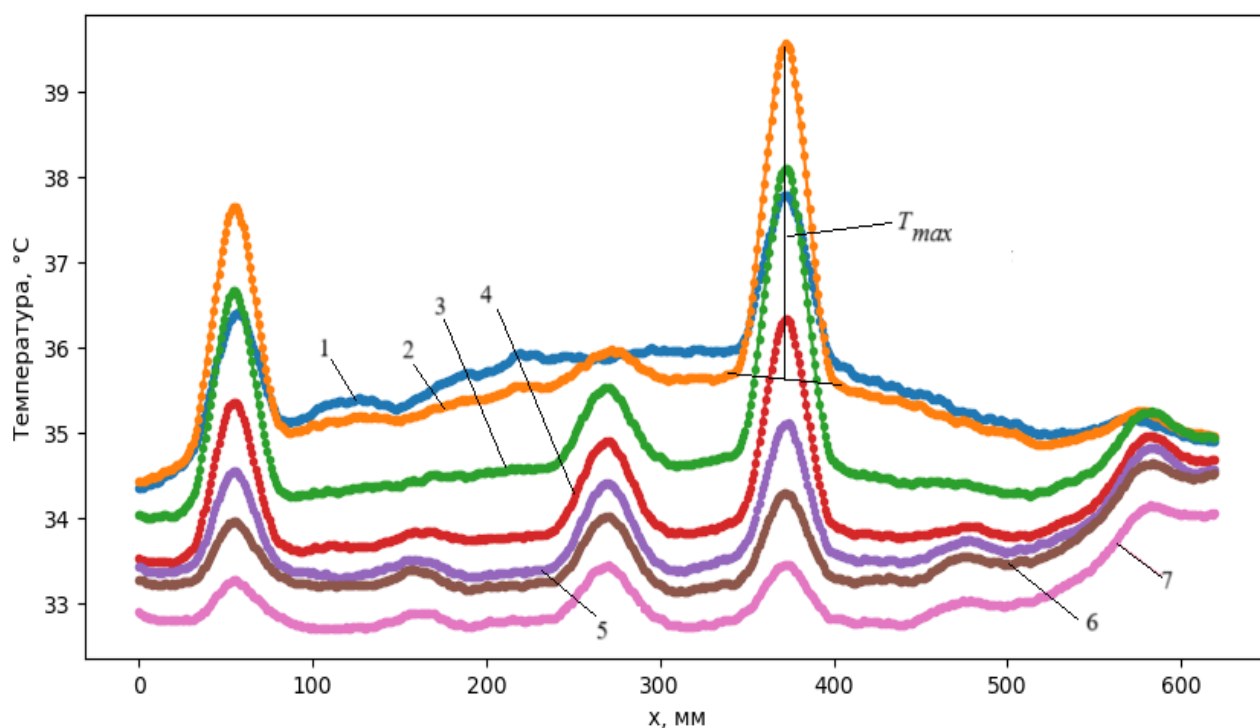


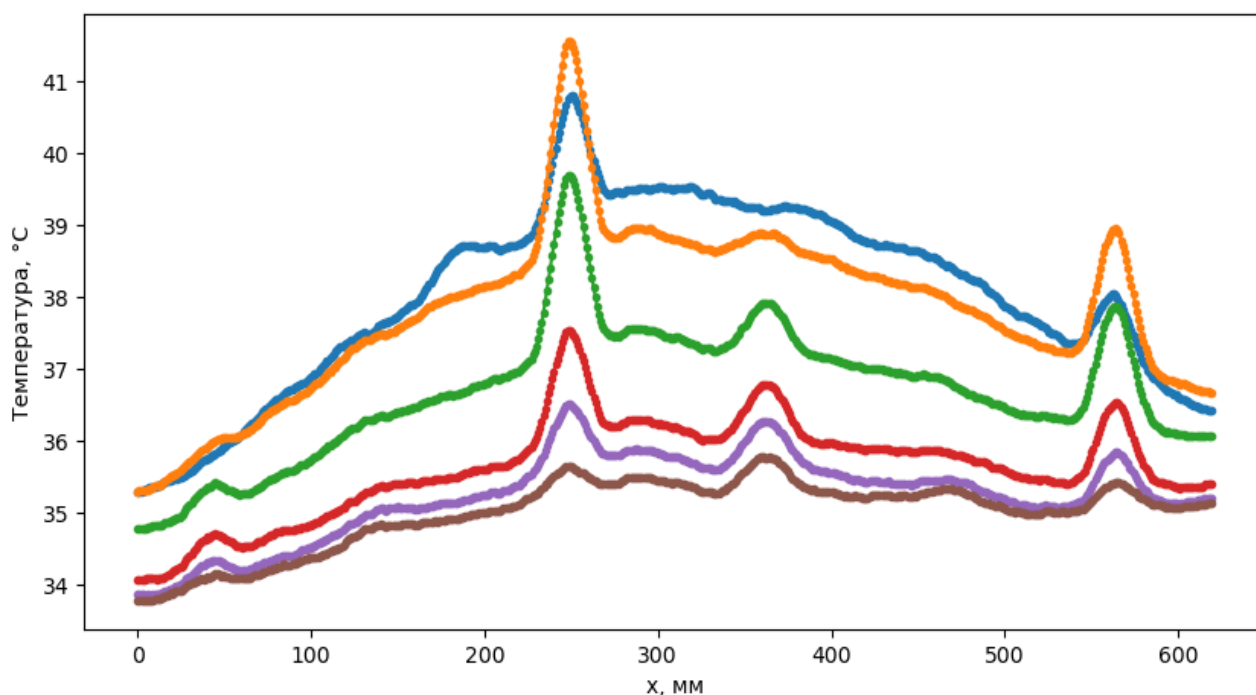
Рис. 1.8. Общий вид контрольного образца с заложенными дефектами

Для испытаний были использованы дефекты под номерами 2 и 3. При этом дефекты 1 имели ширину от 10 до 15 мм, длину 50 мм и глубину залегания соответственно 1,1; 3,1; 2,2; 1,1; 3,0; 2,2 мм; а дефекты 2 имели ширину от 5 до 10 мм, длину также 50 мм; и глубину залегания 1,2; 1,1; 2,3; 1,3; 1,0; 2,3 мм. При контроле луч лазера 5 перемещался со скоростью 5 мм/с по траектории 4 перпендикулярно дефектным зонам образца, имеющих различную ширину. Кроме этого, для разных проходов лазера пятно нагрева будет проходить через зоны дефектов с различной глубиной залегания. Регистрация температурного следа происходила при помощи тепловизионной камеры FLIR A35, позволяющей записывать термофильмы, используя которые, при помощи разработанного программного обеспечения строились термограммы по температурам, установившимся спустя заданное время после прохождения лазера. Таким образом, были получены зависимости температуры от времени и координаты  $x$ , показанные на рис. 1.9 и 1.10.

Анализ термограмм рис. 1.9 и 1.10 показывает, что дефекты проявляют себя в виде пиков температуры, причем на амплитуду импульсов, а также на время достижения максимальной температуры влияет глубина залегания дефекта.



**Рис. 1.9. Термограммы дефектов группы 2 для различных значений времени после прохождения лазера:**  
 1 – 3 с; 2 – 8 с; 3 – 13,01 с; 4 – 18 с; 5 – 23 с; 6 – 28 с; 7 – 35 с



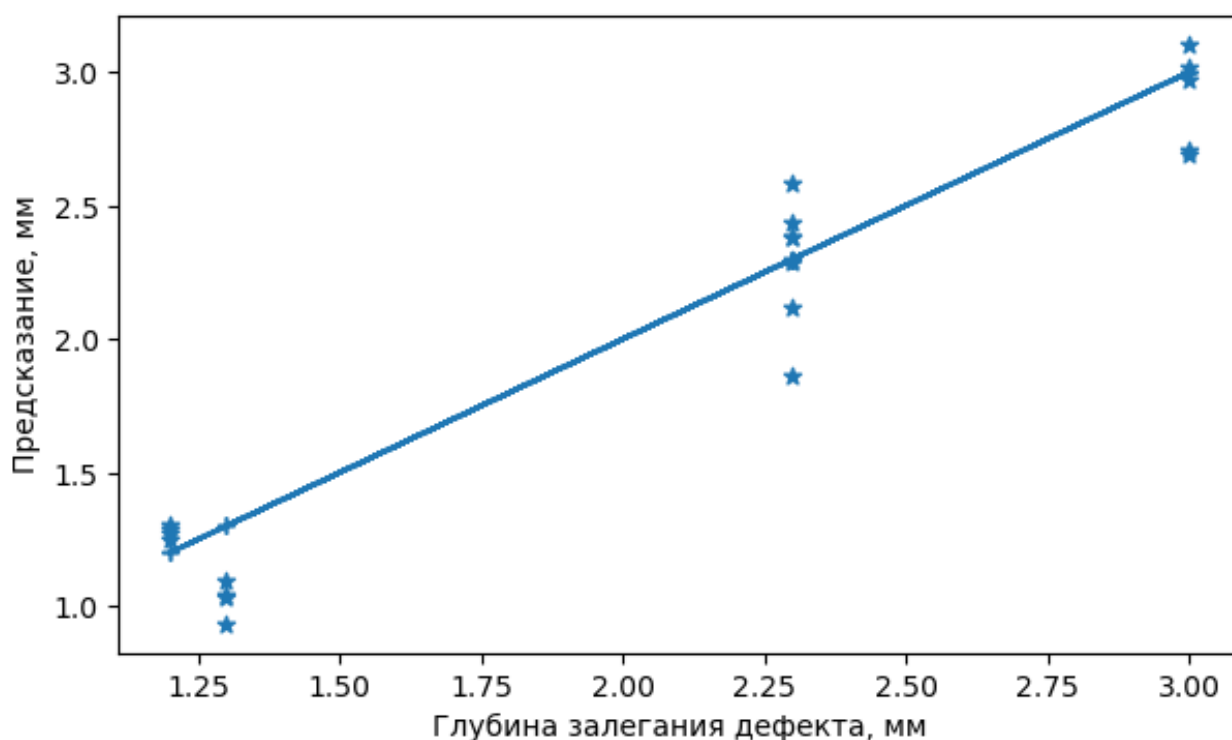
**Рис. 1.10. Термограммы для дефектов группы 3 при различных значениях времени после прохождения лазера:**  
 1 – 3 с; 2 – 8 с; 3 – 13,01 с; 4 – 18 с; 5 – 23 с; 6 – 28 с; 7 – 35 с

Таким образом, появляется возможность предсказания глубины залегания дефекта по экспериментально полученным данным с тепловизора с использованием множественного регрессионного анализа. Для этой цели были получены обучающая (20 измерений) и тестовая выборка (10 измерений) с использованием результатов эксперимента на контрольном образце. Траектории движения лазера точки нагрева на поверхности контрольного образца выбирались таким образом, чтобы они проходили над областью дефекта с различной шириной. В качестве предикторов были выбраны  $T_{\max}$  – амплитуда импульса максимальной температуры и  $\tau_{\max}$  – время достижения максимальной температуры. Термограммы были получены для различных траекторий движения лазера через зоны дефектов различной ширины.

Полученная линейная регрессионная модель с применением библиотек языка программирования Python имеет вид:

$$\hat{h} = -0,267T_{\max} + 0,052\tau_{\max} + 1,6,$$

где  $\hat{h}$  – предсказанное значение глубины залегания дефекта. При этом метрики качества регрессионной модели оказались равными: коэффициент детерминации  $R^2 = 0,91$ , а среднее квадратическое отклонение  $MSE = 0,06$  мм.



**Рис. 1.11.** Диаграмма рассеяния для полученной модели регрессии

В приложении приведен код программы, написанной в среде *Jupyter Notebook*, для обработки массивов значений температур и времени, полученных с применением тепловизионной камеры с целью построения термограмм, их обработки (фильтрации методом скользящего среднего) и определения регрессионной модели по двум признакам, позволяющей определять глубину залегания дефекта.

Таким образом, можно сказать, что проведенные экспериментальные исследования подтвердили, что данный вид контроля позволяет надежно определять дефекты типа «расслоение», залегающие на глубине до 2,5 мм. Для повышения производительности контроля необходимо использовать несколько лазеров в ряд, или применять развертку луча лазера в линию.

### **1.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РОБОТИЗИРОВАННОГО АКУСТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ**

#### **1.3.1. Характеристики акустических методов**

**Акустическими методами** называют методы, основанные на регистрации параметров упругих колебаний (волн), возбуждаемых и (или) возникающих в объекте контроля. Методы, использующие частоты от 20 кГц до 100 МГц, называют ультразвуковыми (УЗ) [9, 12 – 16].

*Колебание* – движение вокруг некоторого среднего положения, обладающее повторяемостью, например, колебание маятника. В акустике обычно рассматривают колебания точки среды относительно положения, в котором точка находилась в покое. Волны – колебательные движения, распространяющиеся в пространстве: колебания одной точки передаются соседней и т.д. В отличие от электромагнитных волн упругие колебания распространяются в материалах (жидких, газообразных и твердых), состоящих из частиц (атомов и молекул).

*Упругость* – свойство точек среды возвращаться к первоначальному состоянию после прекращения воздействия силы. Жидкие, газообразные и твердые среды восстанавливают свой объем после сжатия или разрежения, но под действием сил инерции точки продолжают двигаться после достижения первоначального состояния. В результате сжатие переходит в растяжение, а потом опять в сжатие – возникают упругие колебания. Такой процесс распространяется в материале изделия и образует упругую волну.

Упругая волна представляет собой процесс распространения возмущений в среде в результате действия механических сил, происходящий благодаря упругому взаимодействию частиц среды (см. рис. 1.12, а, в).

Колебательный процесс характеризуется двумя основными величинами: частотой и амплитудой колебаний.

В зависимости от частоты акустических волн, различают звук, воспринимаемый человеком (от 20 Гц до 20 кГц), а также ультразвук (от 20 кГц) и инфразвук (менее 20 Гц), относящийся к звуку, который воспринимается органами чувств человека.

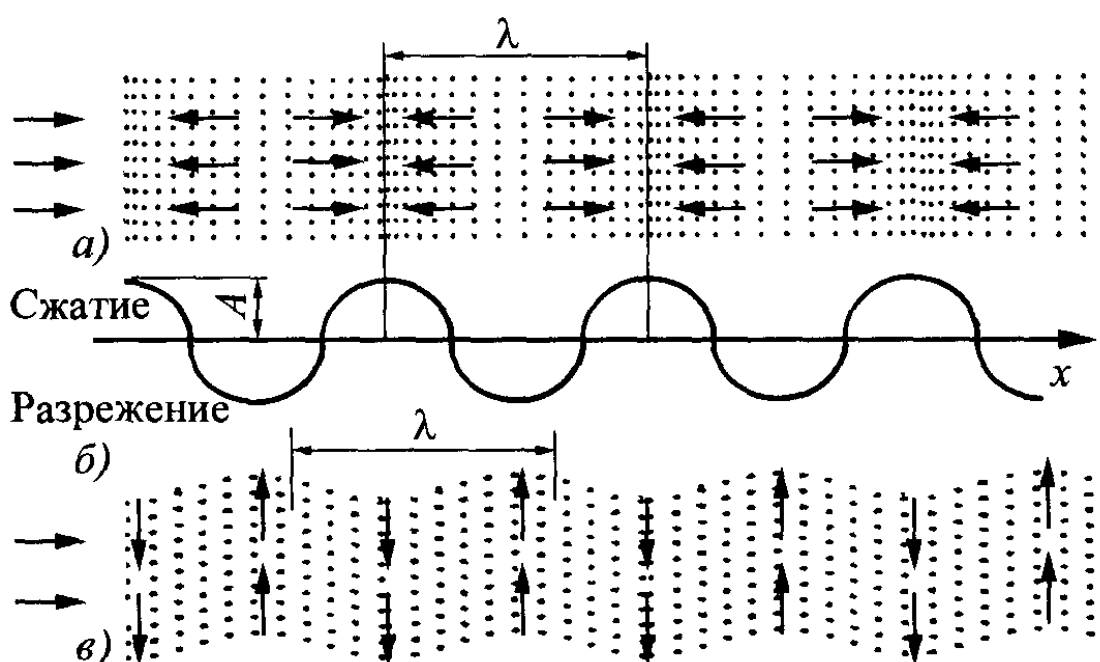


Рис. 1.12. Волны продольная (а) и поперечная (в) и волновой процесс (б)

Колебания от точки к точке среды передаются с определенной скоростью – скоростью распространения звука  $c$ . При этом скорость звука различна в различных средах и зависит от плотности материала среды. Расстояние, пробегаемое волной за один период колебаний, называют длиной волны  $\lambda$ .

### 1.3.2. Электроакустические преобразователи

Для возбуждения и приема упругих колебаний используют электроакустические преобразователи. Наиболее распространены пьезоэлектрические преобразователи. Они очень разнообразны и отличаются назначением, исполнением, рабочими частотами и другими параметрами.

*Прямые совмещенные преобразователи* (рис. 1.13, а) служат для излучения и приема продольных упругих волн. Обе эти функции выполняет один пьезоэлемент.

В раздельно-совмещенных преобразователях (рис. 1.13, в) для излучения и приема продольных волн используют разные пьезоэлементы, смонтированные в общем корпусе. Применяют также раздельные преобразователи, один из которых только излучает, другой только принимает упругие волны.

Для работы с поперечными и поверхностными волнами служат наклонные преобразователи (рис. 1.13, б).

Применяют также другие пьезопреобразователи – широкополосные, с регулируемыми углами наклона, фокусирующие, многоэлементные (матричные) и т.п. Для передачи упругих волн между этими преобразователями и контролируемыми объектами необходимо наличие материальной среды, создающей акустический контакт. Этот контакт реализуется через слой жидкости или эластичный пластик.

На низких частотах (до 60...100 кГц) применяют сухой точечный контакт через выпуклую поверхность наконечника преобразователя.

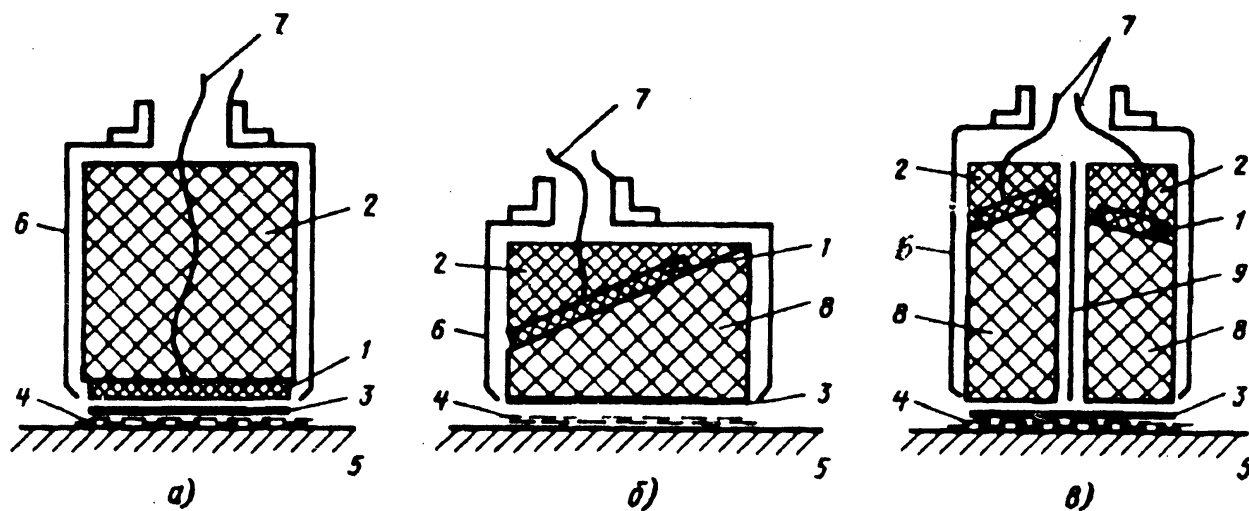
При решении специальных задач для излучения и приема упругих колебаний применяют бесконтактные преобразователи. В этих датчиках колебания материальных точек среды вызываются за счет воздействия другого вида энергии. По чувствительности бесконтактные преобразователи уступают пьезоэлектрическим с жидкостной связью с контролируемым объектом.

В настоящее время набирает популярность источник ультразвука в виде фазированной решетки (рис. 1.14). Фазированная решетка представляет собой множество пьезоэлектрических преобразователей, объединенных в один датчик. При этом каждый преобразователь управляется по отдельной программе, но в то же время синхронно с остальными. Такой подход позволяет получать

информацию в большем объеме, а также появляется возможность фокусировать волны в различных точках, причем одновременно получать сразу информацию с нескольких фокусов.

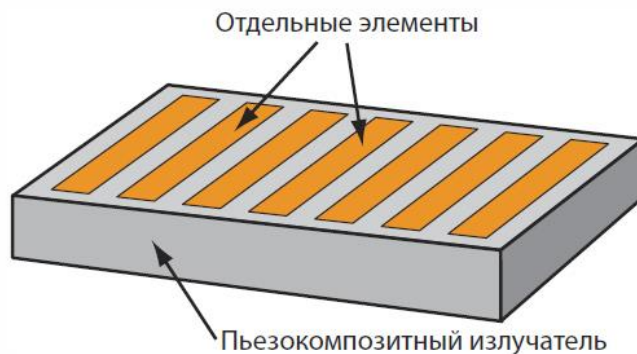
Преобразователи на основе фазированной решетки могут быть различных видов и конфигураций. Они могут иметь один или несколько рядов пьезопреобразователей, расположенных по кругу, находиться на разной высоте и под углом к поверхности контроля. За счет индивидуального управления каждым элементом можно формировать акустическую волну различного вида, или фокусировать излучения на различных глубинах (рис. 1.15).

За счет специальной обработки сигнала при помощи фазированной решетки можно получать информацию о структуре материала на заданной глубине (в срезе).



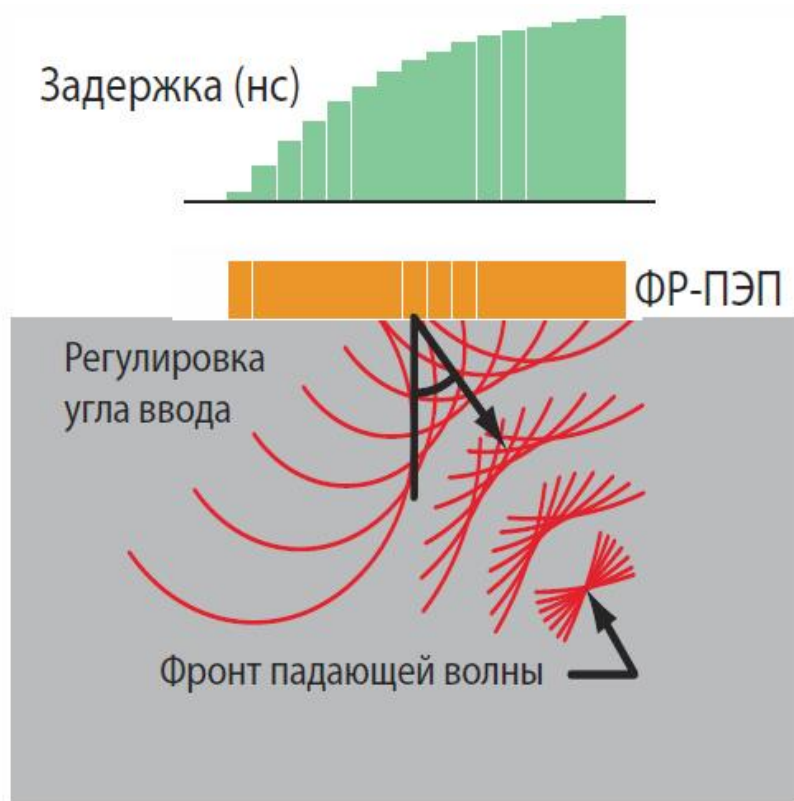
**Рис. 1.13. Конструкция пьезопреобразователей:**

- a* – прямого совмещенного; *б* – наклонного; *в* – раздельно-совмещенного;
- 1 – пьезоэлемент; 2 – демпфер; 3 – протектор; 4 – слой контактной жидкости;
- 5 – контролируемый объект; 6 – корпус; 7 – вывод; 8 – призма; 9 – акустический экран



**Рис. 1.14. Многоэлементная конструкция фазированной решетки**  
 (<https://www.pergam.ru/press/blogs/tehnologiya-fazirovannyh-reshetok.htm>)





**Рис. 1.15. Принцип формирования акустической волны в контролируемом материале (ФР ПЭП – фазированная решетка с пьезоэлектрическими преобразователями)**  
<https://www.pergam.ru/press/blogs/tehnologiya-fazirovannyh-reshetok.htm>

### 1.3.3. Классификация методов ультразвукового контроля

Существуют различные методы неразрушающего контроля, которые можно разделить на активные и пассивные методы. Первые предусматривают специальное воздействие на объект контроля и последующий прием отклика в виде упругих волн, а пассивные – только на приеме волн, источником которых служит сам объект контроля в процессе эксплуатации. Примером пассивных методов контроля является диагностика работы внутренних органов человека (в медицине) или различных механизмов (двигателей, трансмиссий) по их звуковым колебаниям, улавливаемым при помощи стетоскопа или микрофона.

Активные методы делят на методы отражения, прохождения, комбинированные (использующие как отражение, так и прохождение), собственных колебаний и импедансные [14, 15].

Методы отражения основаны на анализе отражения упругих импульсов от неоднородностей или границ объекта. Методы прохождения, напротив, основаны на влиянии параметров материала на характеристики прошедших волн. Комбинированные методы используют влияние параметров объекта на отражение и на прохождение упругих волн. Методы собственных колебаний позволя-

ют судить о свойствах объекта по его свободным или вынужденным колебаниям. В импедансных методах информативным параметром является деформация поверхности объекта контроля в зоне его контакта с преобразователем [14].

Далее кратко описаны обозначенные на рис. 1.16 методы контроля.

Каждый метод имеет свои достоинства. Например, активные методы позволяют контролировать как металлические материалы, так и композиты. Они также обладают высокой скоростью контроля и позволяют выявлять дефекты, склонные к развитию. Однако их чувствительность падает с увеличением глубины залегания дефектов от поверхности объекта контроля.

**Методы отражения.** В этой группе методов информацию получают по отражению акустических волн в объект контроля.

**Эхометод** основан на регистрации эхосигналов от дефектов – несплошностей. Он похож на радио- и гидролокацию. На рисунке 1.17 показана упрощенная структурная схема импульсного эходефектоскопа.

Генератор зондирующих импульсов 7 возбуждает короткие электрические импульсы, трансформируемые преобразователем 3 в ультразвуковые (УЗ) колебания, которые проходят в объект контроля 4 и отражаются от границ областей 6, имеющих другую структуру (как правило это дефекты и нижняя поверхность образца), а затем поступают обратно на преобразователь 2, который превращает акустические волны в электрические величины (например, напряжение), усиливаемые в блоке 1 и отображаемые на экране 5 дефектоскопа.

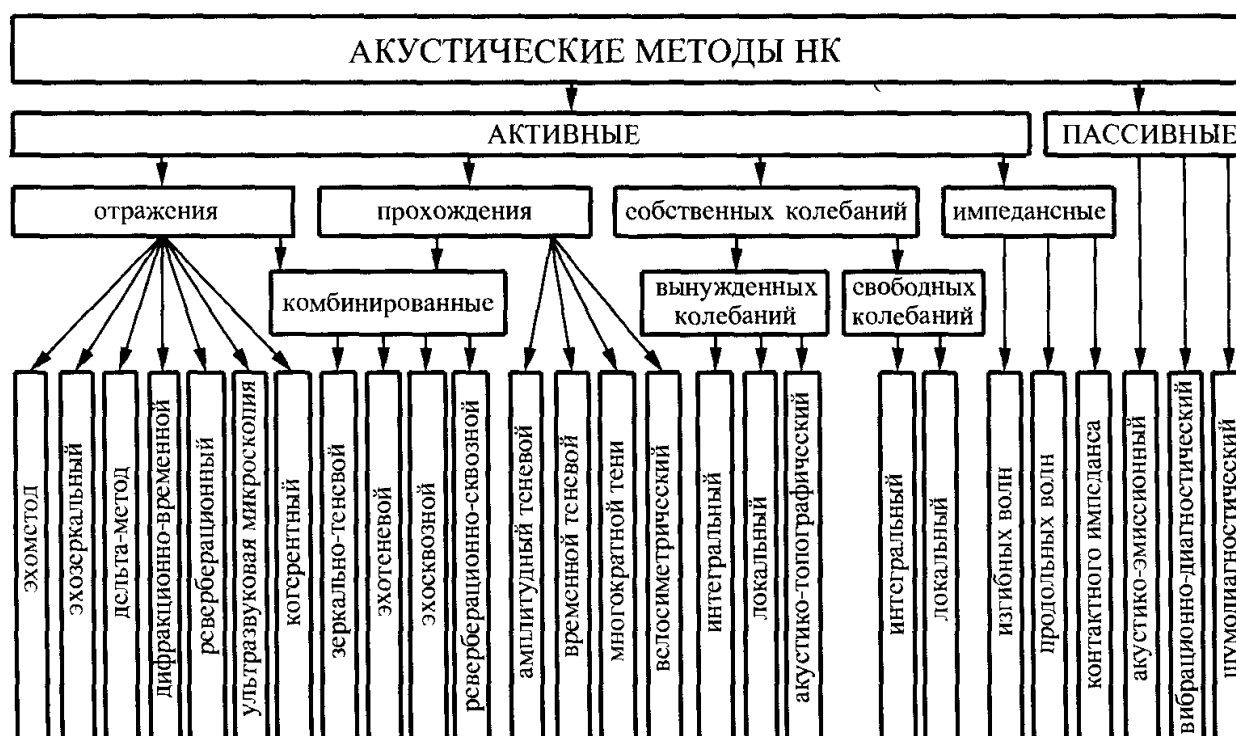


Рис. 1.16. Классификация акустических методов НК

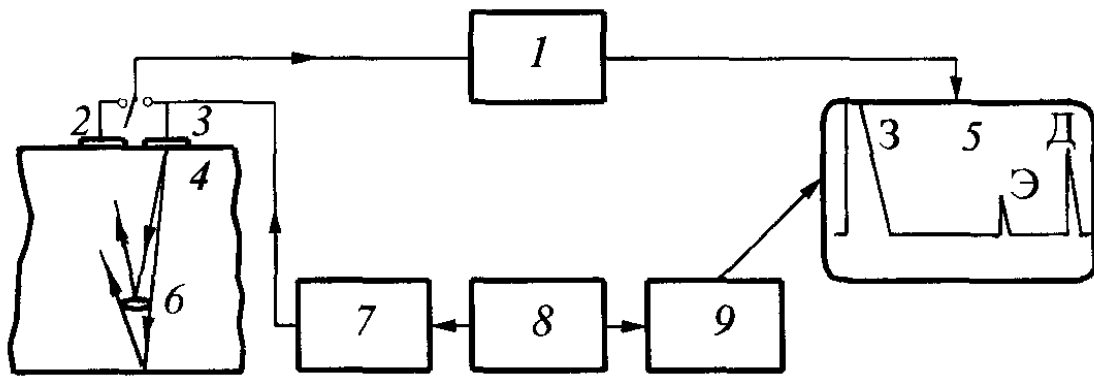


Рис. 1.17. Упрощенная схема эходефектоскопа

Одновременно с генератором импульсов начинает работать генератор развертки 9, сигнал которого позволяет «развернуть» усиленный сигнал преобразователя 3 вдоль оси абсцисс на экране монитора.

Таким образом, расстояние, отсчитанное по горизонтальной линии на мониторе, соответствует времени появления импульса в ОК, а это время пропорционально расстоянию от поверхности до области, границы которой отразили акустическую волну. Высота пиков (импульсов) по вертикали пропорциональна амплитудам эхосигналов.

Современные ультразвуковые дефектоскопы основаны на преобразовании сигнала преобразователя 1 при помощи АЦП в цифровой сигнал, что позволяет значительно расширить их функциональные возможности за счет применения современного программно-алгоритмического обеспечения. При этом одновременно снижаются габариты и масса прибора (рис. 1.18).

*Эхозеркальный метод* позволяет обнаруживать преимущественно вертикально расположенные дефекты за счет того, что акустическое воздействие направляется в объект контроля под углом к нормали поверхности образца (рис. 1.19, б). На жаргоне дефектоскопистов путь ультразвуковой волны называют акустическим трактом и такой метод носит название «тандем». Для его реализации при перемещении преобразователей 2 и 3 поддерживают постоянным значение

$$l_A + l_D = 2H \operatorname{tg} \alpha,$$

где  $H$  – толщина ОК.

*Дельта-метод* (рис. 1.19, в) заключается в использовании явления рассеяния ультразвуковых волн на дефекте. При этом часть рассеянных волн попадает на детектор, а другая часть отражается от нижней поверхности образца и также принимается детектором. При реализации данного метода необходимо перемещать приемник 3 по поверхности образца, регистрируя и анализируемые принимаемые волны.



Рис. 1.18. Ультразвуковой дефектоскоп УДЗ-204  
[\(https://ndtesting.ru/ultrazvukovoy-defektoskop-ud3-204/\)](https://ndtesting.ru/ultrazvukovoy-defektoskop-ud3-204/)

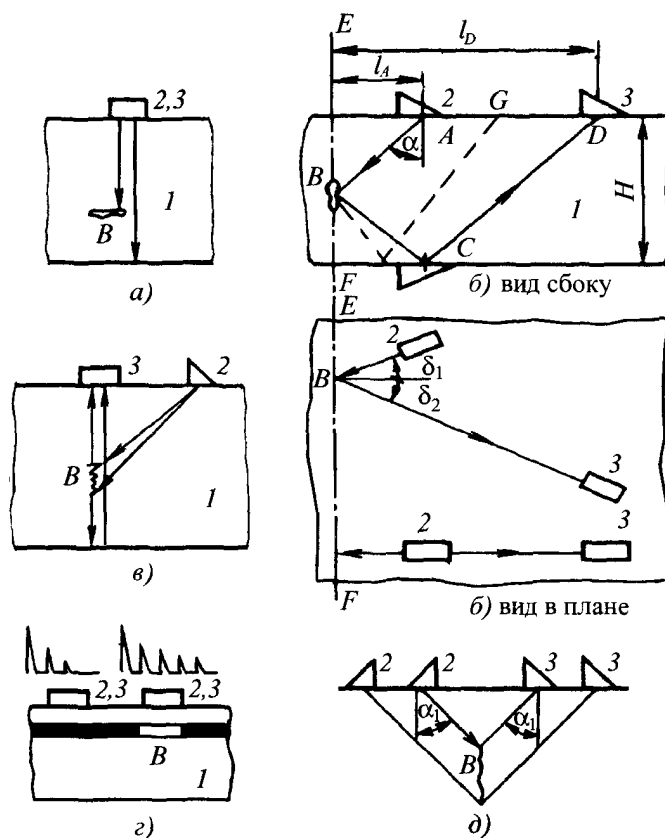


Рис. 1.19. Методы отражения:

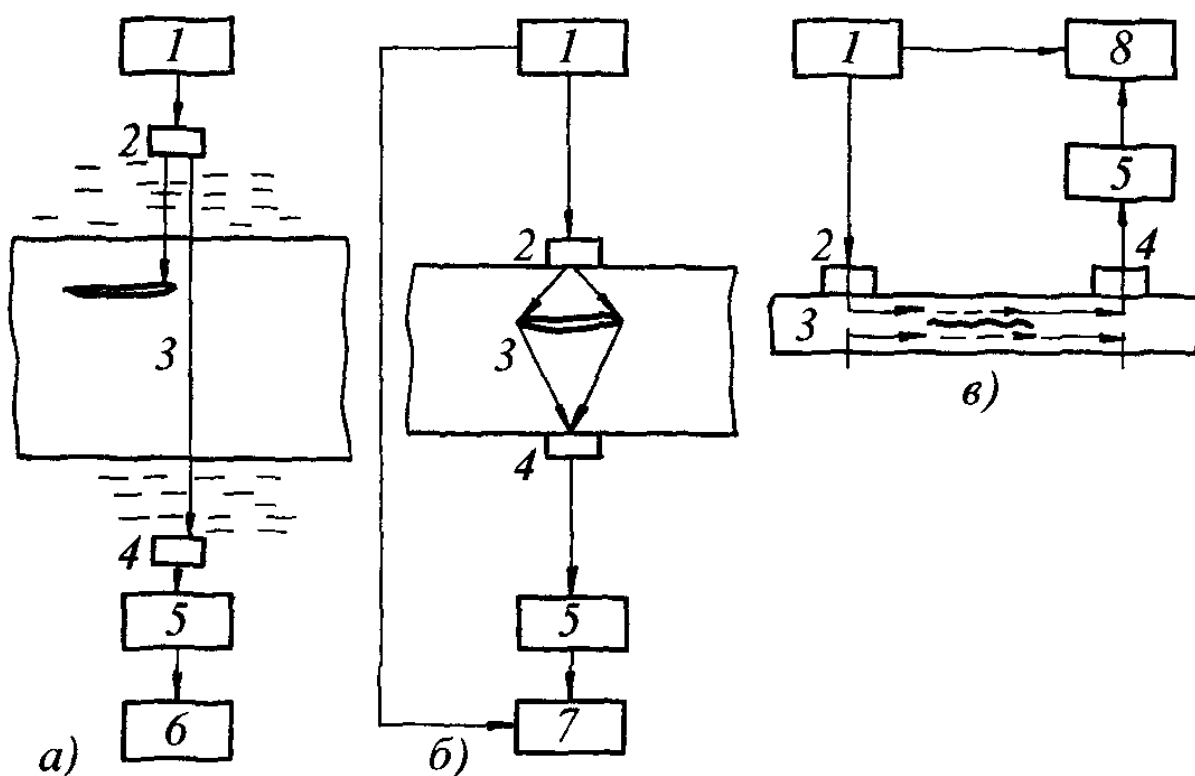
*a* – эхо; *б* – эхозеркальный; *в* – дельта; *г* – ревербационный; *д* – дифракционно-временной;  
*1* – ОК; *2* – излучатель; *3* – приемник

*Дифракционно-временной метод* (ДВМ) (рис. 1.19, д) заключается в регистрации волн, рассеянных на концах дефекта. При этом могут использоваться продольные и поперечные волны.

**Методы прохождения (теневые).** Эти методы подразумевают измерение параметров акустического сигнала, прошедшего через объект контроля. О наличии дефекта судят по уменьшению амплитуды УЗ волны на выходе из объекта. При реализации данного метода излучающий и приемный преобразователи располагают по разные стороны от ОК или его участка.

*Амплитудный метод* прохождения (рис. 1.20, а) основан на регистрации уменьшения амплитуды акустического сигнала вследствие наличия в образце дефекта.

*Временной метод* прохождения (временной теневой метод, рис. 1.20, б) основан на измерении времени запаздывания импульса, вызванного огибанием дефекта. Метод применяется для контроля материалов с большим рассеянием УЗ, например, бетона, огнеупорного кирпича и т.п.



**Рис. 1.20. Методы прохождения:**

- а – амплитудно-теневой; б – временной теневой; в – велосиметрический;
- 1 – генератор; 2 – излучатель; 3 – ОК; 4 – приемник; 5 – усилитель;
- 6 – измеритель амплитуды; 7 – измеритель времени прихода импульса;
- 8 – измеритель изменения фазы волны

*Метод многократной тени* заключается в зависимости амплитуды волны многократно (обычно двукратно) прошедшей между параллельными поверхностями изделия. Метод более чувствителен, чем теневой или зеркально-теновой, так как волны проходят через дефектную зону несколько раз, но менее помехоустойчив.

*Велосиметрический метод* (рис. 1.20, в) основан на регистрации изменения скорости упругих волн в зоне дефекта. Например, если в тонком изделии распространяется изгибная волна, то появление расслоения вызывает уменьшение ее скорости. Это явление фиксируют по сдвигу фазы прошедшей волны или запаздыванию прихода импульса. Метод имеет несколько вариантов, реализуемых при одно- и двустороннем доступе к ОК. Его применяют для контроля изделий из полимерных композиционных материалов (ПКМ) и качества соединения слоев в многослойных конструкциях.

*Термоакустический метод* контроля называют также УЗ-локальной термографией. Метод состоит в том, что в ОК вводятся мощные низкочастотные (~20 кГц) УЗ-колебания. На дефекте они превращаются в теплоту. Чем больше влияние дефекта на упругие свойства материала, тем больше величина упругого гистерезиса и тем больше выделение теплоты. Повышение температуры фиксируется тепловизором. УЗ-колебания модулированы по амплитуде частотой в несколько герц. Такую же модуляцию будут иметь тепловые волны. Это существенно повышает возможность регистрации и локализации дефектов.

Достоинства метода – возможность контроля как металлических материалов, так и композитов; быстрая сортировка деталей на дефектные и бездефектные; высокая скорость контроля (площадь 1 м<sup>2</sup> контролируется за 1–2 мин); преимущественное выявление дефектов, склонных к развитию. Однако чувствительность метода невелика и падает по мере увеличения глубины залегания дефекта от поверхности ОК на несколько миллиметров.

Метод применяют в авиации при контроле крыльев самолетов и других деталей. Выявляются области скрытой коррозии, расслоения, трещины в рядах заклепок. Можно применять метод при циклических испытаниях ОК.

**Комбинированные методы.** Эти методы содержат признаки как методов отражения, так и методов прохождения.

*Зеркально-теновой (ЗТ) метод* основан на измерении амплитуды донного сигнала, который был ослаблен в зоне дефекта. На рисунке 1.21, а отраженный луч показан условно смещенным в сторону.

Эхотеновой метод основан на анализе как прошедших, так и отраженных волн (рис. 1.21, б).

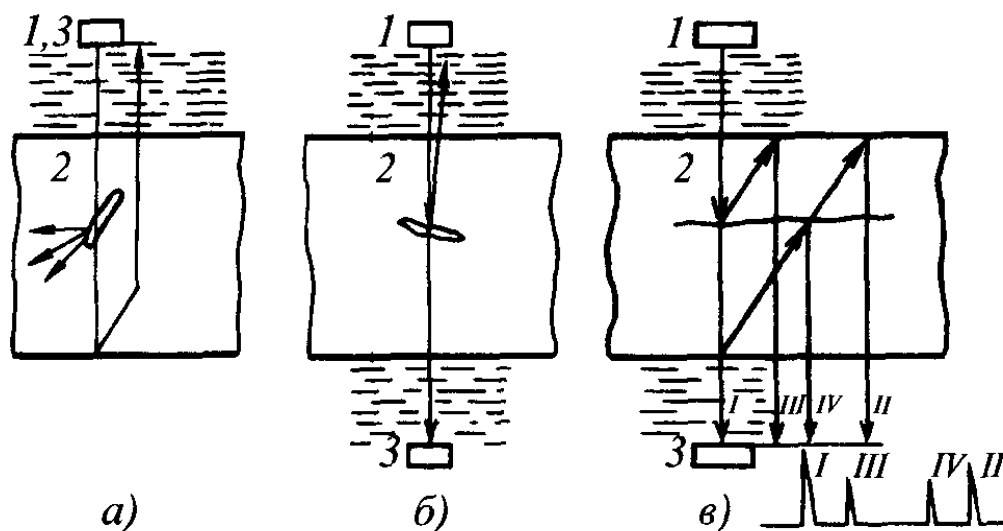


Рис. 1.21. Комбинированные методы

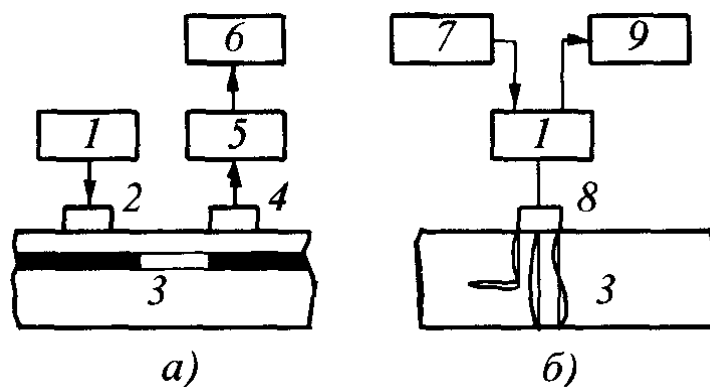
Эхосквозной метод (рис. 1.21, в). Излучатель и приемник располагают по разные стороны от ОК. Наблюдают сквозной сигнал *I*, сигнал *II*, двукратно отраженный в изделии, а в случае появления полупрозрачного дефекта – также эхосквозные сигналы *III* и *IV*, соответствующие отражениям от дефекта волн, идущих от верхней и нижней поверхностей ОК. Большой непрозрачный дефект обнаруживают по исчезновению сигнала *I*, т.е. теньевым методом, а также сигнала *II*, т.е. методом многократной тени. Полупрозрачные или небольшие дефекты обнаруживают по появлению эхосквозных сигналов *III* и *IV*.

**Методы собственных колебаний.** Эти методы основаны на возбуждении в ОК вынужденных или свободных колебаний и последующей регистрации их параметров: собственных частот и величины потерь.

Свободные колебания возбуждают путем кратковременного воздействия на ОК (например, механическим ударом), после чего он колеблется в отсутствии внешних воздействий.

Различают интегральные и локальные методы. В *интегральных методах* анализируют собственные частоты ОК как единого целого, в *локальных* – отдельных его участков. Информативными параметрами служат значения частот, спектры собственных и вынужденных колебаний, а также скорость затухания колебаний. Для возбуждения и приема УЗ-колебаний используют совмещенный (рис. 1.22, б) или отдельные (рис. 1.22, а) преобразователи.

При совпадении частот возбуждения с собственными частотами ОК (нагруженного приемопередающим преобразователем) в системе возникают резонансы. Изменение толщины вызовет смещение резонансных частот, появление дефектов – исчезновение резонансов (если дефект наклонный к поверхности изделия) или изменение их частот (если дефект параллелен поверхности).



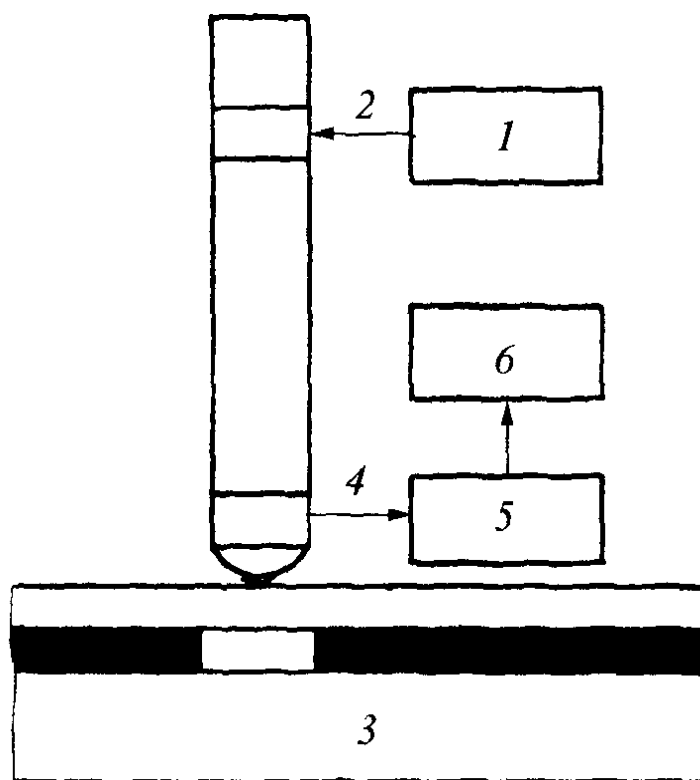
**Рис. 1.22. Методы собственных колебаний:**

*а* – локальный низкочастотный; *б* – локальный резонансный;

*1* – генератор; *2* – вибратор; *3* – ОК; *4* – приемник; *5* – усилитель; *6* – спектроанализатор;  
*7* – модулятор частоты; *8* – излучатель-приемник; *9* – регистратор резонансов

Этим методом можно проверять очень тонкие изделия, недоступные контролю эхометодом.

**Импедансные методы.** Эти методы основаны на анализе изменения механического импеданса или входного акустического импеданса участка поверхности ОК, с которым взаимодействует преобразователь. Внутри группы методы разделяют по типам возбуждаемых в ОК волн и по характеру взаимодействия преобразователя с ОК. В качестве примера на рис. 1.23 представлен импедансный метод с возбуждением изгибных волн.



**Рис. 1.23. Импедансный метод**



Генератор 1 возбуждает продольные гармонические колебания преобразователя (стержня) с помощью излучателя 2. Эти колебания преобразуются в переменную деформацию ОК 3. Элемент 4 – приемник, 5 – усилитель. Изменение режима колебаний фиксируется индикатором 6. Наличие дефекта (непроклея, непропая, расслоения) вблизи поверхности ОК 3 уменьшает модуль входного механического импеданса ОК. Дефекты отмечают по изменению амплитуды и фазы выходного сигнала. Применяют также импульсный вариант метода и способ, основанный на использовании продольных волн.

Метод применяют для контроля дефектов соединений в многослойных конструкциях. Его используют также для измерения твердости и других физико-механических свойств материалов.

#### **1.3.4. Преимущества и недостатки АК по сравнению с другими методами**

Акустический контроль (АК) обладает рядом преимуществ:

1. Реакция УЗ непосредственно на причину нарушения структуры. В отличие от других методов неразрушающего контроля (НК), которые основаны на косвенном влиянии дефектов на электромагнитное поле или пробное вещество, УЗ-дефектоскопия основана на распространении УЗ-волн, которое происходит благодаря упругим связям в веществе. Появление дефекта нарушает эти связи, вызывая отражение УЗ и позволяя выявлять трещины размером от  $10^{-5}$  до  $10^{-4}$  мм, а также дефекты, заполненные другим веществом.

2. Возможность контроля изделий из самых различных металлических и неметаллических материалов, независимо от их электропроводности, диэлектрической и магнитной проницаемости.

3. Высокая чувствительность: ультразвуковой контроль способен обнаружить даже мелкие дефекты, такие как трещины, поры и включения размером в несколько микрон.

4. Быстрое сканирование: ультразвуковой контроль позволяет быстро сканировать большие площади и объемы, что делает его эффективным для контроля на производственных линиях.

5. Возможность определения глубины дефекта: ультразвуковые волны могут проникать в материал на значительную глубину, и контроль может определить глубину дефекта, что полезно для оценки его серьезности.

6. Ультразвуковой контроль не оказывает вредного воздействия на окружающую среду или тестируемые объекты, поскольку он не использует радиацию или химические вещества.

7. Возможность работы в широком диапазоне материалов: ультразвуковой контроль может быть применен ко многим типам материалов, включая металлы, пластмассы, композиты, керамику и стекло.

8. Относительная невысокая стоимость: ультразвуковое оборудование доступно по сравнению с некоторыми другими методами контроля, что делает его экономически эффективным для многих отраслей.

9. Портативность: современные ультразвуковые приборы компактны и портативны, позволяя выполнять контроль на различных объектах и в условиях ограниченного доступа.

10. Автоматизируемость: существуют автоматические системы ультразвукового контроля, которые могут сканировать и анализировать данные без прямого участия оператора, что повышает эффективность и точность процесса.

Ультразвуковой контроль может быть не просто автоматизирован, но и роботизирован. Есть работы [18], в которых приведены результаты исследований по использованию робота-манипулятора для осуществления сканирования объекта контроля со сложным рельефом поверхности по заданному закону и заданной траектории. При этом в качестве рабочего органа могут использоваться различные ультразвуковые преобразователи вместе с датчиками силы. При этом робот может работать при участии оператора, а объектом контроля может быть тело человека. В этом случае используется коллаборативный манипулятор, безопасный для человека и сертифицированный для работы в медицинских целях (рис. 1.24).



**Рис. 1.24. Применение коллаборативного манипулятора UR5 для ультразвуковых исследований**

В последние годы исследования в области роботизированной технологии неразрушающего контроля и соответствующего оборудования развиваются бурными темпами (за рубежом). Для сканирования деталей сложной формы применяют семиосный манипулятор, позволяющий удерживать датчик неразрушающего контроля перпендикулярным к поверхности и поддерживая постоянную силу контакта с поверхностями детали, обеспечивая высокоскоростной автоматический контроль небольших деталей сложной формы. Для реализации метода «тандем» созданы системы (рис. 1.25) с двумя роботами [19] (рис. 1.26).

Основные этапы работы этой системы заключались в следующем. Сначала получают 3D-модель заготовки с помощью файлов САД (компьютерного проектирования) или сканирования. Далее определяют траекторию сканирования с применением результатов решения прямой и обратной задачи кинематики, уделяя при этом внимание риску столкновения роботов друг с другом или с препятствиями. Файлы данных о траектории загружают в контроллер робота и проводят машинный эксперимент, предусматривающий одновременный запуск и остановку системы движения и ультразвуковой системы, синхронный сбор ультразвуковых данных и данных о положении, а также визуализацию дефектов.

Плата сбора данных должна обеспечивать высокоскоростной сбор данных о местоположении и измерительной информации с ультразвукового приемника. При скорости определения положения 10 кГц можно получать данные о местоположении с интервалом 0,1 мм.

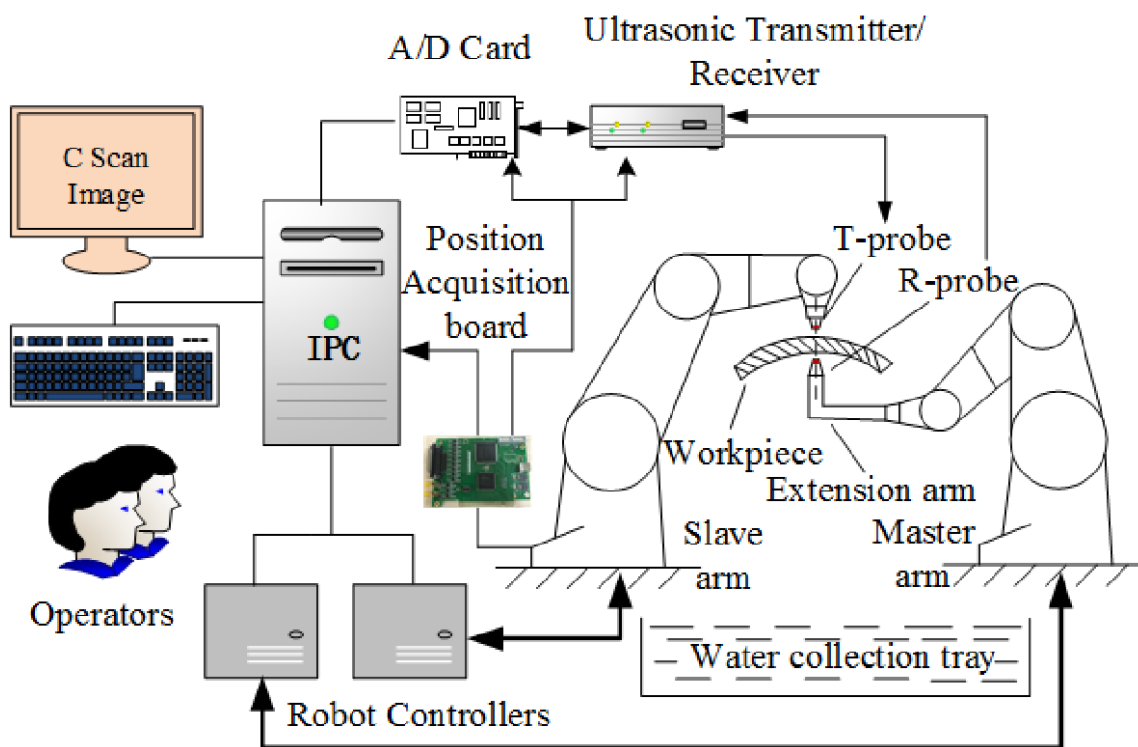


Рис. 1.25. Схема системы неразрушающего контроля (НК) с двумя роботами [19]

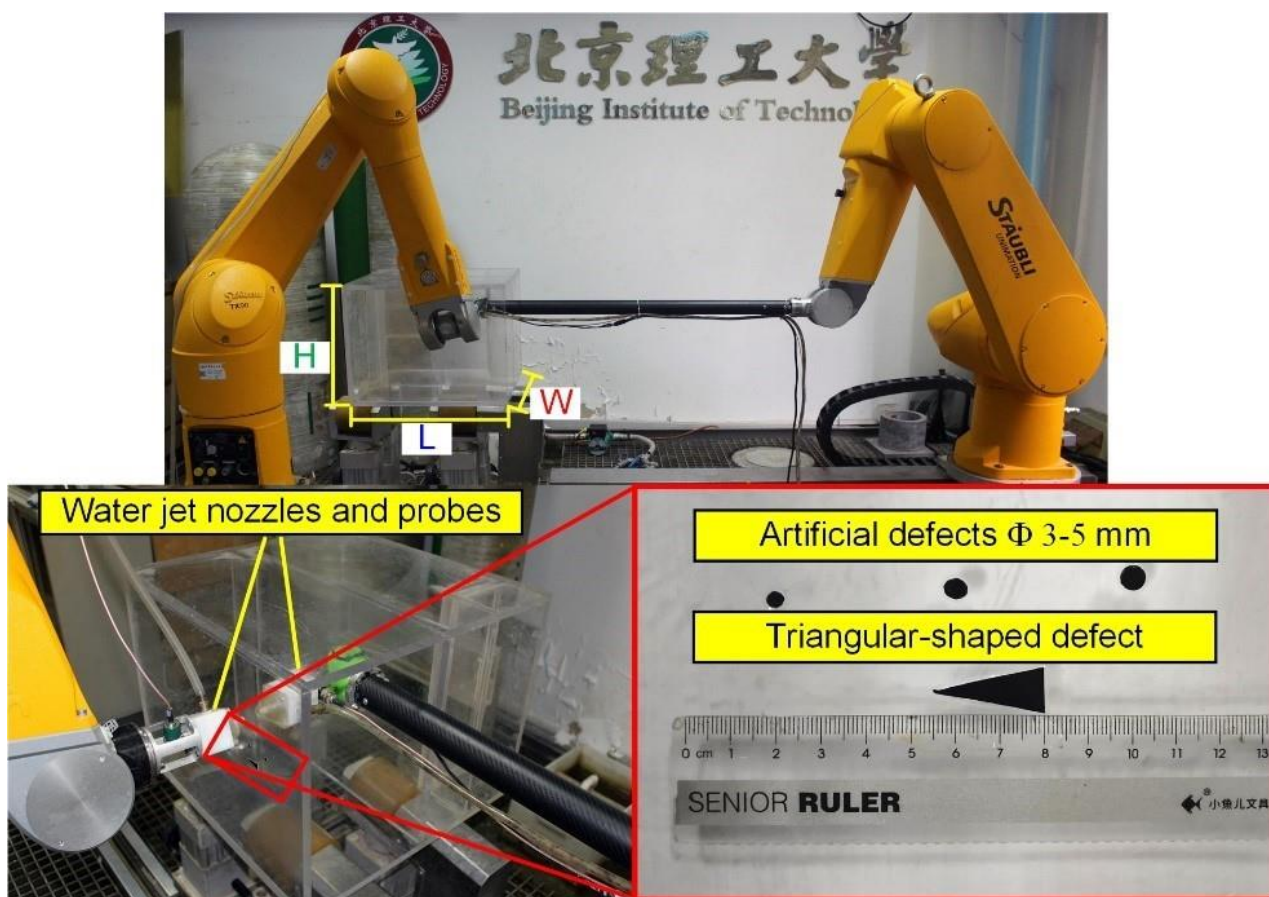


Рис. 1.26. Роботизированная система УЗ-контроля

Однако акустические методы контроля также имеют некоторые недостатки, характерные для высокочастотных методов:

1. Трудность или невозможность контроля изделий из неоднородных, крупнозернистых материалов, таких как нелегированные литые металлы, аустенитные стали и некоторые виды чугунов.
2. Требование ровной, гладкой поверхности изделия.
3. Трудность или невозможность контроля малых по размеру и сложной конфигурации изделий.
4. При традиционном ручном контроле отсутствие объективной документации о факте выполнения контроля и его результатах, подобной рентгеновской пленке.
5. Трудность или невозможность определения характера дефекта и его реальных размеров.
6. В традиционной ультразвуковой технологии существует «слепая зона» контроля поверхности для обнаружения поверхностных и приповерхностных дефектов. Это объясняется тем, что эхо-сигнал от передней грани объекта контроля маскирует дефекты в подповерхностном слое изделия.

Тем не менее, последние технические достижения, включая современные методы обработки, хранения и представления информации, в значительной степени преодолевают указанные недостатки акустического контроля.

## 1.4. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

### 1.4.1. Основные сведения

Методы магнитного контроля, в основном, используются для проверки изделий, изготовленных из ферромагнитных материалов. Основные информативные параметры при магнитном контроле включают коэрцитивную силу, намагниченность, индукцию, магнитную проницаемость и напряженность. Магнитные методы контроля включают магнитопорошковый, магнитографический, феррозондовый, основанный на эффекте Холла, индукционный, пондеромоторный и магниторезисторный методы.

Эти методы позволяют определить толщину покрытий на магнитной основе, а также контролировать состояние поверхностных слоев и механические свойства изделий. Однако они имеют свои ограничения, такие как затруднение или невозможность контроля изделий из неоднородных материалов, потребность в ровной поверхности изделия и сложность определения характера дефектов и их размеров.

Автоматизация контроля поверхности в настоящее время гораздо менее развита, и прогнозируется, что в 2022 – 2029 годах она будет иметь самый высокий среднегодовой темп роста среди всех методов неразрушающего контроля из-за более широкого внедрения магнитного и вихретокового методов контроля.

#### *Основные понятия и термины.*

**Намагниченность** «есть векторная физическая величина, характеризующая состояние вещества при его намагничивании» [15] (воздействии на него магнитного поля  $H$ ). Количественно она равна

$$M = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum m}{V},$$

где  $V$  – объем вещества;  $m$  – элементарный магнитный момент.

Намагниченность, как и магнитное поле, измеряется в А/м.

**Магнитной индукцией** называется «силовая характеристика магнитного поля» [15] (величина векторная):

$$B = \mu_0 (H + M),$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $H$  – напряженность магнитного поля. Единица измерения магнитной индукции – тесла (Тл).

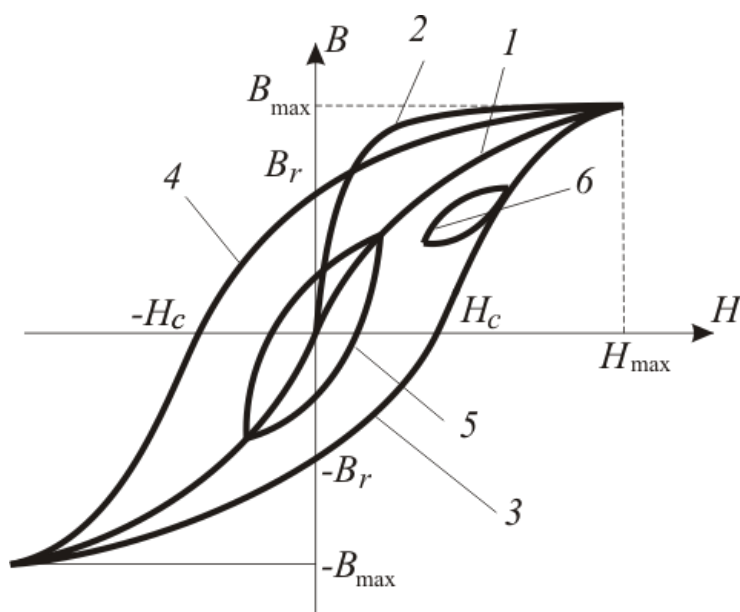
**Магнитная восприимчивость** – «безразмерная величина  $\chi_m$ , характеризующая способность вещества (магнетика) намагничиваться в магнитном поле. Для изотропного магнетика» [15]

$$\chi_m = \frac{M}{H}.$$

У диамагнетиков  $\chi_m < 0$ . У парамагнетиков  $\chi_m > 0$ , у ферромагнетиков  $\chi_m \gg 0$  ( $10^4$  и более).

**Кривыми намагничивания** называют графические изображения функции  $B = f(H)$ . В зависимости от способа получения этих функций различают несколько типов кривых намагничивания (рис. 1.27):

- *начальная* – получают постепенным увеличением  $H$  из состояния  $B = 0$  и  $H = 0$  до  $B_{\max}$ ;
- *безгистерезисная* (идеальная) – получают так же, но при измерении индукции в каждой точке кривой намагничивания при воздействии переменным полем с убывающей до нуля амплитудой (возможны другие воздействия, например, постукивание по объекту, облегчающее процесс намагничивания);
- *основная* (коммутационная) – получают при циклическом перемагничивании (кривая является местом вершин симметричных петель гистерезиса).



**Рис. 1.27. Петля магнитного гистерезиса:**

- 1 – основная кривая намагничивания; 2 – идеальная кривая намагничивания;  
3 – предельная петля гистерезиса; 4 – «спинка» предельной петли гистерезиса или кривая размагничивания; 5 – симметричная петля гистерезиса; 6 – частный цикл гистерезиса

**Гистерезис.** «Это явление зависимости вектора магнитной индукции и вектора напряженности магнитного поля в веществе не только от приложенного внешнего поля, но и от предыстории данного образца. При циклическом перемагничивании ферромагнетика функция  $B(H)$  образует петлю магнитного гистерезиса» [15] (рис. 1.27). Различают предельную петлю гистерезиса, получаемую при  $-H_{\max} \leq H \leq H_{\max}$ . Если перемагничивание производится при  $-H_{\max} < H < H_{\max}$ , то имеют место частные петли гистерезиса. Эти петли гистерезиса являются симметричными при условии  $H_{\max} = |-H_{\max}|$ . В противном случае получают частные несимметричные циклы возврата.

**Магнитной индукцией насыщения  $B_{\max}$**  называют индукцию, соответствующую максимуму  $H$  (дальнейшее увеличение  $B$  с ростом  $H$  осуществляется только за счет изменения (приращения)  $H$ ).

Остаточной магнитной индукцией  $B_r$  называют индукцию, которая остается в предварительно намагниченном до насыщения материале после снятия магнитного поля.

**Коэрцитивная сила  $H_c$**  – напряженность магнитного поля, необходимая для полного размагничивания предварительно намагниченного ферромагнетика (получения  $B = 0$  по предельной петле гистерезиса).

**Магнитная проницаемость.** Относительная магнитная проницаемость  $\mu$  – безразмерная физическая величина, характеризующая магнитные свойства магнетиков:  $\mu = 1 + \chi_m$ .

#### 1.4.2. Классификация методов магнитного контроля

Все магнитные методы контроля основаны на регистрации магнитных полей рассеяния, образующихся в местах расположения дефектов или неоднородностей в предварительно намагниченном изделии.

Различают следующие основные методы магнитного контроля:

**магнитопорошковый (МП)** – «метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на использовании в качестве индикатора магнитных полей рассеяния магнитного порошка» [15];

**магнитографический (МГ)** – «метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на записи магнитных полей объекта контроля на магнитный носитель с последующим воспроизведением сигналограммы» [15];

**феррозондовый (ФЗ)** – «метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей объекта контроля феррозондовыми преобразователями» [15]. Феррозонд представляет собой катушки индук-

тивности с нелинейным сердечником. Чаще всего в качестве такого сердечника используется пермаллоевая проволока. Если через катушку возбуждения пропустить переменный ток, который создаст переменное поле с амплитудой напряженности  $H$ , и приложить к феррозонду соосное постоянное поле напряженностью  $H$ , то на выходе приемной катушки феррозонда появится напряжение, пропорциональное постоянному магнитному полю  $H$  и с удвоенной частотой. Появление напряжения удвоенной частоты обусловлено нелинейной характеристикой сердечника феррозонда. Это напряжение и является сигналом, по которому судят о внешнем магнитном поле;

**метод, основанный на использовании эффекта Холла (ЭХ)** – «метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей объекта контроля преобразователями Холла» [15];

**индукционный (И)** – метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитных полей объекта контроля индукционными преобразователями;

**пондеромоторный (ПМ)** – метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на измерении пондеромоторной силы между объектом контроля и источником магнитного поля (постоянного магнита, электромагнита или рамки с током);

**магниторезисторный (МР)** – метод магнитного неразрушающего контроля, основанный на регистрации магнитного поля объекта контроля магниторезистивными преобразователями.

### 1.4.3. Магнитопорошковый метод контроля

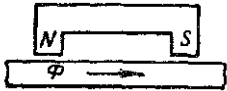
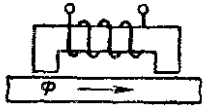
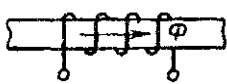
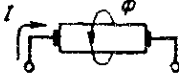
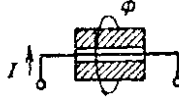
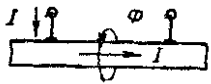

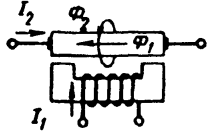
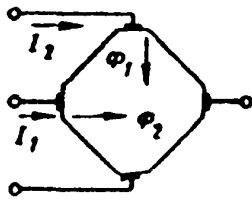
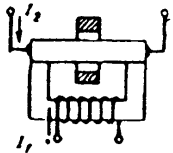
В подавляющем большинстве случаев при магнитном контроле приходится иметь дело с измерением или индикацией магнитных полей вблизи поверхности изделий. В магнитопорошковых установках индикаторами магнитных полей являются магнитные порошки.

Когда в цепи магнитного потока имеется трещина, несплошность и т.д. происходит деформация силовых линий магнитного поля. Если дефект поверхностный или подповерхностный, то магнитная индукция в этом месте будет больше, чем в бездефектной зоне. Образуется так называемое магнитное поле рассеяния. Магнитные порошки служат для визуального определения магнитных полей рассеяния над дефектами в магнитопорошковой дефектоскопии.

Для точного определения дефектов известной ориентации необходимо правильно выбрать схему намагничивания (табл. 1.2).



## 1.2. Схемы намагничивания деталей при магнитных методах неразрушающего контроля

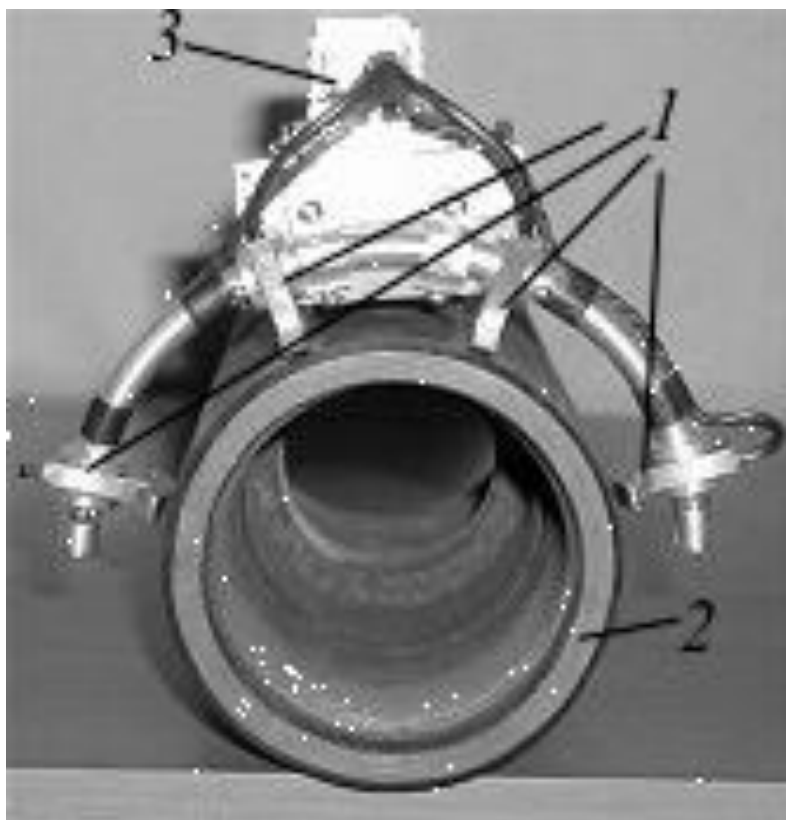
Вид намагничивания (по форме магнитного потока)	Способ	Схема
Продольное (полюсное)	Постоянным магнитом	
	Электромагнитом	
	Соленоидом	
Циркулярное	Пропусканием тока по детали	
	С помощью провода с током, помещаемого в отверстие детали	
	С помощью контактов, устанавливаемых на деталь	
	Путем индукцирования тока в детали	
Комбинированное	Пропусканием тока по детали и с помощью электромагнита	
	Пропусканием двух (или более) сдвинутых по фазе токов по детали во взаимно перпендикулярных направлениях	
	Путем индукцирования тока в детали и током, проходящим по проводнику, помещаемому в отверстие детали	

Для обнаружения дефекта на поверхность детали наносят магнитный порошок в сухом виде или в виде суспензии. При этом на частицу в поле рассеяния будут действовать силы: магнитного поля, направленной в область наибольшей плотности магнитных силовых линий, т.е. к месту расположения трещины; тяжести; выталкивающего действия жидкости; трения; силы электростатического и магнитного взаимодействия, возникающих между частицами. В магнитном поле частицы намагничиваются и соединяются в цепочки. Под действием результирующей силы частицы притягиваются к трещине и накапливаются над ней, образуя скопление порошка. Ширина полоски (валика) из осевшего порошка значительно больше ширины раскрытия трещины. По этому осадению – **индикаторному рисунку** – определяют наличие дефектов. При осмотре детали обнаруживают и анализируют осадение магнитного рисунка (магнитного индикаторного рисунка) с целью определения характера дефекта и принятия решения о пригодности детали к дальнейшей эксплуатации.

#### 1.4.4. Феррозондовый метод контроля

**Феррозонд** – прибор для измерения и индикации магнитных полей и их градиентов. Основным элементом является сердечник из ферромагнетика, на который действуют магнитные поля от двух катушек: катушки возбуждения и сигнальной. Когда измеряемое магнитное поле отсутствует, сердечник под действием переменного магнитного поля, создаваемого током в катушке возбуждения, перемагничивается по гармоническому закону. По такому же закону меняется э.д.с. в сигнальной катушке. Если сердечник окажется в постоянном магнитном поле, то кривая его перемагничивания станет несимметричной и в сигнальной катушке появятся четные гармоники, амплитуда которых будет пропорциональна индукции измеряемого магнитного поля. Феррозондовые приборы обладают очень высокой чувствительностью к магнитному полю (до  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  А/м).

На рисунке 1.28 показан пример поиска дефектов стальной трубы 2 при помощи феррозондовых преобразователей 1, подключенных к электронному блоку 3, преобразующему информативный сигнал чувствительных элементов в унифицированный аналоговый или цифровой сигнал. Феррозондовые преобразователи образуют сканирующее устройство, которым можно регистрировать магнитные поля рассеяния на значительной поверхности объекта.



**Рис. 1.28. Контроль изделия при помощи феррозондовых преобразователей:**  
 1 – феррозондовые преобразователи; 2 – изделие; 3 – электронный блок

#### **1.4.5. Магниторезисторный метод и метод, основанный на использовании эффекта Холла**

Магнитометры с датчиками Холла основаны на явлении искривления траектории электрических зарядов, движущихся в магнитном поле, под действием силы Лоренца (возникновении между гранями проводящей пластинки разности потенциалов, пропорциональной протекающему току и магнитной индукции). Магниторезисторный метод использует эффект Гаусса (изменение сопротивления проводника в поперечном магнитном поле). Существуют магнитометры, основанные на явлении падения анодного тока в вакуумных магнетронах и электроннолучевых трубках (вызванного отклонением электронов в магнитном поле) и другие. На эффекте Холла основано действие различного рода тесламетров для измерения постоянных, переменных и импульсных магнитных полей (чувствительностью  $10^{-4} \dots 10^{-5}$  Тл.), градиентометров и приборов для исследования магнитных свойств материалов. Чувствительность тесламетров, работающих на основе эффекта Гаусса, достигает  $10$  мкВ/Тл. На рисунке 1.29 показана схема включения датчика Холла. Напряжение питания на датчик поступает на две противоположные грани датчика через резистор  $r_1$  от источника  $E_1$ .

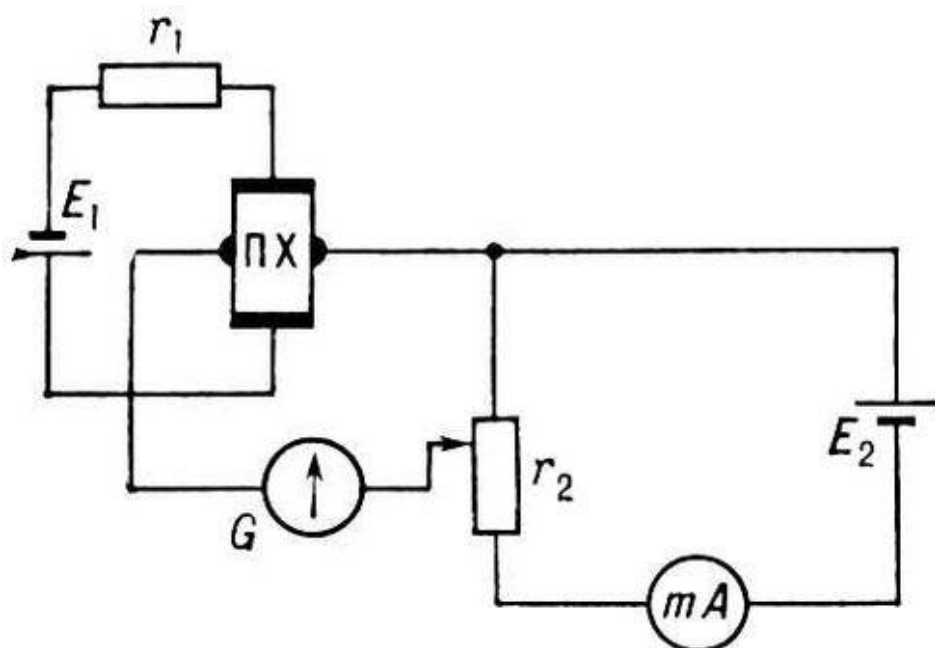


Рис. 1.29. Схема включения преобразователя Холла (ПХ)

## 1.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ (ВИХРЕТОКОВЫЙ) МЕТОД КОНТРОЛЯ

Этот метод основан на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых в электропроводном слое объекта контроля.

В качестве источника внешнего поля используют одну или несколько катушек индуктивности  $I$  (см. рис. 1.30) к которым подводят переменное напряжение от генератора  $G$ .

Вихревые токи индуцируются в образце в соответствии с законом индукции Фарадея, когда катушка  $I$ , по которой течет переменный ток, создает переменное магнитное поле, а проводящий образец находится внутри этого магнитного поля. Индуцированный вихревой ток в образце имеет противоположную фазу по отношению к току в катушке и создает собственное магнитное поле, противоположное магнитному полю катушки. Плотность вихревого тока экспоненциально затухает с увеличением глубины в изотропном материале, что влияет на сигнал индикаторной катушки. Стандартная глубина проникновения зависит от частоты напряжения в катушке, магнитной проницаемости и электропроводности компонента и рассматривается как наибольшая глубина, на которой можно измерить значимое изменение сигнала индикаторной катушки  $З$ . Благодаря экспоненциальному затуханию, связанному с вихревыми токами, они идеально подходят для обнаружения дефектов, разрушающих поверхность. Это прямо контрастирует с ультразвуком, где эхо-сигнал от передней стенки обычно маскирует любые неглубокие дефекты внутри компонента.

При правильной конструкции вихретокового датчика и выборе частоты можно создать вихревой ток со стандартной глубиной проникновения, превышающей или равной толщине некоторых тонкостенных компонентов, таких как контейнеры, используемые при хранении низкоактивных ядерных материалов.

Подобные преобразователи позволяют контролировать геометрические размеры деталей, толщину диэлектрических покрытий, обнаруживать дефекты, трещины глубиной от 0,1 мм и длиной 1...2 мм, несплошности в изделиях.

Минимальная площадь контроля может быть доведена до 1 мм<sup>2</sup>, что позволяет контролировать изделия сложной геометрической формы.

Недостатки: сложная схема включения, высокая стоимость, ограниченная область применения (только для электропроводных изделий).

На рисунке 1.31 показано экспериментальное оборудование, используемое при автоматизированном контроле ядерного контейнера с применением вихретоковой системы [20]. Ядерный контейнер с матрицей из 16 коррозионных трещин под напряжением, показанный на рис.1.30, удерживается в механическом патроне поверх внешней поворотной платформы KUKA DPK-400 с угловым разрешением 0,009°. Вихретоковый датчик установлен в специальном корпусе, напечатанном на 3D-принтере, который, в свою очередь, прикреплен к гамма-силомоментному датчику класса IP-65 от ATI Industrial. Для перемещения датчика на требуемую для проверки высоту вихретоковая матрица, корпус и узел силомоментного датчика крепятся к фланцу робота KUKA KR-90.

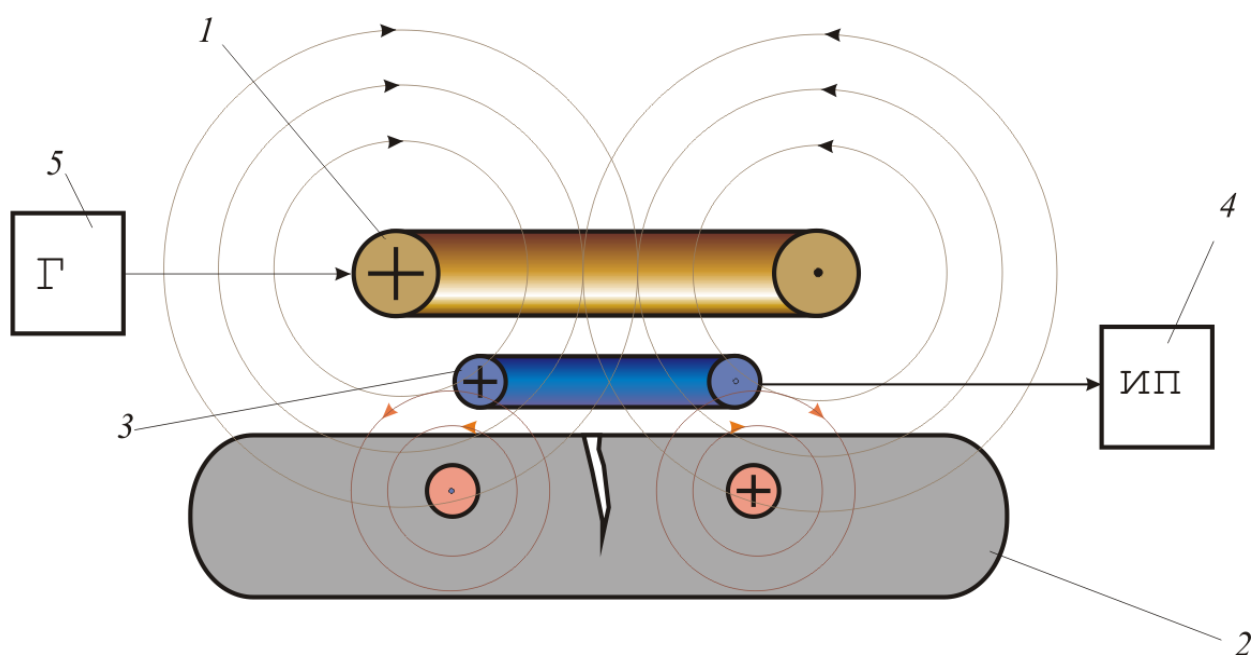
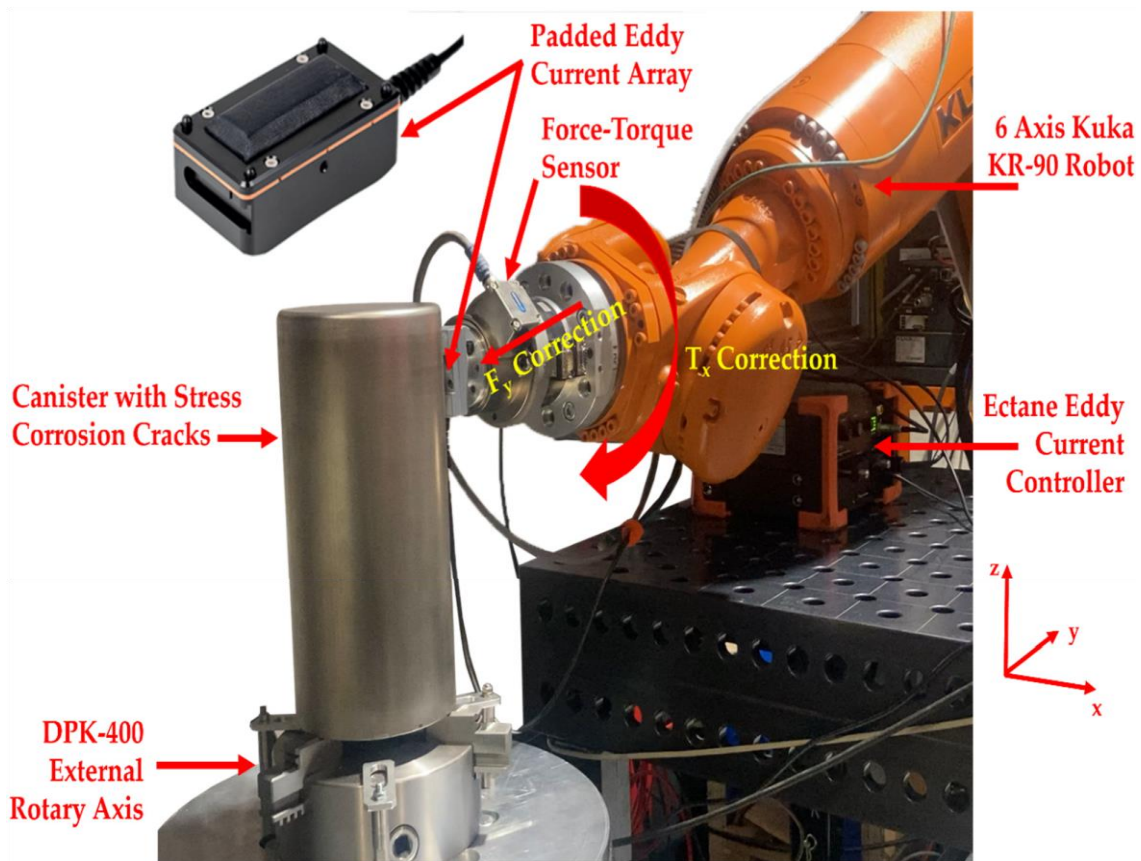


Рис. 1.30. Функциональная схема вихретокового дефектоскопа



**Рис. 1.31. Применение роботизированного вихретокового контроля для контейнера ядерного реактора**

### Контрольные вопросы

1. В чем заключаются и где используются разрушающие и неразрушающие методы контроля?
2. Что такое термография?
3. Когда тепловой контроль называется пассивным?
4. В чем преимущество тепловых методов контроля?
5. В каких случаях необходимо применять роботы-манипуляторы для реализации методики контроля?
6. Что такое эндэфектор?
7. В чем заключается метод Денавита-Хартенберга?
8. В чем заключается обратная задача кинематики при роботизированном контроле?
9. Как можно определить матрицу поворота для конечного звена?
10. Как можно изготовить контрольный образец с искусственными дефектами типа «расслоение»?
11. Как проявляют себя дефекты типа «расслоение» при тепловом методе контроля?

12. На какие параметры при тепловом контроле влияет глубина залегания дефекта?
13. В чем заключается метод линейной регрессии?
14. Какие метрики качества регрессионных моделей Вы знаете?
15. В чем заключаются акустические методы контроля?
16. Что такое ультразвук?
17. В чем отличие продольных и поперечных акустических колебаний?
18. Расскажите об устройстве и принципе действия совмещенных акустических преобразователей.
19. Как обеспечивается хороший акустический контакт между акустическим преобразователем и поверхностью объекта контроля?
20. В чем особенность и преимущества фазированных решеток при реализации акустического контроля?
21. В чем заключается эхо-метод акустического контроля? Какие Вы знаете разновидности данного метода?
22. В чем заключаются теневые методы акустического контроля?
23. В чем заключается термоакустический метод контроля?
24. Как может быть реализован метод собственных колебаний?
25. В чем заключается импедансный метод?
26. В чем преимущество акустического контроля перед тепловым? В чем недостатки?
27. Какие сенсоры потребуются дополнительно при реализации роботизированного акустического контроля?
28. Для каких объектов целесообразно применять магнитные методы контроля?
29. Что такое коэрцитивная сила?
30. Какие сенсоры можно применять при реализации магнитного контроля?
31. Какие Вы знаете способы намагничивания объекта контроля?
32. Когда лучше применять циркулярное, а когда продольное магнитное поле?
33. В чем заключается эффект Холла?
34. В чем заключается вихретоковый метод контроля?
35. Какие сенсоры дополнительно потребуются при реализации роботизированного вихретокового контроля?

## 2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ

---

### 2.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на воздействие вибрации является важным этапом при подтверждении качества роботизированных комплексов различного назначения. Кроме этого сами виброиспытательные стенды являются мехатронными системами, где необходимо управлять движением объекта контроля по заданному закону.

В зависимости от целей испытания различают испытания на вибропрочность и виброустойчивость. **Испытания на вибропрочность** – это «проверка способности изделия противостоять разрушающему влиянию вибрационных воздействий и нормально функционировать после прекращения воздействий» [10 – 12]. Целью **испытаний на виброустойчивость** является «установление способности изделия выполнять свои функции и сохранять свои основные параметры при вибрационных воздействиях в пределах, указанных в нормативных документах на изделие» [10]. Испытания, как правило, проводят в лабораторных условиях на специальных установках.

К испытаниям различных изделий и средствам испытаний сформулированы требования:

- возможность проведения испытаний на гармоническую (синусоидальную) и полигармоническую, случайную (узкополосную и широкополосную) и смешанную (гармоническую и случайную) вибрацию;
- обеспечение воспроизводимости результатов испытаний, исключающей неоднозначность заключения.

**Метод фиксированных частот** заключается в последовательном воздействии механических колебаний определенной частоты и амплитуды на испытуемое изделие в требуемом диапазоне частот.

**Метод качающей частоты** заключается в циклическом прохождении заданного диапазона частот от нижней частоты до верхней и обратно при постоянстве заданных параметров вибрации в течение определенного времени в процессе воздействия механических колебаний на испытуемое изделие.

*Метод виброиспытаний на полигармоническую вибрацию* заключается в создании и воспроизведении сложногармонических вибрационных воздействий, наиболее часто встречающихся в условиях эксплуатации объектов.

*Методы испытаний на воздействие случайной вибрации.* В большинстве случаев реальные вибрационные процессы имеют случайный характер. Спек-



тры реальной вибрации непрерывны, мгновенные значения амплитуд спектральных составляющих могут быть описаны только статистически.

*Метод испытаний на воздействие случайной широкополосной вибрации.* При случайной широкополосной вибрации все резонансные частоты испытуемого изделия возбуждаются одновременно. Это позволяет выявить их взаимное влияние, что невозможно при других видах испытаний.

Метод испытаний на воздействие случайной узкополосной вибраций основан на принципе замены широкополосного случайного возбуждения с низким уровнем спектральной плотности ускорений более интенсивным узкополосным возбуждением с медленной перестройкой одного полосового фильтра по частоте.

### **2.1.1. Виброиспытательные системы**

Виброиспытательные системы, действие которых основано на использовании рассмотренных методов испытаний, представляют собой сложные комплексы, включающие подсистемы задания, воспроизведения, управления и измерения, анализа и регистрации параметров вибрации.

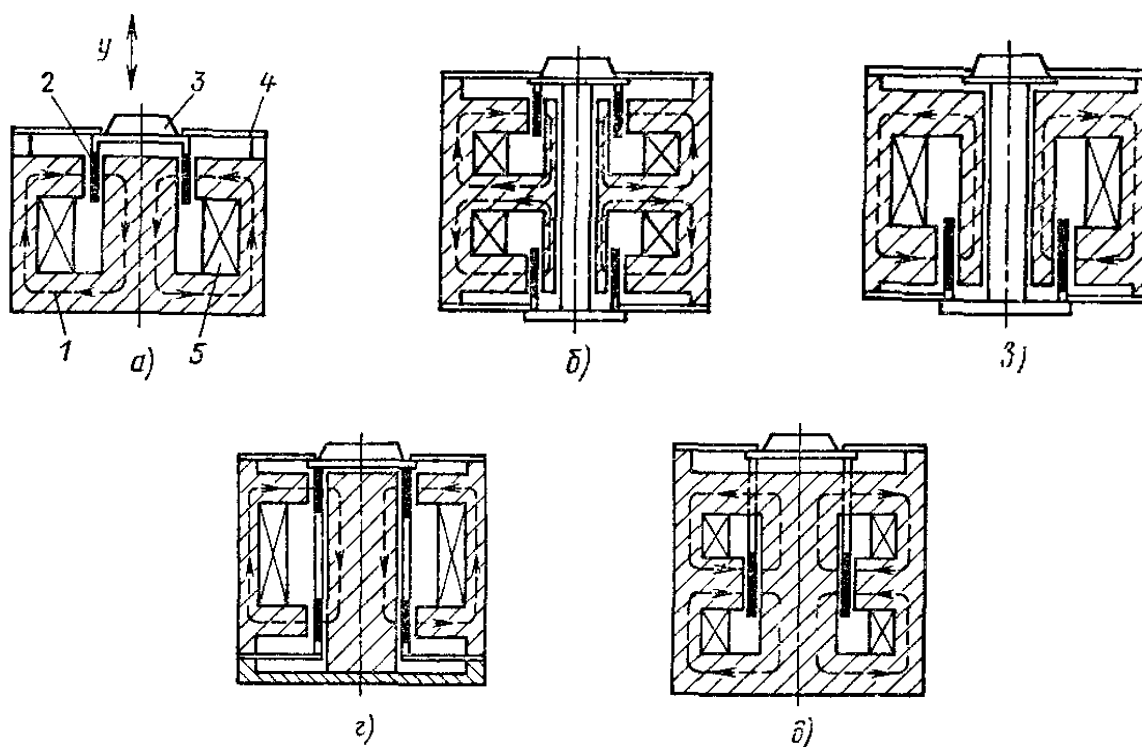
Основным звеном испытательных систем является вибровозбудитель (вибратор) – исполнительный элемент, предназначенный для воспроизведения заданных колебаний. Самое широкое распространение получили электродинамические, электрогидравлические и механические вибраторы.

Электродинамические вибровозбудители позволяют создавать колебания более высокочастотные (5...10 000 Гц), чем электрогидравлические (0...1000 Гц). Механические вибраторы применяют в системах, предназначенных для испытания методом фиксированных частот.

### **2.1.2. Электродинамические вибровозбудители [15]**

Электродинамические вибровозбудители широко применяют для вибрационных испытаний различных видов. С их помощью испытывают образцы материалов, деталей, узлов машин и приборов, производят натурные испытания агрегатов, машин, транспортных средств, а также исследуют свойства сыпучих сред, поведение биологических объектов. В радиоэлектронике и акустике электродинамические вибровозбудители применяют для возбуждения колебаний звукового диапазона.

Сравнительно редко электродинамические вибровозбудители используют для выполнения технологических операций.



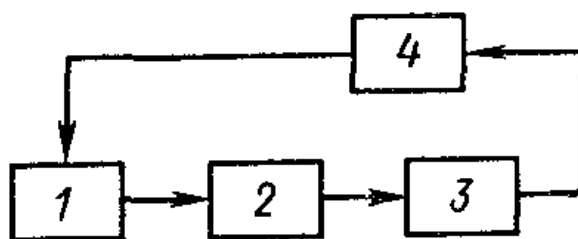
**Рис. 2.1. Схемы электродинамических вибровозбудителей**

Основными частями электродинамического вибровозбудителя являются: магнитная система; подвижная система; упругие элементы; система питания, управления и контроля.

В зависимости от назначения вибровозбудителя, его мощности, частотного диапазона вибрации и других факторов в его конструкцию могут быть включены система охлаждения, устройства для изменения направления вибрации, усилительные и согласующие системы.

Магнитная система (рис. 2.1) представляет собой постоянный магнит или электромагнит 1 с обмоткой возбуждения (подмагничивания) 5. В мощных вибровозбудителях обычно применяют электромагниты; при этом сила тока в обмотке возбуждения в случае необходимости может быть регулируемой. Обмотку возбуждения выполняют без охлаждения, а также с воздушным или жидкостным охлаждением. Подвижная система состоит из подвижной обмотки 2, каркаса обмотки, соединительных частей и стола 3, платформы, стержня или другого устройства, служащего для передачи движения от вибровозбудителя на объект испытаний. Подвижную обмотку, так же как и обмотку возбуждения, часто выполняют с воздушным или жидкостным охлаждением.

Упругие элементы 4 необходимы для возвращения подвижной системы в положение равновесия, определяемое симметричным расположением подвижной обмотки в рабочем зазоре магнитопровода.



**Рис. 2.2.** Схема установки с электродинамическим вибровозбудителем:  
 1 – блок генератора и регулирования; 2 – усилитель мощности; 3 – вибровозбудитель;  
 4 – блок обработки данных

На рисунке 2.2. представлена структурная схема установки с электродинамическим вибровозбудителем в случае применения замкнутой системы управления возбудителем.

Диапазоны параметров воспроизводимой вибрации различаются большой шириной. Основными показателями вибровозбудителя являются частотный диапазон и амплитуда вынуждающей силы при гармонической вибрации. Наиболее характерный частотный диапазон для электродинамических вибровозбудителей средней мощности 5...3000 Гц. В отдельных конструкциях предусмотрено проведение испытаний на частотах до 15 000...30 000 Гц.

К недостаткам электродинамических вибровозбудителей следует отнести относительную сложность конструкции (для мощных вибровозбудителей), чувствительность к тяжелым условиям эксплуатации (вредное воздействие внешней среды), наличие в некоторых конструкциях значительных магнитных полей рассеяния.

### 2.1.3. Механические вибровозбудители [15]

*Принцип действия механических вибровозбудителей.*

У вибровозбудителей рассматриваемого типа ведущее звено имеет вполне определенное движение, зависящее только от геометрических размеров механизмов (эксцентриситета кривошипа).

Вибровозбудитель сообщает вибромашине энергию, необходимую для преодоления внутренних потерь и выполнения полезной работы, обеспечивает ее пуск и поддержание рабочего режима. В машинах дорезонансного и зарезонансного типов он обеспечивает также циркуляцию энергии в колебательной системе, связанную с несбалансированностью упругих или инерционных сил.

Механические вибровозбудители в соответствии с принципиальным устройством делятся на эксцентриковые приводы с упругим шатуном, и с приводным демпфером. Принудительные вибровозбудители имеют жесткий шатун. Различают приводы с регулируемой и нерегулируемой амплитудой колебаний.

Регулируемые приводы, в свою очередь, подразделяют на привод, регулируемый без остановки машины, и привод, регулируемый в нерабочем состоянии машины. По характеру регулирования различают приводы с плавным и со ступенчатым регулированием.

Механические вибровозбудители могут быть использованы для создания прямолинейных гармонических и бигармонических колебаний, а также для возбуждения эллиптических колебаний. По принципу действия подобные устройства подразделяются на кинематические и принудительные.

В соответствии с различными условиями работы принудительный и кинематический вибровозбудители принципиально отличаются друг от друга. Принудительный вибровозбудитель должен сообщать рабочему органу кинематически определенное движение, а при кинематическом вибровозбудителе характер движения рабочего органа определяется параметрами самой машины, ее массами и жесткостью упругих связей.

В связи с изложенным, в принудительном вибровозбудителе используют эксцентриковый механизм, конец шатуна которого, закрепленный на рабочем органе, имеет кинематически определенное движение. В этом случае применяют жесткий шатун, и вал привода неподвижно устанавливают на раме конвейера.

Кинематический вибровозбудитель не должен накладывать жестких связей на движение рабочего органа машины, поэтому в механизм привода для получения необходимой степени подвижности вводят деформирующие элементы.

Принципиальное устройство принудительного вибровозбудителя приведено на рис. 2.3, *а*. На вал 1 насажен эксцентрик 2, который обхватывается хомутом 3 шатуна 4, свободный конец шатуна шарнирно прикреплен к рабочему органу машины.

Для уравнивания движущихся масс (эксцентрика и шатуна), а в отдельных случаях и частичного уравнивания движущихся частей рабочей машины, на валу устанавливают противовес таким образом, чтобы создаваемая им центробежная сила уравнивала силы инерции движущихся частей привода (неуравновешенных частей машины).

Наиболее полное уравнивание сил инерции движущихся частей привода и вибрационной машины достигается в системе привода с двумя эксцентриковыми валами (рис. 2.3, *б*). Такой привод состоит из двух эксцентриковых валов 1 и 2 с эксцентриками 3 и 4, на которые насажены шатуны 5 и 6. Оба вала приводятся во вращение от электродвигателя через клиноременную передачу и систему зубчатых колес 7. Валы вращаются в противоположные стороны. Для уравнивания сил инерции на валах установлены противовесы 8 и 9.

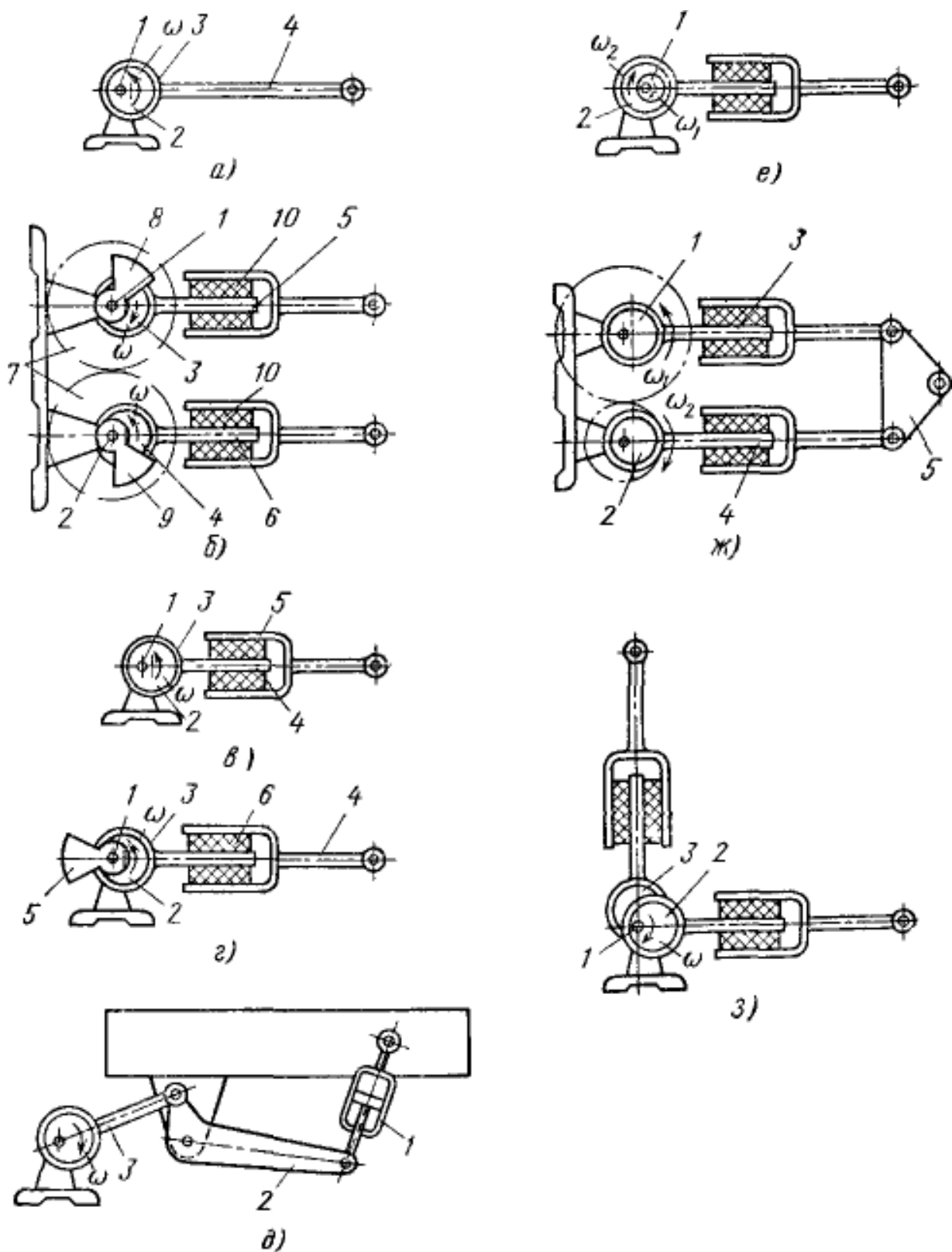


Рис. 2.3. Принципиальные схемы кинематических и принудительных вибровозбудителей

В приводе этой конструкции вертикальные составляющие центробежных сил противовесов вследствие вращения валов в противоположные стороны полностью уравновешиваются. Равнодействующая составляющих центробежных сил

действует в направлении колебаний. Она уравнивает силы инерции движущихся частей вибрационной машины. Уравновешенный эксцентриковый привод испытывает меньшие динамические нагрузки и способствует устранению нежелательных паразитных колебаний.

Принципиальное устройство простейшего кинематического вибровозбудителя приведено на рис. 2.3, *в*. Он отличается от принудительного вибровозбудителя (рис. 2.3, *а*) только тем, что шатун содержит упругий элемент 5. На рисунке 2.3, *г* показан уравновешенный кинематический вибровозбудитель.

В эксцентриковом приводе используют различные системы упругих шатунов. В зависимости от конструкции шатуна различают две модификации привода этого типа. К первой модификации относятся приводы с шатунами, являющимися упругими во всем диапазоне рабочих нагрузок; ко второй – приводы с так называемым не вполне упругим шатуном. Шатун привода второй модификации состоит из двух половин, поджатых друг к другу винтовыми пружинами с начальным затыгом. Начальный затыг пружин выбирают таким образом, чтобы сила предварительного поджатия пружин лишь немного превосходила силы сопротивления в установившемся режиме вибромашины. При использовании такого привода в резонансных вибромашинах в процессе пуска он работает как кинематический, а при установившейся работе – как принудительный.

Привод с не вполне упругим шатуном облегчает запуск резонансных вибромашин и одновременно обеспечивает кинематически определенное движение при установившихся режимах работы. Недостатком привода являются удары и шум при запуске.

Вибровозбудитель с демпфером представлен на рис. 2.3, *д*. Один конец демпфера 1 укреплен на рабочем органе вибромашины, а второй соединен с трехшарнирным коромыслом-балансиром 2. Коромысло с помощью среднего шарнира также прикреплено к рабочему органу вибромашины. К короткому концу коромысла прикреплен шатун 3 вибровозбудителя. Из эксцентриковых виброприводов для создания бигармонических колебаний можно использовать привод, состоящий из двух эксцентриковых втулок 1 и 2 (рис. 25, *е*), помещенных одна в другую, которым сообщается вращение с угловыми скоростями  $\omega_1$  и  $\omega_2$  при заданном угле сдвига фаз.

Для создания бигармонических колебаний можно применять также эксцентриковый привод с параллельным расположением шатунов (рис. 2.3, *ж*), состоящий из двух параллельных синхронно вращающихся эксцентриковых валов 1 и 2, на которых закреплены упругие шатуны 3 и 4. Перемещения отдель-

ных шатунов суммируются на маятниковом балансира 5, соединенном с рабочим органом вибромашины и сообщаемом ей бигармоническое движение. Эллиптические колебания могут возбуждаться эксцентриковым вибровозбудителем с двумя смещенными эксцентриками, вращающимися с одинаковой угловой скоростью (рис. 2.3, з). Он состоит из эксцентрикового вала 1 с двумя эксцентриками 2 и 3, сдвинутыми один относительно другого на угол  $90^\circ$ . На эксцентриках расположены упругие шатуны, смещенные на тот же угол и прикрепленные к рабочему органу вибромашины.

Эксцентриковый привод наиболее рационально использовать в низкочастотных колебательных системах. Этот тип привода способен создавать большие вынуждающие силы при невысоких частотах колебаний. При высоких частотах колебаний возникают большие силы инерции, которые передаются на подшипники эксцентрикового вала привода. При этом в подшипниках действуют значительные силы трения, что обуславливает относительно более быстрый выход их из строя. При повышенных частотах колебаний эксцентриковый привод используют лишь в уравновешенных колебательных системах, работающих на резонансных режимах. В этом случае силы инерции рабочих органов машины практически полностью уравновешены, и на подшипники передаются незначительные нагрузки.

Эксцентриковый привод с жестким шатуном (принудительный вибровозбудитель) обеспечивает поддержание постоянной амплитуды колебаний рабочего органа во всем диапазоне частот работы машины. Недостатком этого привода являются затрудненные условия пуска. При пуске привод должен за один оборот преодолеть восстанавливающие силы упругой системы вибромашины и сообщить ей необходимое начальное ускорение. При использовании такого привода применяют специальные электродвигатели с повышенным (10-12-кратным) пусковым моментом, устанавливают два электродвигателя, один из которых отключают после пуска, или применяют один из двух следующих способов.

При первом способе для облегчения пуска используют специальный пусковой маховик. Такой привод имеет эксцентриковый вал, состоящий из двух частей, соединенных между собой дисковой муфтой. На одной половине вала установлен эксцентрик с шатуном, на другой – маховик, приводимый во вращение от двигателя. Пуск машины таким приводом осуществляется следующим образом. С помощью муфты отсоединяют маховик от эксцентрика, затем двигателем раскручивают маховик до максимальной частоты вращения. Далее с помощью муфты маховик соединяют с эксцентриком. При этом кинетическая

энергия, накопленная в маховике, расходуется на деформацию рабочих рессор, чем облегчается пуск. В установившемся режиме маховик способствует обеспечению плавной работы машины.

При втором способе для облегчения пуска используют эксцентрик с регулируемым в процессе пуска эксцентриситетом. Такой привод состоит из двух эксцентриковых втулок, помещенных одна в другую. Поворачивая втулки относительно друг друга, можно регулировать эксцентриситет от нуля до максимума. Пуск осуществляют при минимальном эксцентриситете. По мере разгона машины эксцентриситет автоматически увеличивается, пока не достигнет эксплуатационной величины. Эксцентриковый привод с жестким шатуном, работая на собственных частотах колебательной системы, развивает наименьшую вынуждающую силу. Снижение или повышение частоты, по сравнению с собственной частотой колебательной системы, выражается в резком увеличении вынуждающих сил.

Эксцентриковый привод с упругим шатуном лишен недостатков привода с жестким шатуном. Вследствие упругой связи пуск вибромашины с приводом такого типа растягивается, рабочий орган вибромашины раскачивается постепенно, вследствие чего привод в переходных режимах испытывает незначительные нагрузки. Вибромашины с эксцентриковым приводом с упругим шатуном обычно настраивают на частоту, близкую к собственной частоте колебательной системы, для снижения потребной вынуждающей силы. В этом режиме амплитуда колебаний рабочего органа несколько меньше эксцентриситета привода и тем ближе к нему, чем меньше сопротивления в системе.

При настройке вибромашины на резонансный режим существенно увеличиваются амплитуда колебаний и затраты энергии в колебательной системе.

Применительно к энергозатратам в резонансных режимах наиболее предпочтительным является эксцентриковый привод с упругим шатуном, затем эксцентриковые приводы с демпфером в шатуне и жесткими шатунами.

Недостатком эксцентрикового привода с упругим шатуном, проявляющимся при работе на собственных частотах колебаний динамической системы, является зависимость амплитуды от действующих сопротивлений и нагрузок на машину.

Эксцентриковый привод с демпфером в шатуне обеспечивает большую устойчивость работы в резонансных режимах, однако для обеспечения одинаковых размахов колебаний такой привод должен создавать большие вынуждающие силы, чем привод с упругим шатуном. В дорезонансных и зарезонансных режимах эта разница еще более существенна. То же отмечается и в отношении энергозатрат.



Эксцентриковый привод целесообразно использовать в низкочастотных машинах, так как он может создавать необходимые при этом большие амплитуды колебаний. Привод этого типа способен создавать большие вынуждающие силы при невысокой скорости вращения приводного вала. В низкочастотных машинах меньше также динамические нагрузки на привод, что позволяет работать с некоторой отстройкой от собственной частоты колебательной системы, обеспечивая большую устойчивость.

При использовании двигателей с регулируемой частотой вращения, например электродвигателей постоянного тока или коллекторных электродвигателей трехфазного тока, можно получить привод с широким диапазоном регулирования частот. Используя поворотные эксцентрики, можно также регулировать амплитуду колебаний.

#### **2.1.4. Вибрационные испытательные стенды**

Различают следующие вибростенды:

1. Наиболее универсальными являются стенды с электродинамическим способом возбуждения вибрации. Эти стенды характеризуются весьма широким диапазоном воспроизводимых частот. При применении специального оборудования на них возможно осуществление всех основных режимов вибрационных испытаний. На стендах большой мощности может быть создана гармоническая вынуждающая сила с амплитудой до  $5 \dots 10^4$  кгс.

2. Стенды с электромагнитным возбуждением работают в ограниченном диапазоне частот; применяют их для испытаний, при которых воспроизведение заданной формы вибрации не имеет существенного значения.

3. Стенды с механическим возбуждением пригодны для длительной эксплуатации в диапазоне частот до 50 Гц. Применяют их для испытаний при гармонической вибрации. Специальные вибрационные стенды (двойные центрифуги) дают возможность получить гармонические вибрационные ускорения с весьма низкой частотой.

4. Стенды с гидравлическим возбуждением ограничены по частотному диапазону в большинстве конструкций до 100 Гц, иногда до 400 Гц. Стенды характеризуются большими амплитудами вынуждающей силы. Остальные параметры зависят от способа первичного возбуждения вибрации в стенде (электродинамического, электромагнитного, механического).

На рисунке 2.4 изображена одна из типичных схем вибрационных испытательных установок с применением электродинамического вибростенда. Установка предназначена для испытаний изделий на гармоническую вибрацию.

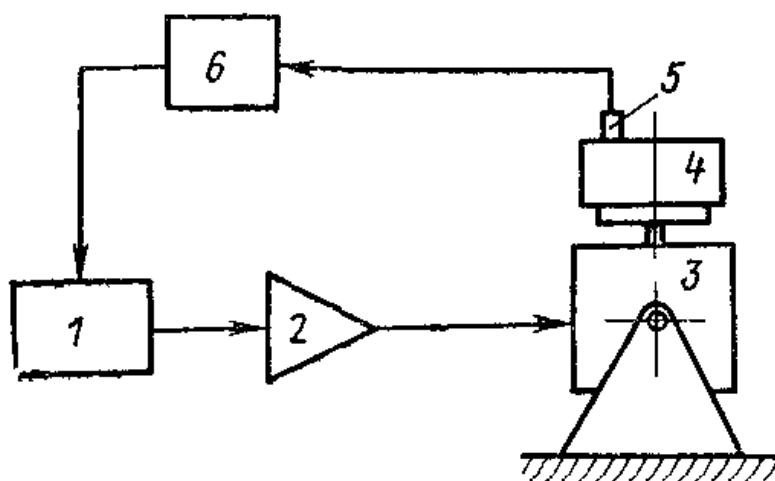


Рис. 2.4. Структурная схема электродинамической вибрационной установки

При этом в состав задающего генератора 1 входят блок качания частоты и автоматический регулятор уровня амплитуды ускорения или перемещения. Метод качающейся частоты широко применяют для испытаний изделий на виброустойчивость, а также для определения резонансных частот изделий.

Часто испытания на воздействие вибрации производят при постоянной амплитуде перемещения на низких частотах и при постоянной амплитуде ускорения на высоких частотах. Время цикла качания и закон изменения частоты определяются в каждом случае по результатам предварительных данных. Автоматический регулятор уровня вибрации изменяет выходное напряжение генератора, а, следовательно, и мощность на выходе усилителя мощности 2, подводимую к подвижной обмотке электродинамического вибровозбудителя 3. Таким образом, осуществляется компенсация неравномерности амплитудно-частотной характеристики и поддерживается необходимый уровень вибрации в месте установки датчика 4. С виброизмерительного прибора 5 через преобразователь 6 сигнал подается в систему задающего генератора, и этим осуществляется обратная связь по перемещению, скорости и ускорению.

При испытании на полигармоническую вибрацию в схему включают несколько параллельно соединенных генераторов звуковых частот, число которых равно числу заданных гармоник, а также суммирующее устройство.

Для испытаний на широкополосную случайную вибрацию в качестве сигнала возбуждения задающего устройства используют широкополосный случайный сигнал. Контрольными элементами являются либо многочисленные узкополосные фильтры фиксированной частоты, либо настраиваемые фильтры. Последние устанавливают так, чтобы выровнять амплитудно-частотную характеристику вибростенда, определяемую динамическими свойствами подвижной системы вместе с изделием и элементами крепления.

Для настройки узкополосных фильтров применяют автоматические системы. С помощью этих фильтров регулируется мощность в каждой полосе частот. На фильтры подается выходной сигнал с датчика, и в случае отклонений от заранее определенного уровня вырабатывается соответствующий сигнал, который подается на усилитель мощности вибростенда. Испытания на широкополосную вибрацию в ряде случаев могут быть заменены вибрационными испытаниями с разверткой узкополосной случайной вибрации. Этот метод основан на принципе замены широкополосного случайного возбуждения с низким уровнем спектральной плотности ускорений более интенсивным узкополосным возбуждением при медленной перестройке одного полосового фильтра по частоте. Этот метод позволяет использовать задающую аппаратуру значительно более простой конструкции, сокращает время на подготовку испытаний и обеспечивает быстрый выход на рабочий режим. Для сложных и ответственных устройств дополнительно можно проводить испытания на имитацию натурной вибрации. При испытаниях предварительно выполняют корректировку амплитудно-частотной характеристики вибростенда. Затем с магнитофона воспроизводится запись натурной вибрации в реальном масштабе и проверяется работоспособность испытуемого изделия.

На рисунке 2.5 представлена типичная конструктивная схема электродинамического вибростенда без системы управления.

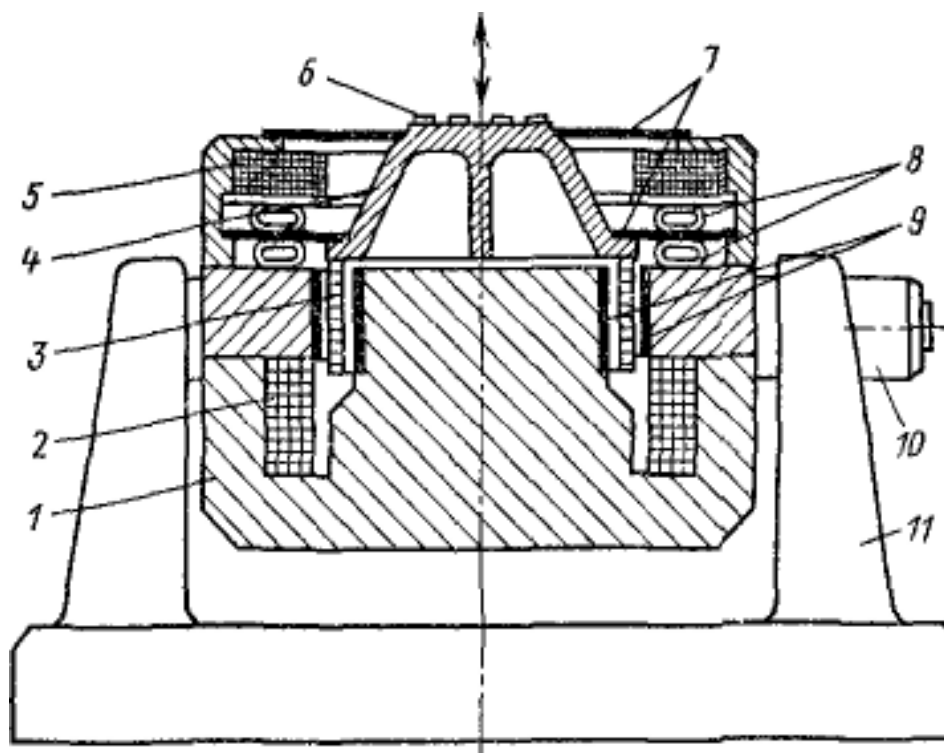


Рис. 2.5. Схемы вибрационного стенда с электродинамическим возбуждением вибрации

Стенд предназначен для работы в диапазоне 5...5000 Гц и создает амплитуду гармонической вынуждающей силы до  $2 \dots 10^3$  кгс. Вибрационный стенд выполнен по схеме, представленной на рис. 2.5. Электромагнит состоит из магнитопровода 1 и обмотки возбуждения 2. Обмотка возбуждения выполнена с принудительным водяным охлаждением. Для уменьшения потерь в рабочем зазоре магнитопровода установлены медные экраны 9, нанесенные электролитическим путем. Рабочий зазор и подвижная обмотка охлаждаются водой. Подвижная обмотка 3 выполнена без каркаса для уменьшения ширины рабочего зазора. Витки обмотки имеют прямоугольное сечение. Они склеены и присоединены к несущей части подвижной системы специальными разъемными болтами. Несущая часть подвижной системы 4 изготовлена из магниевого сплава и представляет собой коническую оболочку с ребрами. Верхняя часть является столом стенда. Изделие крепится к столу стенда через специальные резьбовые втулки 6 из немагнитной стали. Подвижная система представляет собой весьма жесткую конструкцию, обеспечивающую проведение испытаний в широком диапазоне частот. Упругие элементы (подвеска) состоят из двух текстолитовых мембран 7 с пазами, расположенными по окружностям различного радиуса. Для компенсации прогиба от силы тяжести при испытаниях изделий различной массы применены пневмокамеры 8. При повышении давления в пневмокамерах общая жесткость подвески увеличивается. Пневмокамеры также увеличивают демпфирование колебаний нижней мембраны, что имеет значение при испытаниях на низких частотах.

Для уменьшения поля рассеяния вблизи стола предусмотрена компенсационная катушка 5, параметры которой подобраны с учетом значений магнитных полей рассеяния в зоне стола. Для изменения направления вибрации имеется поворотное устройство с механическим приводом 10 и станиной 11 для крепления стенда к неподвижному основанию.

В состав стендов для проведения виброиспытаний входят вибропреобразователи (датчики), размещаемые на объектах испытаний. Датчики необходимы для преобразования механических колебаний объекта испытаний в сигнал, удобный для передачи и дальнейшей обработки.

Пьезоэлектрические виброизмерительные датчики марки ДН (ДН-3, ДН-4, ДН-5) предназначены для преобразования механических колебаний в электрические сигналы, пропорциональные ускорению колеблющегося объекта. Принцип работы вибропреобразователя основан на явлении прямого пьезоэффекта.

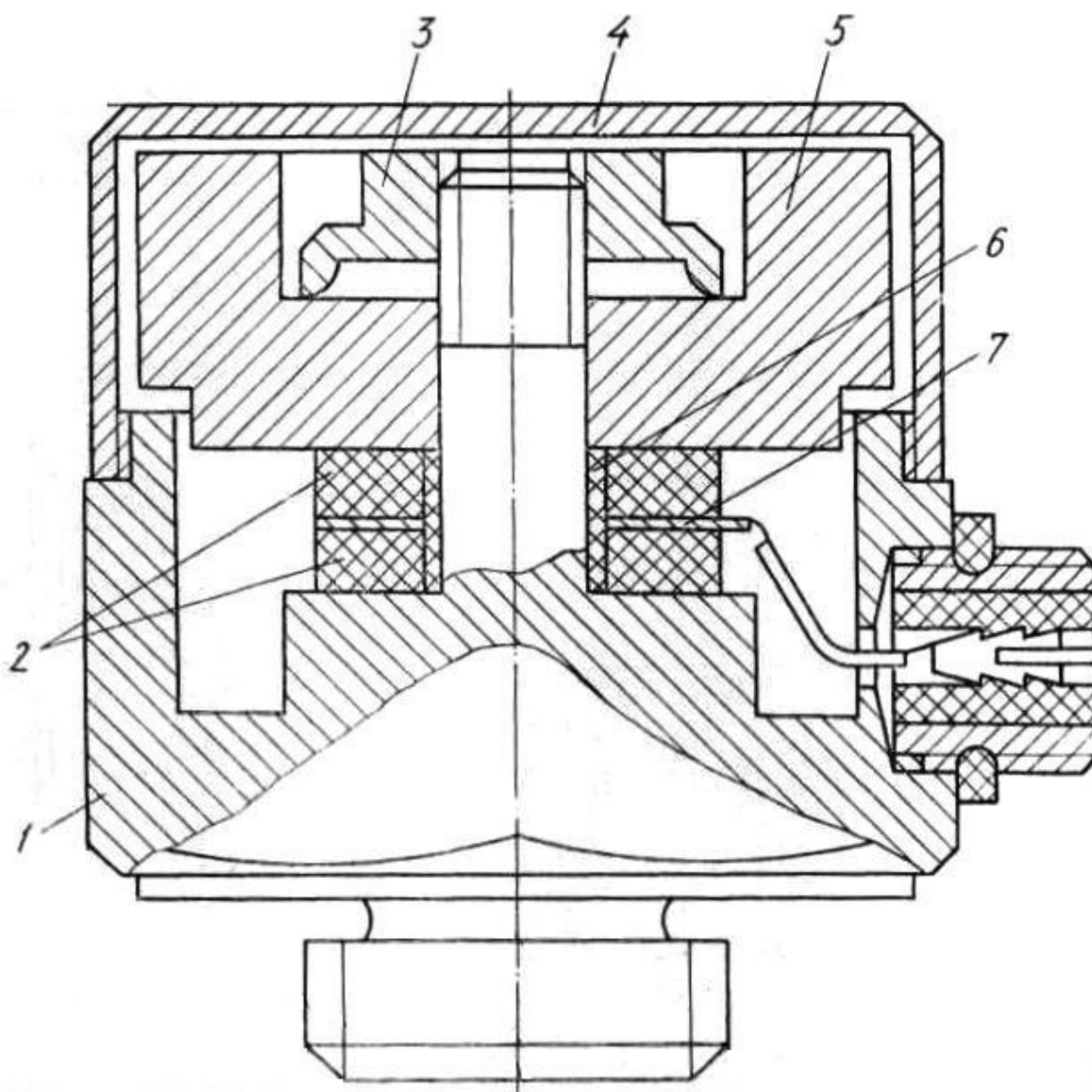
При воздействии механических колебаний на основание вибропреобразователя с ускорением  $a$  инерционная масса  $m$  испытывает воздействие силы  $P$ :

$$P = ma.$$

Пьезоэлементы вибропреобразователя подвергаются деформации сжатия, в результате чего на гранях пьезоэлементов возникают электрические заряды, пропорциональные действующему ускорению.

На рисунке 2.6 представлен общий вид преобразователей ДН-3, ДН-4.

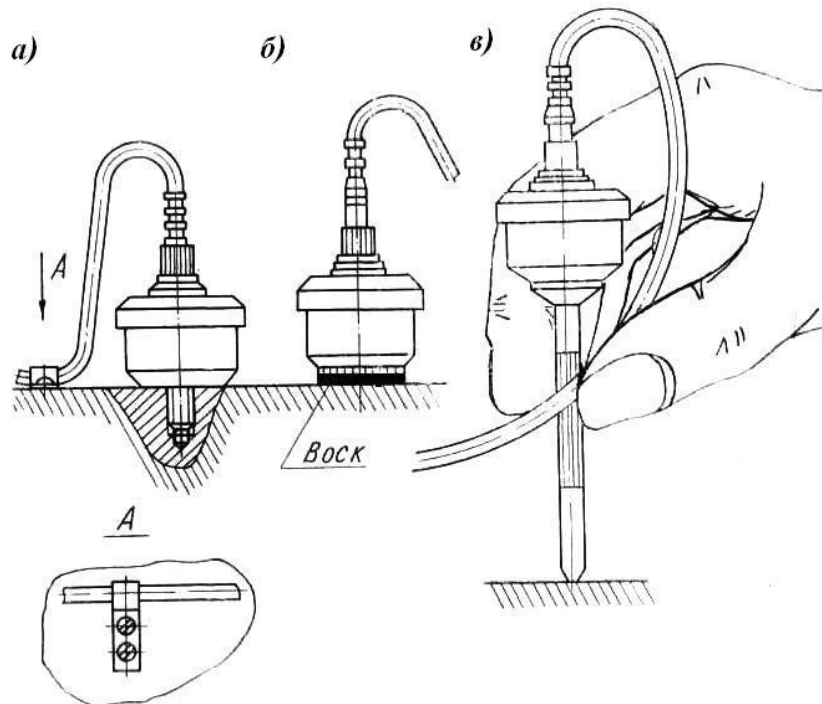
Вибропреобразователи ДН-3, ДН-4 состоят из основания 1, пьезоэлементов 2, массы инерционной 5, втулки 6, контакта 7 для снятия электрического потенциала. Статическая нагрузка на пьезоэлементы осуществляется гайкой 3. Сверху вибропреобразователь закрыт крышкой 4.



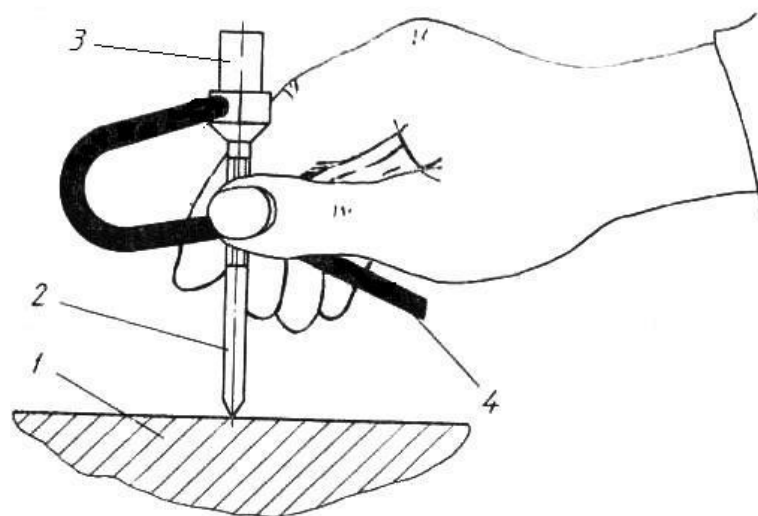
**Рис. 2.6. Общий вид преобразователей ДН-3, ДН-4:**

1 – основание; 2 – пьезоэлементы; 3 – гайка пружинная; 4 – крышка;  
5 – масса инерционная; 6 – втулка; 7 – контакт

Способы установки вибропреобразователей на объекте представлены на рис. 2.7. Вибропреобразователь может быть закреплен на объекте с помощью щупа (рис. 2.7), воска (так может быть установлен преобразователь ДН-5) (рис. 2.7, б). В случае, когда практически невозможно осуществить прочное крепление вибропреобразователя на объекте, измерения производят с помощью щупа (рис. 2.8).



**Рис. 2.7. Способы установки вибропреобразователей на объекте:**  
*а* – установка с помощью шпильки; *б* – установка с помощью заглушки и воска;  
*в* – установка с помощью щупа



**Рис. 2.8. Измерения при помощи щупа:**  
*1* – испытуемый объект; *2* – щуп; *3* – вибропреобразователь; *4* – кабель

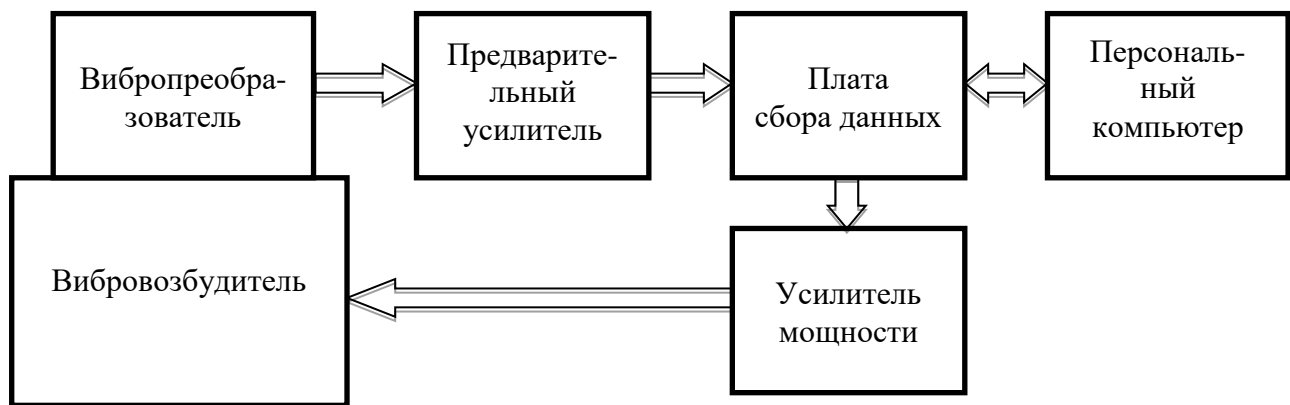
Вибропреобразователи марки ДН имеют разную спектральную чувствительность. Так датчик ДН-3 используется на частоте от 1000 до 4000 Гц, ДН-4 – от 1000 до 12 500 Гц, ДН-5 – от 200 до 500 Гц. Значения коэффициентов преобразования датчиков марки ДН приведены в табл. 2.1.

Для знакомства студентов с основными видами вибрационных испытаний на кафедре МиТИ ФГБОУ ВО «ТГТУ» изготовлен макет стенда для проведения испытаний на вибрационные воздействия. Структурная схема макета стенда показана на рис. 2.9. В качестве вибровозбудителя используется электродинамический громкоговоритель мощностью 10 Вт (в конструкцию громкоговорителя внесены некоторые изменения). На диффузоре громкоговорителя установлен тонкий стальной диск (вибростол), позволяющий закреплять на нем пьезоэлектрические вибропреобразователи марки ДН (пьезоакселерометры) разной спектральной чувствительности. Предварительный усилитель согласует сигнал вибропреобразователя с номинальным уровнем аналогового входного сигнала платы сбора данных (ПСД) PCI-6251. Далее сигнал поступает на аналоговый вход платы сбора данных, затем преобразуется в цифровую форму. После чего сигнал обрабатывается процессором ПК по программе, разработанной в среде программирования *LabView*. Таким образом, можно наблюдать выходной сигнал вибропреобразователя на виртуальном осциллографе.

При задании на лицевой панели виртуального прибора параметров вибрации на цифровой вход ПСД поступает сигнал, который затем преобразуется в аналоговую форму и подается на усилитель мощности. Усиленный сигнал поступает на катушку электродинамического вибровозбудителя, который начинает колебаться в соответствии с параметрами, заданными оператором.

**Таблица 2.1**

Действительное значение коэффициента преобразования в $\frac{\text{мВ} \cdot \text{с}^2}{\text{м}}$ на частоте, Гц	ДН-3	ДН-4	ДН-5
1000	10,5	0,92	
200			31



**Рис. 2.9. Структурная схема макета вибростенда**

Окно программы управления стендом показано на рис. 2.10.

Лицевая панель виртуального прибора состоит из трех блоков.

Блок 1 – генератор сигналов. Генератор задает изменение напряжения ЦАП платы сбора данных. Органы управления генератора позволяют выбрать тип вибрации и ее параметры. Так, для синусоидального сигнала можно задать амплитуду колебаний, частоту, начальную фазу, смещение.

Для ударного воздействия – выбрать тип удара (синусоидальный, треугольный и др.), указать длительность, амплитуду, количество ударов. Для случайной вибрации (шума) – тип шума («розовый»<sup>1</sup>, «белый»<sup>2</sup>), а также полосу частот, в которой будет колебаться напряжение на катушке вибровозбудителя. Также предусмотрена возможность задания полигармонического сигнала, т.е. такого типа вибрации, когда выходной сигнал генератора образуется в результате сложения нескольких синусоид. В этом случае необходимо указать параметры каждой синусоиды.

Виртуальный индикатор «Включено» служит для подачи на плату сбора данных сигнала о начале испытаний. Остановить эксперимент можно нажатием на виртуальную кнопку «Стоп».

Блок 2 – виртуальный осциллограф, на котором отображается генерируемый сигнал. График показывает изменение амплитуды колебаний напряжения (В) на катушке вибровозбудителя во времени (с).

<sup>1</sup> Розовый шум – шумовой сигнал, спектральный уровень которого снижается с увеличением частоты со спадом 3дБ на октаву.

<sup>2</sup> Белый шум – стационарный шум, спектральные составляющие которого равномерно распределены по всему диапазону задействованных частот.



Блок 3 – виртуальный осциллограф, на котором отображается сигнал пьезоэлектрического виброизмерительного датчика. График показывает изменение амплитуды сигнала вибропреобразователя (В) в зависимости от частоты колебаний напряжения на катушке вибровозбудителя (Гц).

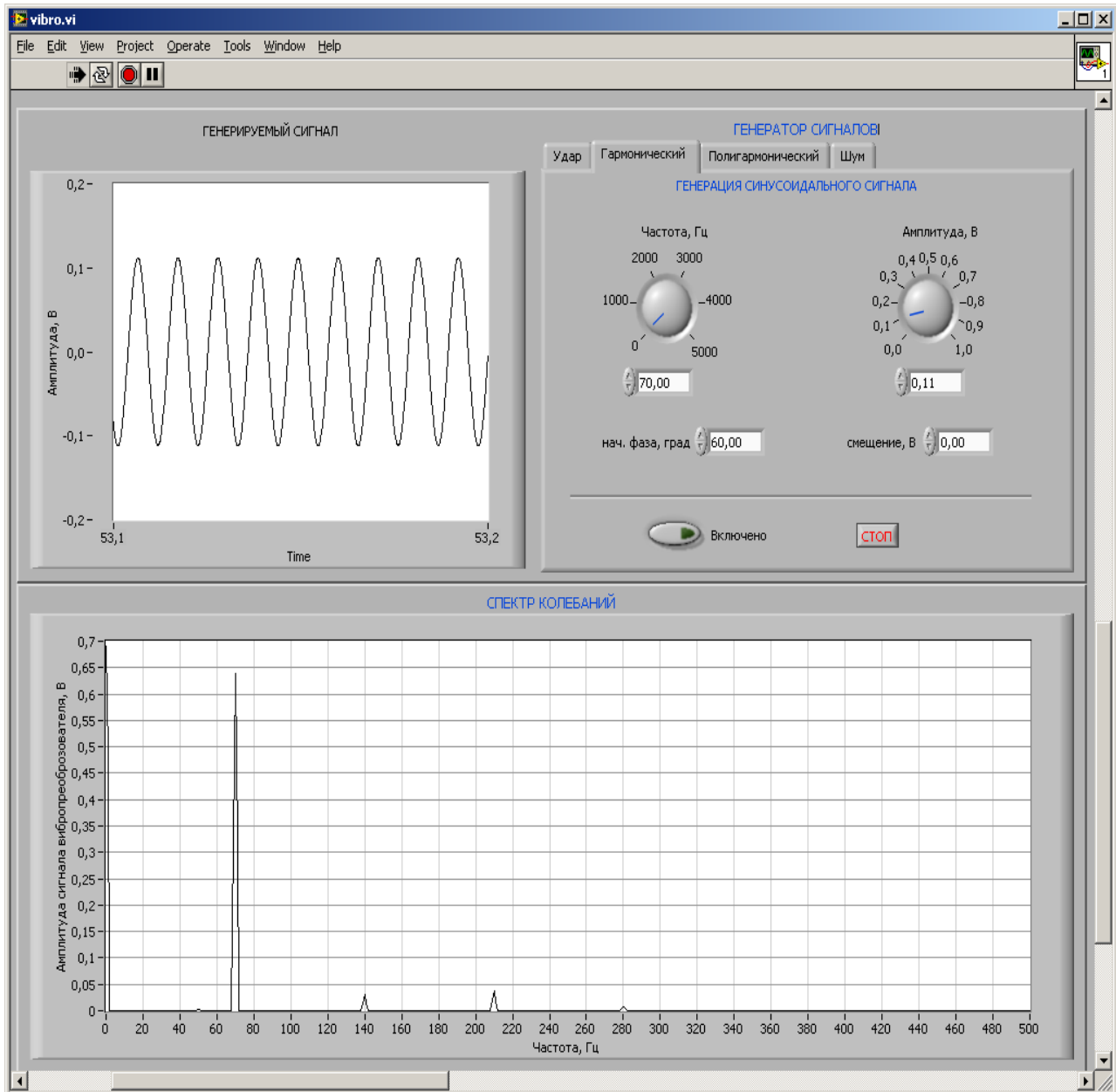


Рис. 2.10. Панель управления вибростендом

### Контрольные вопросы

1. В чем заключаются испытания на вибропрочность?
2. В чем заключаются испытания на виброустойчивость?
3. Какие методы вибрационных испытаний Вы знаете?

4. Как устроен электродинамический вибровозбудитель? На каких частотах работают электродинамические вибровозбудители?
5. В чем преимущество электродинамических вибровозбудителей?
6. Какие виды механических вибровозбудителей Вы знаете?
7. В чем разница кинематических вибровозбудителей от принудительных?
8. Каким образом может происходить уравнивание силы инерции движущихся частей механических вибровозбудителей?
9. Какова роль демпфера в механических вибровозбудителях?
10. Что представляет эксцентриковый привод вибровозбудителя?
11. Расскажите об устройстве типового вибростенда.
12. Какую роль играют вибродатчики в вибростендах?
13. Какие способы установки вибропреобразователей на объекте Вы знаете?
14. Что такое «белый шум»?

### 3. СЕНСОРЫ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ [21]

---

Трубопровод является одним из надежных средств транспортировки нефти, газа, воды и других важных ресурсов. Сеть трубопроводов в основном используется для транспортировки различных продуктов, особенно на большие расстояния. Известно, что в США трубопроводы общей протяженностью более 2,25 млн км по состоянию на 2023 год, в Китае – 86 921 км по состоянию на 2007 год, в Великобритании – 39 778 км по состоянию на 2013 год, в России – 256 913 км по состоянию на 2007 год, а в Канаде – 100 000 км по состоянию на 2007 год. Некоторые из этих трубопроводов проложены в различных средах, следовательно, подвергаются различным проблемам, таким как коррозия, трещины, деформация, повреждение от внешних сил и др.

Неразрушающий внутритрубный контроль (НВК) признан во всем мире как наиболее эффективный способ обеспечения безопасной эксплуатации трубопровода. Система НВК – это метод, используемый для сбора данных из внутреннего трубопровода, который является важной частью системы управления целостностью трубопроводной отрасли, способствующей безопасной, эффективной и рентабельной эксплуатации трубопровода. Система основана на различного типа датчиков, которые могут применяться в роботизированных комплексах по проверке трубопроводов.

Современное состояние методов и оборудования НВК основана на использовании датчиков-скребков для перемещения внутри труб и измерения их профиля, датчика утечки магнитного потока, ультразвукового датчика, электромагнитно-акустического датчика (EMAT PIG), а также вихретокового датчика. Их работа происходит без прекращения прокачки основного продукта.

*Геометрический датчик-скребок для измерения профиля и распознавания деформации трубопровода* включает в себя сенсоры рычажного типа, возможности которых обеспечивают: контроль овальности трубопровода, контроль оборудования, сварных швов, вмятины, изгиб/морщины. Некоторые датчики с высоким разрешением даже идентифицируют вмятины с потерей металла, деформациями изгиба и движением трубы. Кроме этого, они могут идентифицировать участки с высокой кривизной, которые могут быть опасны для датчиков-скребков других типов. Идентификация опасных участков, а также их привязка к местности происходит с использованием инерциальных датчиков и одометра.

### *Датчики-скребки утечки магнитного потока (MFL)*

Основным достоинством датчиков-скребков MFL является возможность работы без необходимости предварительной обработки объекта и простота обнаружения дефекта сигнала. Кроме того, они обладают возможностью простого онлайн-обнаружения и высокой степенью автоматизации для обнаружения многих типов дефектов. Также он может проверять как внутренние, так и внешние поверхности, и на него не влияют транспортные средства. Все эти преимущества делают проверку утечки магнитного потока наиболее популярным методом внутритрубной проверки.

Принцип датчика основан на классическом магнитном методе неразрушающего контроля и заключается в определении магнитных полей рассеяния. Однако метод обработки измерительной информации имеет свои сложности, так как в процессе контроля необходимо учитывать многие мешающие факторы, например, магнитное поле вихревых токов в материале стенок трубопровода. Все это приводит к затруднениям в интерпретации сигнала и описании дефекта.

Датчик также может создавать поперечное магнитное поле, которое позволяет определять осевые трещины. Для этой цели создан, так называемый, *спиральный датчик-скребок*.

*Ультразвуковой датчик (УТ)*. Ультразвук является одним из основных направлений традиционных методов неразрушающего контроля, в котором используются направленные волны и который является основным средством обнаружения трещин в трубопроводах.. На рисунке 2.12 показан общий вид датчика-скребка УТ.



**Рис. 2.11. Спиральный детектор MFL**



Рис. 2.12. УЗ-детектор

*Вихретоковый датчик-скребок* (ЕС РIG) показан на рис. 2.13. Метод его контроля основан на взаимодействии источника магнитного поля и исследуемого материала трубопровода, при котором возникают вихревые токи в испытуемом образце. Дефекты очень мелких трещин оказывают сильное влияние на силу вихревых токов, магнитное поле которых в свою очередь воздействует на э.д.с. в приемной катушке. Таким образом, по изменению э.д.с. приемной катушки можно обнаруживать трещины в трубопроводе.

В последнее время уделяется большое внимание контролю качества подводных трубопроводов [22]. Поскольку объекты подобного типа являются самыми дорогостоящими, крупнейшими и наиболее широко устанавливаемыми компонентами подводной инфраструктуры, они также несут наибольшую вероятность повреждения как по искусственным, так и по естественным причинам.



Рис 2.13. Вихретоковый датчик-скребок фирмы Rosen

При этом для их контроля также используют все рассмотренные ранее методы контроля. Однако при этом следует учитывать разные факторы, такие как, например, толщина стен труб может достигать до 3 дюймов, а сами трубы могут быть многослойными и иметь внешний бетонный слой для защиты от внешних воздействий. Кроме этого, сложности для контроля добавляет экстремальная глубина погружения труб, что приводит к тому, что средства контроля не могут быть доставлены на трубопровод без дорогостоящего оборудования и потенциально опасных процедур. Если трубопровод многослойный, затраты на снятие слоев покрытия под тысячами метров океанской воды только для плановой проверки непрактичны.

На рисунке 2.14 показана схема датчика для контроля подводных трубопроводов с применением вихретоковых преобразователей. Вращение магнитов создает в трубе вихревые токи, сила которых зависит от наличия повреждения в стенке трубы. Это отразится на сигнале сенсора (на рисунке справа) [22].

Таким образом, обычно при внутритрубном контроле трубопровода выделяют три основных типа дефектов, включая деформацию, потерю металла и трещины. Но все методы контроля имеют свои достоинства и недостатки, поэтому интегрируя различные датчики-скребки в один комплекс можно существенно повысить эффективность обнаружения дефектов трубопровода. Этот комбинированный инструмент сочетает в себе преимущества каждого типа сенсоров и позволяет собирать сразу несколько данных для обеспечения уверенности в правильности контроля.

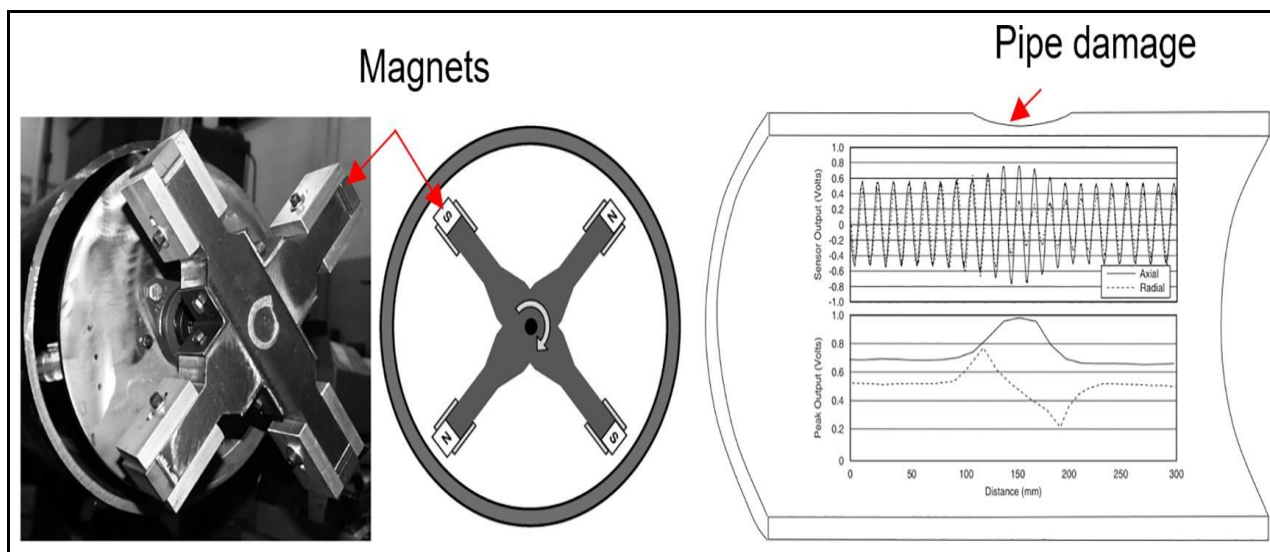


Рис. 2.14. Датчик контроля подводных трубопроводов

## Контрольные вопросы

1. Какие датчики применяют для контроля повреждений трубопроводов?
2. Каково назначение геометрических датчиков-скребков для трубопроводов?
3. Как происходит привязка к местности коррозионных поражений и геометрических дефектов трубопроводов?
4. Какие методы контроля дефектов трубопровода используют в датчиках-скребках?
5. Что такое датчики рычажного типа?
6. Что представляет собой датчик типа MFL?
7. Какие магнитные поля могут создавать в трубопроводе датчики-скребки и для чего?
8. Какие мешающие факторы необходимо учитывать при работе с магнитным датчиком?
9. Что позволяет определять ультразвуковой датчик-скребок?
10. Что позволяет определять вихретоковый датчик-скребок?
11. В чем особенность контроля подводных трубопроводов?

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

---

В учебном пособии рассмотрены датчики, используемые в методах неразрушающего контроля, позволяющие проводить в автоматизированном и роботизированном режимах обследование и контроль качества материалов и изделий. Особое внимание уделено активному тепловому контролю с применением лазера в качестве источника точечного теплового воздействия на поверхность изделия с использованием 5-осевого робота-манипулятора. Такой метод позволяет обследовать изделия, имеющие сложную криволинейную поверхность и определять наличие поверхностных и подповерхностных дефектов. Рассмотренный метод решения обратной задачи кинематики является основой для управления движением рабочего органа робота-манипулятора при сканировании изделий с применением других методов контроля.

Применение метода динамической термографии и обработки данных на основе технологий машинного обучения позволяет существенно расширить функциональные возможности методов контроля без использования сложных аналитических зависимостей, получаемых на основе обратных краевых задач теплопроводности. Это показано на примере линейной регрессионной модели, позволяющей прогнозировать глубины залегания дефектов по максимальной избыточной температуре и времени достижения данной температуры.

В учебном пособии рассмотрены также датчики и методы, реализующие ультразвуковой, вихретоковый контроль, их модификации и разновидности, а также стенды для испытания изделий на воздействие вибраций. Показано применение данных методов и датчиков для неразрушающего контроля наземных и подводных трубопроводов.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

---

1. **Automated** Real-Time Eddy Current Array Inspection of Nuclear Assets / E. A. Foster et al. // *Sensors*. – 2022. – V. 22, No. 16.
2. **ГОСТ 18353–79**. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов.
3. **Corke, P. I.** A Simple and Systematic Approach to Assigning Denavit-Hartenberg Parameters / P. I. Corke // *IEEE Trans. Robot.* – 2007. – V. 23, No. 3.
4. **ГОСТ 21105–87**. Контроль неразрушающий. Магнитопорошковый метод.
5. **ГОСТ 18442–80**. Контроль неразрушающий. Капиллярные методы. Общие требования.
6. **ГОСТ 21104–75**. Контроль неразрушающий. Феррозондовый метод.
7. **ГОСТ 25314–82**. Контроль неразрушающий тепловой. Термины и определения.
8. **ГОСТ 24289–80**. Контроль неразрушающий вихретоковый. Термины и определения.
9. **ГОСТ 23667–85**. Контроль неразрушающий. Дефектоскопы ультразвуковые. Методы измерения основных параметров.
10. **ГОСТ Р 51369–99**. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности.
11. **ГОСТ Р 51368–99**. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на устойчивость к воздействию температуры.
12. **Баранов, В. М.** Испытания и контроль качества материалов и конструкций : учебное пособие для вузов / В. М. Баранов, А. М. Карасевич, Г. А. Сарычев. – М. : Высшая школа, 2004. – 360 с.
13. **Клюев, В. В.** Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий : справочник ; в 2-х кн. / В. В. Клюев ; под. ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 1986. – 352 с.
14. **Неразрушающий контроль** и диагностика : справочник / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев и др. ; под ред. В. В. Ключева. – М. : Машиностроение, 2005. – 656 с.

15. **Машиностроение** : энциклопедия : в 40 т. Т. 3(7). Измерения, контроль, испытания и диагностика / В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, В. Н. Филинов и др. – М. : Машиностроение, 1996. – 464 с.
16. **Ермолов, И. Н.** Неразрушающий контроль : справочник : в 7 т. Т. 3. Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге ; под общ. ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2004. – 864 с.
17. **Comparative** Analysis of In-line Inspection Equipments and Technologies / H. Song et al. // in IOP Conference Series : Materials Science and Engineering. – 2018. – V. 382, No. 3.
18. **An Ultrasound** Robotic System Using the Commercial Robot UR5 / K. Mathiassen, J. E. Fjellin, K. Glette, P. K. Hol and O. J. Elle // Front. Robot. AI. – 2016. – V. 3, No.
19. **Ultrasonic** Non-Destructive Testing System of Semi-Enclosed Workpiece with Dual-Robot Testing System / C. Guo, C. Xu, J. Hao, D. Xiao and W. Yang // Sensors (Switzerland). – 2019. – V. 19, No. 15.
20. **Automated** Real-Time Eddy Current Array Inspection of Nuclear Assets / E. A. Foster et al. // Sensors. – 2022. – V. 22, No. 16.
21. **Pipeline** In-Line Inspection Method, Instrumentation and Data Management / Q. Ma et al. // Sensors. – 2021. – V. 21, No. 11.
22. **Inspection** and Monitoring Systems Subsea Pipelines: a Review Paper / M. Ho, S. El-Borgi, D. Patil and G. Song // Structural Health Monitoring. – 2020. – V. 19, No. 2.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

---

### ПРОГРАММА ДЛЯ АНАЛИЗА ДАННЫХ И ПОСТРОЕНИЯ РЕГРЕССИОННОЙ МОДЕЛИ ГЛУБИНЫ ЗАЛЕГАНИЯ ДЕФЕКТОВ В КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕРМОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА

```
import pandas as pd
import numpy as np
data=pd.read_table("C:\\Thermafilms\\архив термофиль-
мов\\xLis2109_02t.txt")
time=data
data=data.iloc[0:35, 4:]

data_list=data.to_numpy().tolist()
time=time.iloc[0:30,2:3]
time_list=time.to_numpy().tolist()
print(time_list)
Num_Str=len(data_list)
[[3.03], [4.015], [5.014], [6.03], [6.998], [7.998],
[9.013], [10.029], [11.013], [12.013], [12.997],
[13.997], [15.012], [15.996], [16.996], [18.011],
[18.995], [19.995], [21.011], [22.01], [23.01], [24.025],
[25.01], [26.009], [27.025], [28.025], [29.04], [30.024],
[31.024], [32.00833]]
In [7]:
# Фильтрация методом скользящего среднего
def avg(n,T=[]):
    Sum=0
    for i in range(n):
        Sum=Sum+T[i]
    return(Sum/n)
n=20
data_list_avg=[]
for i in range(Num_Str):
    data_list_avg.append([])
    for j in range(640-n):
        #print(data_list[i][j:(j+n):])
        da-
ta_list_avg[i].append(avg(n,T=data_list[i][j:(j+n):]))
```

In [8]:

```
#Строим термограммы
import matplotlib.pyplot as plt
X=[]
#fig = plt.subplots()
for i in range(len(data_list_avg[0])):
    #X.append(i*198/380)
    X.append(i)
fig = plt.figure()
fig.set_figwidth(10)
fig.set_figheight(5)
#help(ax.scatter)
for i in range(0,Num_Str,5):
    plt.plot(X, data_list_avg[i],marker='.')
plt.yticks(range(34, 43))
plt.xlabel('x, мм')
plt.ylabel('Температура, °C')
#plt.set(title="Термограмма")
plt.grid ( True )
plt.show()
```

*Находим максимумы температуры и значения времени достижения данных максимумов*

In [25]:

```
def T_dn(x1,T1,x2,T2,x1):
    Tn=T1+(T2-T1)/(x2-x1)*(x1-x1)
    return (Tn)

def MaximumT(x1,x2,T=data_list,time=time_list):

    MaxT_Time=[]
    ii=0
    jj=0
    MaxTT=0
    for i in range(0,Num_Str):
        MaxT=0
        MaxTime=0
        for j in range(x1,x2):
            LT=T_dn(x1,T[i][x1],x2,T[i][x2],j)
            #print(T[i][j]-LT)
            if (T[i][j]-LT)>MaxT:
```

```

        MaxT=(T[i][j]-LT)
        jj=j
        MaxT_Time.append(MaxT)
    if MaxT>MaxTT:
        MaxTT=MaxT
        ii=i
    MaxTime=time[ii][0]
    #print('-----')
    return ([MaxTT,MaxTime])

```

```

print(MaximumT(10,60,T=data_list,time=time_list))
print(MaximumT(120,160,T=data_list,time=time_list))
print(MaximumT(210,260,T=data_list,time=time_list))
print(MaximumT(330,380,T=data_list,time=time_list))
print(MaximumT(450,480,T=data_list,time=time_list))
print(MaximumT(540,590,T=data_list,time=time_list))
[0.89493728000000006, 18.011]
[0.39633369999999957, 3.03]
[4.207999099999995, 12.013]
[1.1357339999999994, 21.011]
[0.440000000000000483, 3.03]
[3.1557339000000013, 10.029]

```

*Формируем обучающую выборку*

In [12]:

```

X_train=[[4.514224400000003, 12.013],
[0.6088899999999953, 30.04],
[1.9995527666666675, 22.01],
[5.1097772833333295, 13.996],
[0.4933329999999998, 33.039],
[4.225532499999997, 16.355],
[1.1340034999999986, 28.327],
[1.9311127500000004, 24.353],
[5.114671999999999, 16.355],
[0.5653320999999991, 29.352]]

```

```

Y_train=[1.1, 3.1, 2.1, 1.1, 3.0, 1.1, 3.1, 2.1, 1.1,
3.0]

```

*Импортируем метод линейной регрессии*

In [14]:

```

from sklearn.linear_model import LinearRegression

```

In [15]:

```
lr = LinearRegression()
```

```
In [16]:
```

```
lr.fit(X_train, Y_train)
```

```
Out[16]:
```

```
LinearRegression
```

```
LinearRegression()
```

*Импортируем метрики качества линейной регрессии*

```
In [17]:
```

```
from sklearn.metrics import mean_squared_error,  
r2_score
```

*Проверяем модель регрессии на тестовой выборке*

```
In [18]:
```

```
X_test=[[0.8512046000000026, 14.371],  
[0.5426698999999999, 29.399],  
[4.112535199999996, 10.372],  
[1.3999939999999995, 12.356],  
[0.6311078666666674, 24.4],  
[3.1199984, 10.372],  
[1.1199950000000003, 22.01],  
[0.50666850000000035, 24.025],  
[4.457333999999996, 12.013],  
[1.2533349999999999, 19.995],  
[0.357334400000000627, 31.024],  
[3.3120010399999984, 11.013],  
[0.97333500000000058, 24.025],  
[0.6970001999999998, 31.024],  
[4.627206279999996, 11.013],  
[1.33333300000000032, 22.01],  
[3.440262439999998, 11.013],  
[0.89493728000000006, 18.011],  
[4.2079990999999995, 12.013],  
[1.1357339999999994, 21.011],  
[3.15573390000000013, 10.029]]  
Y_train=[2.3,3,1.3,2.3,3,1.2,2.3,3,1.3,2.3,3,1.2,2.3,  
3,1.3,2.3,1.2,2.3,1.3,2.3,1.2]  
pred_lr = lr.predict(X_test) # получение предсказаний  
print(pred_lr)  
y_test = pred_lr  
mse = mean_squared_error(Y_train, pred_lr)  
r2 = r2_score(pred_lr, pred_lr)
```

```

print("MSE = {}; R2 = {}".format(round(mse, 3),
round(r2, 3)))
[2.11416297      2.97206432      1.03841246      1.86387424
2.69047088 1.30298463
 2.43679447      2.70428632      1.03120121      2.29724859
3.10534068 1.28488879
 2.57989096      3.01479883      0.93430561      2.37992676
1.25069923 2.29038112
 1.09766432 2.3810365  1.27575526]
MSE = 0.042; R2 = 1.0

```

In [23]:

```

#print('R2:', lr.score(x,y))
print('slope:', lr.intercept_)
print('coefficient:', lr.coef_)
slope: 1.5993140687925538
coefficient: [-0.26656157  0.05161418]

```

In [24]:

```

#fig = plt.subplots()

fig = plt.figure()
fig.set_figwidth(7)
fig.set_figheight(4
                    )
#help(ax.scatter)
plt.scatter(Y_train, y_test, marker='*')
plt.plot(Y_train, Y_train, marker='+')
plt.ylabel('Предсказание, мм')
plt.xlabel('Глубина залегания дефекта, мм')
#plt.set(title="Термограмма")
plt.show()

```

In [21]:

```

mse = mean_squared_error(Y_train, pred_lr)
r2 = r2_score(Y_train, pred_lr)

```

In [22]:

```

print(mse, r2)
0.041508244421693714 0.9140926610194906

```

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ .....	5
1.1. ХАРАКТЕРИСТИКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ .....	5
1.2. МЕТОДЫ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ .....	6
1.2.1. Применение роботов-манипуляторов для автоматизации теплового контроля изделий .....	10
1.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РОБОТИЗИРОВАННОГО АКУСТИЧЕ- СКОГО КОНТРОЛЯ .....	20
1.3.1. Характеристики акустических методов .....	20
1.3.2. Электроакустические преобразователи .....	22
1.3.3. Классификация методов ультразвукового контроля .....	24
1.3.4. Преимущества и недостатки АК по сравнению с другими методами .....	32
1.4. МАГНИТНЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ .....	36
1.4.1. Основные сведения .....	36
1.4.2. Классификация методов магнитного контроля .....	38
1.4.3. Магнитопорошковый метод контроля .....	39
1.4.4. Феррозондовый метод контроля .....	41
1.4.5. Магниторезисторный метод и метод, основанный на использовании эффекта Холла .....	42
1.5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ (ВИХРЕТОКОВЫЙ) МЕТОД КОНТРОЛЯ	43
Контрольные вопросы .....	45
2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИСПЫТАНИЙ .....	47
2.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ВИБРАЦИОННЫХ ИСПЫТАНИЙ .....	47
2.1.1. Виброиспытательные системы .....	48
2.1.2. Электродинамические вибровозбудители [15] .....	48
2.1.3. Механические вибровозбудители [15] .....	50
2.1.5. Вибрационные испытательные стенды .....	56
Контрольные вопросы .....	64
3. СЕНСОРЫ ДЛЯ РОБОТИЗИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ ТРУБО- ПРОВОДОВ [21] .....	66
Контрольные вопросы .....	70
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	71
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	72
ПРИЛОЖЕНИЕ. Программа для анализа данных и построения регрессионной модели глубины залегания дефектов в композиционных материалах с приме- нением термографического метода .....	74



Учебное электронное издание

ДИВИН Александр Георгиевич  
БАЛАБАНОВ Павел Владимирович  
ЛЮБИМОВА Дарья Александровна

**ИНФОРМАЦИОННО-СЕНСОРНЫЕ СИСТЕМЫ  
МЕХАТРОНИКИ И РОБОТИЗИРОВАННЫЕ  
КОМПЛЕКСЫ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ  
КОНТРОЛЕ КАЧЕСТВА**

В двух частях

Часть 2

Учебное пособие

Редактирование Е. С. Мордасовой  
Графический и мультимедийный дизайнер Н. И. Кужильная  
Обложка, упаковка, тиражирование Е. С. Мордасовой

**ISBN 978-5-8265-2678-1**



Подписано к использованию 15.11.2022.

Тираж 50 экз. Заказ № 148

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»  
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14

Тел. 8(4752) 63-81-08

E-mail: [izdatelstvo@tstu.ru](mailto:izdatelstvo@tstu.ru)