

УДК 629.12.066–52

В.В. Кирюха

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

КОНТРОЛЬ И ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАГНИТОУПРУГИХ И ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

Рассматриваются вопросы контроля деформаций, возникающих в конструкциях, испытывающих значительные силовые воздействия (строительные конструкции, элементы корпуса судна). Контроль производится с помощью датчиков с использованием магнитоупругих и тензорезисторных преобразователей. Предлагаются конструкции датчиков, позволяющие с достаточно высокой точностью оценивать влияние этого явления на прочность сооружений. Дается оценка эффективности использования датчиков в конкретных системах на основе лабораторных модельных исследований.

Ключевые слова: деформация, сила, воздействие, датчик, тензорезистор, магнитоупругий преобразователь.

V.V. Kiryuha

MONITORING AND MEASURING DEFORMATION AND STRAIN USE MAGNETOELASTIC CONVERTERS

The article deals with the control of deformations occurring in structures experiencing significant force (building construction, hull elements). Control is done with the help of sensors using magneto and strain gauge transducers. Available sensor design, enabling a high accuracy to assess the impact of this phenomenon on the strength of structures. The evaluation of the effectiveness of the use of sensors in specific systems based on laboratory model studies.

Key words: deformation, strength, impact sensor, gage, magnetoelastic transducer.

При модельных испытаниях и эксплуатации конструкций, испытывающих значительные деформирующие воздействия (строительные конструкции, мосты, элементы корпуса судна), представляют интерес вопросы контроля и измерения деформации с помощью измерительных преобразователей. Целью настоящей работы является анализ использования для цепей контроля магнитоупругих и тензорезистивных преобразователей и выработка рекомендаций по оптимальному построению датчиков на основе таких преобразователей.

Работа магнитоупругого преобразователя основана на магнитоупругом эффекте. Магнитоупругий эффект заключается в изменении магнитной индукции в ферромагнитных материалах при воздействии на них внешней силой. Если на намагниченный образец ферромагнитного тела воздействовать механической силой, то тело деформируется, и индукция в материале изменяется. Явление имеет упругий характер. Если прекратить внешнее силовое воздействие, то индукция примет прежнее значение. Поскольку магнитная проницаемость вещества определяется по формуле

$$\mu_{\alpha} = \mu_2 \cdot \mu_0 = \frac{B}{H}, \quad (1)$$

то при заданной напряженности поля H изменение индукции B эквивалентно изменению магнитной проницаемости.

Это свойство ферромагнитных тел применяется для преобразования механической силы в электрическую величину.

На основе магнитоупругого эффекта построены магнитоупругие преобразователи. Схематично возможные конструкции таких преобразователей показаны на рис. 1.

На рис. 1, б показана схематическая конструкция трансформаторного магнитоупругого преобразователя. При воздействии силы F вследствие изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктивность между обмотками, что приводит к изменению ЭДС вторичной обмотки. Изменение магнитной проницаемости при воздействии внешней силы носит нелинейный характер. Однако при небольших механических напряжениях можно считать, что относительное изменение магнитной проницаемости пропорционально внешнему воздействию:

$$\eta = \frac{\Delta\mu}{\mu_{2ном}} = S_\mu \cdot \tau, \quad (2)$$

где $\Delta\mu = \mu_2 - \mu_{2ном}$, μ_2 – значение магнитной проницаемости при внешней вынуждающей силе σ , $\mu_{2ном}$ – номинальная магнитная проницаемость при механическом напряжении $\sigma = 0$ (при отсутствии внешнего воздействия); σ – механическое напряжение (соответствует внешней силе); S_μ – чувствительность материала.

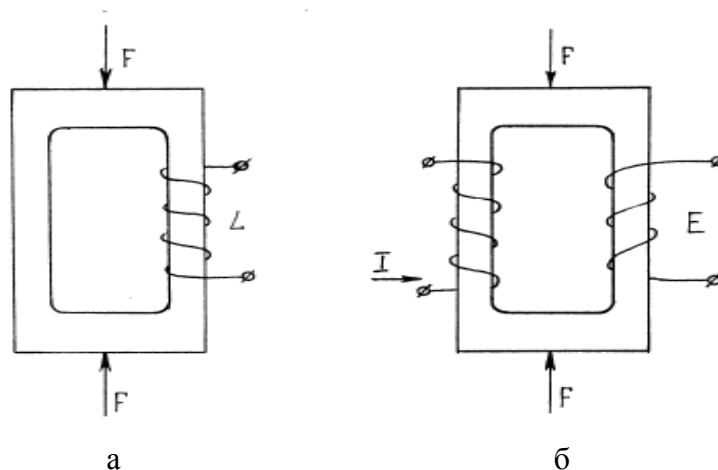


Рис. 1. Магнитоупругие преобразователи: а – простой; б – трансформаторный
 Fig. 1. Magnetoelastic Converters: a – simple; б – transformer

Магнитная проницаемость $\mu_{2ном}$ зависит от напряженности поля H . Для увеличения $\Delta\mu$ магнитоупругие преобразователи используются при таких значениях напряженности поля, при каких значение $\mu_{2ном}$ максимально.

Для использования в магнитоупругих преобразователях используются материалы и сплавы, имеющие большое значение чувствительности S_μ . Наибольшую чувствительность имеют железоникелевые сплавы, меньшую – железокобальтовые и кремниевые стали. Чувствительность наиболее часто применяемых материалов лежит в пределах $(8 \div 1) \cdot 10^{-9}$ м²/Н. Для увеличения чувствительности магнитоупругих датчиков их магнитопроводы изготавливаются из цельного материала без воздушных зазоров, так как воздушные зазоры резко увеличивают полное магнитное сопротивление сердечника и уменьшают чувствительность преобразователя.

Магнитоупругие преобразователи наиболее целесообразно включать в мостовые измерительные цепи для снижения погрешностей. В плечо, смежное с измерительным преобразователем, включается такой же преобразователь для компенсации аддитивных погрешностей.

Функция преобразования магнитоупругих преобразователей нелинейная. Для уменьшения нелинейности применяют магнитоанизотропные материалы, имеющие различную магнитную проницаемость в различных направлениях. Такие материалы получают в результате специальной технологической обработки –ковки, протяжки, прокатки. Применение этих мер позволяет уменьшить погрешность от нелинейности до 1,5–2 %.

Магнитоупругие преобразователи имеют функцию преобразования, схожую с петлей гистерезиса, т.е. функция преобразования при увеличении нагрузки отличается от функции преобразования при снижении нагрузки. Для уменьшения этой погрешности применяют материалы с малой петлей магнитного гистерезиса. Погрешность, обусловленная гистерезисом, уменьшается после «тренировки» преобразователя. Тренировка производится многократным (до 10 раз и более) нагружением преобразователя силой, соответствующей пределу изменения преобразователя.

Магнитоупругим преобразователям свойственно старение. При этом изменяется и магнитная проницаемость и внутреннее напряжение в материале преобразователя. Старение приводит к изменению электрических параметров и к снижению чувствительности преобразователя. Изменение характеристик замедляется после естественного (в течение нескольких месяцев) или ускоренного искусственного старения. Характеристики также стабилизируются после термической обработки магнитопровода.

Погрешность, вызванную изменением параметров, можно уменьшить применением дифференциальных схем включения. Таким образом, погрешность, обусловленную старением, можно уменьшить до величины в 0,5 %.

Работа тензорезисторных преобразователей основана на свойстве проводников изменять свое сопротивление при деформации сжатия-растяжения.

Тензорезистивными свойствами обладают все проводники. Практическое применение находят только те элементы и материалы, у которых это свойство выражено достаточно сильно. Наиболее часто применяются константановые тензорезисторы и полупроводниковые тензорезисторы на основе монокристаллов кремния или германия.

Тензорезисторы выполняются в виде пленок или тонких пластинок, содержащих тензорезистивный элемент. Внешний вид тензорезистора показан на рис. 2.

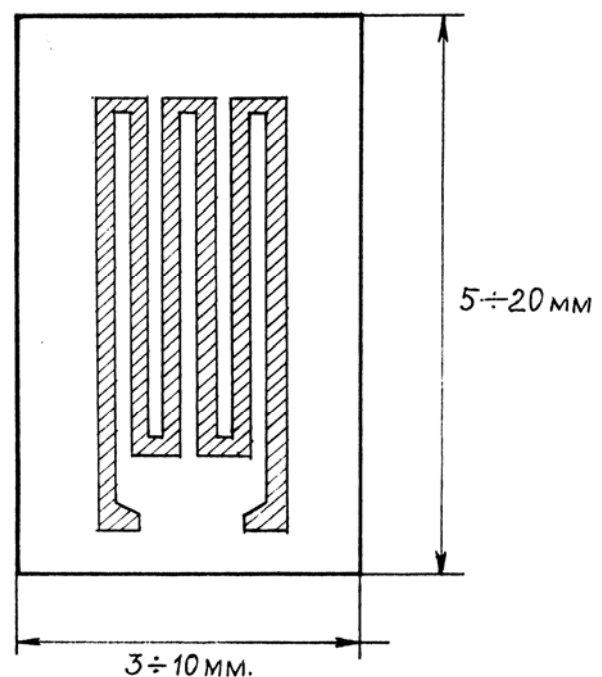


Рис. 2. Тензорезистор
Fig. 2. GAUGE This gauge

Толщина элементов решетки тензорезистора составляет от 4–5 мкм у пленочных до 20–50 мкм у проволочных тензопреобразователей. Полупроводниковые тензорезисторы имеют толщину 0,2–0,8 мм.

Зависимость сопротивления тензорезистора от величины внешней деформирующей силы описывается уравнением

$$R = R_o (1 + S_m \cdot k), \quad (3)$$

где R_o – сопротивление тензорезистора при отсутствии деформирующей силы; k – величина деформирующей силы; S_m – тензочувствительность материала тензорезистора.

Тензочувствительность различных материалов, применяемых для изготовления тензорезисторов, отличается в широких пределах. Тензочувствительность константана 2,0–2,1. Тензочувствительность германия 80,0–120,0. Однако у полупроводниковых тензоэлементов чувствительность сильно зависит от температуры.

Тензорезисторы выпускаются сопротивлением в десятки и сотни ом. В схему тензорезисторы включаются подобно другим резистивным элементам-датчикам. Наиболее удобно применять схему неравновесного моста. Принципиальная схема такого включения тензорезисторов показана на рис. 3.

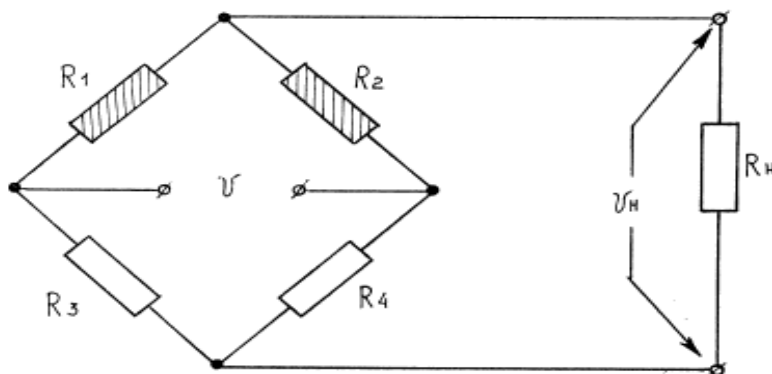


Рис. 3. Схема включения тензорезисторных преобразователей
Fig. 3. The scheme of inclusion of strain gauge transducers

При режимах, близких к холостому ходу (когда сопротивление нагрузки значительно превышает значение сопротивлений плеч моста), выходное напряжение может быть определено по формуле

$$U_H = \frac{UR_1}{R_1 + R_2} - \frac{UR_3}{R_3 + R_4} = U \left[\frac{R_1 R_4 - R_2 R_3}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \right], \quad (4)$$

где R_1 и R_2 – сопротивление включенных тензорезисторов; R_3 и R_4 – сопротивление балластных резисторов моста.

При воздействии деформирующих сил сопротивление тензорезисторов R_1 и R_2 изменяется и выходное напряжение моста определяется формулой

$$U_H = \frac{U}{2} \cdot \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Мостовая цепь является дифференциальной, поэтому в ней компенсируются аддитивные погрешности.

Тензорезистивные преобразователи применяются для измерения механических деформаций деталей и конструкций. Как правило, они приклеиваются к этим деталям и испытывают деформирующие усилия, такие же, как и сами детали. Кроме того, тензорезисторные преобразователи применяются для измерения механических величин, таких, как сила, давление, ускорение, при которых деформация является промежуточной величиной преобразования.

Недостатком тензорезисторных преобразователей является большой разброс параметров и характеристик, зависимость характеристик от внешних воздействий (температура, давление).

Растягивающее и сжимающее напряжение определяется как сила, действующая на единицу площади поперечного сечения материала, которая приводит к увеличению или уменьшению длины. Деформация определяется как изменение длины на единицу длины. Единицей изменения напряжения является паскаль (Па), а деформация не имеет размерности. Обычно делаются измерения деформации, а напряжение выводится из них.

В качестве чувствительного элемента можно с успехом использовать тензорезистор.

Тензорезистор приклеивается к поверхности испытываемого материала так, что при деформации его поверхности тензодатчик подвергается той же деформации. Эта деформация приводит к изменению сопротивления δR тензодатчика:

$$\frac{\delta R}{R} = G \times \text{деформация}, \quad (6)$$

где R – начальное сопротивление тензорезистора; G – постоянная величина для данного датчика, называемая тензометрическим коэффициентом.

Для большинства металлических проволочек или фольги, используемых для изготовления тензорезисторов, этот коэффициент примерно равен 2. Он определяется производителем тензорезисторов по калибровке, проведенной на партии тензорезисторов. Такая калибровка может включать наклейку тензорезисторов на испытываемый образец, подвергаемый растяжению, с определением деформации с помощью экстензометра. Другой метод заключается в использовании четырехточечного изгиба балки, к которой приклеены тензометры. При этом определяется радиус кривизны R балки по измерениям ее прогиба в средней точке и расстоянию y от тензорезистора до нейтральной оси балки. Важно при этом учесть толщину подложки тензорезистора и клеевого слоя. Тогда

$$\text{Деформация} = \frac{y}{R}. \quad (7)$$

Изменения температуры могут создать такие же измерения сопротивления тензорезистора, что и деформация. Эффекты влияния температуры можно компенсировать применением холостого датчика, который представляет собой этот тензорезистор, смонтированный на таком же материале и который не подвергается деформации, а просто расположен вблизи активного тензорезистора так, что на него действуют те же температурные изменения. Активный и холостой датчики включены в соседние плечи моста Уитстона. Таким образом, компенсируются эффекты температурных изменений.

Для некоторых материалов возможна температурная самокомпенсация. Материал датчика выбирается так, чтобы изменения его сопротивления с температурой компенсировали эффекты термического расширения материала, на котором этот датчик смонтирован.

Датчики деформации измеряют деформацию в направлении длины проволочного или фольгового элемента датчика. Если существуют одноосные напряжения, тензорезистор располагают вдоль этих осей.

Тогда

$$\text{Напряжение} = E \times \text{деформация}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости материала, к которому прикреплен датчик.

Однако тензорезистор, расположенный на поверхности под прямым углом к этим одноосным напряжениям, также показал бы деформацию вопреки, казалось бы, отсутствию напряжений в этом направлении, величина которой была бы равна:

$$\text{Поперечная деформация} = -\nu \times \text{продольная деформация}, \quad (9)$$

где ν – коэффициент Пуассона.

Если напряжение на поверхности является двухосным, действуют главные напряжения одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В этом случае требуется установка двух тензорезисторов под прямым углом друг к другу и ориентированных по направлениям главных напряжений:

$$\text{Напряжение в направлении } x = \frac{E(\varepsilon_x + \nu\varepsilon_y)}{1 - \nu^2}. \quad (10)$$

$$\text{Напряжение в направлении } y = \frac{E(\varepsilon_y + \nu\varepsilon_x)}{1 - \nu^2}, \quad (11)$$

где ε_x – деформация в направлении x ; ε_y – деформация в направлении y ; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона.

Если направления главных напряжений неизвестны, необходимо использовать три тензорезистора, расположенных розеткой (рис. 4). Если датчики ориентированы под углом 45° и 90° друг к другу, то главные деформации ε_x и ε_y связаны с деформациями ε_1 , ε_2 , ε_3 , измеряемыми тремя датчиками как:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2\theta, \quad (12)$$

где θ – угол между направлениями ε_1 и ε_y .

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 45^\circ). \quad (13)$$

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 90^\circ). \quad (14)$$

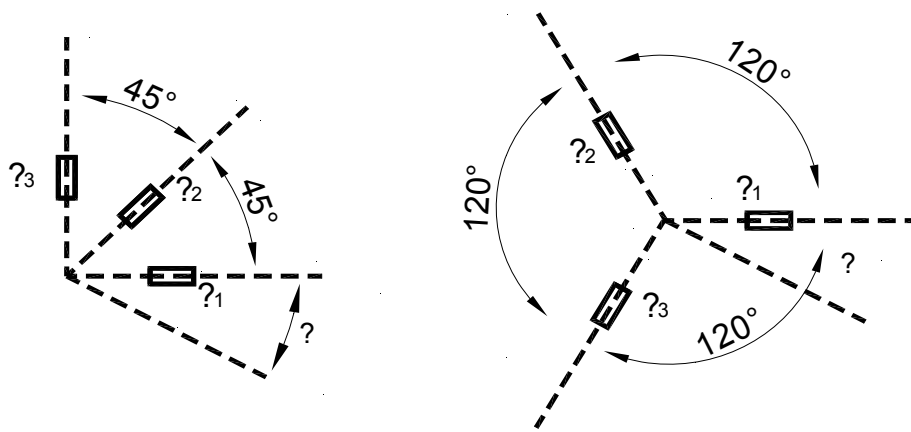


Рис. 4. Розетки расположения датчиков деформации
Fig. 4. The location of the strain gauges Sockets

Если углы между датчиками составляют 120° , то

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2\theta. \quad (15)$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 120^\circ). \quad (16)$$

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 240^\circ). \quad (17)$$

Главные напряжения могут быть потом рассчитаны по этим главным деформациям и уравнениям, приведенным ранее.

Иногда целесообразно использовать параллелограммные упругие элементы с тензодатчиками. Такие измерительные элементы используются в высокочувствительной технике. Датчик давления на параллелограммных упругих элементах показан на рис. 5.

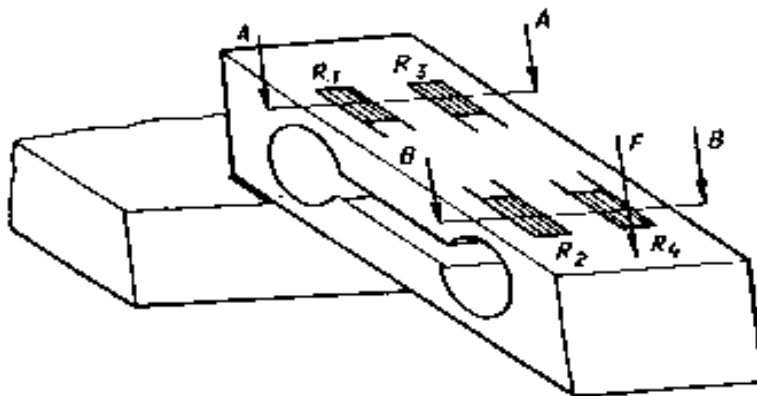


Рис. 5. Датчик давления на параллелограммных упругих элементах
Fig. 5. The pressure sensor on parallelogram elastic elements

При действии силы F в ослабленных сечениях А–А и В–В появляются упругие деформации: в сечении А–А – деформация растяжения, в сечении В–В – сжатия. Деформация упругого элемента с помощью тензорезисторов преобразуется в электрический сигнал. Тензорезисторы $R_1 - R_4$ включаются в мостовую цепь. Применение четырех наклеенных на один упругий чувствительный элемент тензорезисторов увеличивает чувствительность моста и уменьшает температурную погрешность прибора. Достоинством параллелограмного упругого элемента является его хорошая защищенность от поперечных сил, внецентренного приложения силы, изгибающих и вращающих моментов.

Если необходимо измерять и контролировать крутящий момент вала, то непосредственное измерение напряжений в материале можно проводить также с помощью тензорезисторов. Тензорезисторы наклеивают на вал. Крутящий момент выражается через измерение напряжения, как

$$M_{кр} = \tau \times W_p, \quad (18)$$

где τ – измеренное напряжение; $W_p = \frac{\pi r^3}{2}$ – полярный момент сопротивления сплошного круглого вала.

Для измерения больших крутящих моментов (при τ до 3×10^7 Па) целесообразно использовать магнитоупругие датчики с магнитным снятием информационного сигнала.

Список литературы

Кирюха, В.В. Анализ преобразователей неэлектрических величин и рекомендации по их использованию в судовых автоматических системах / В.В. Кирюха, Ю.М. Горбенко, В.С. Яблокова // Науч. тр. Дальрыбвтуза. – Владивосток: Дальрыбвтуз, 2015. – Т. 34. – С. 69–74.

Сведение об авторе: Кирюха Владимир Витальевич, доцент; e-mail: vkiryuha@list.ru.