

[Назад к списку](#)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

(19) (11)
RU
(51) МПК
G01L3/10 (2006.01)

2269104 (13) C2

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: по данным на 12.01.2011 - действует

(21), (22) Заявка: 2004103445/28, 05.02.2004

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
05.02.2004

(43) Дата публикации заявки: 10.07.2005

(45) Опубликовано: 27.01.2006

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: Коверкин Ю.Б., Губанов Н.Н. Некоторые замечания по эффекту Ж.Видемана.5-я международная конференция по проблемам физической метрологии. СПб.: ГПУ, 2002, с.28-29. Коверкин Ю.Б., Проурзин В.А., Снарский А.В. Бесконтактный метод измерения деформации кручения вала на основе обратного эффекта Ж.Видемана. Труды пятой сессии международной научной школы.

Адрес для переписки:
199178, Санкт-Петербург, Большой пр., В.О., 61,
Институт проблем машиноведения РАН

(72) Автор(ы):

Ефремов Леонид Владимирович (RU),
Коверкин Юрий Борисович (RU),
Губанов Николай Николаевич (RU),
Юдин Юрий Васильевич (RU),
Чиков Константин Никитович (RU)

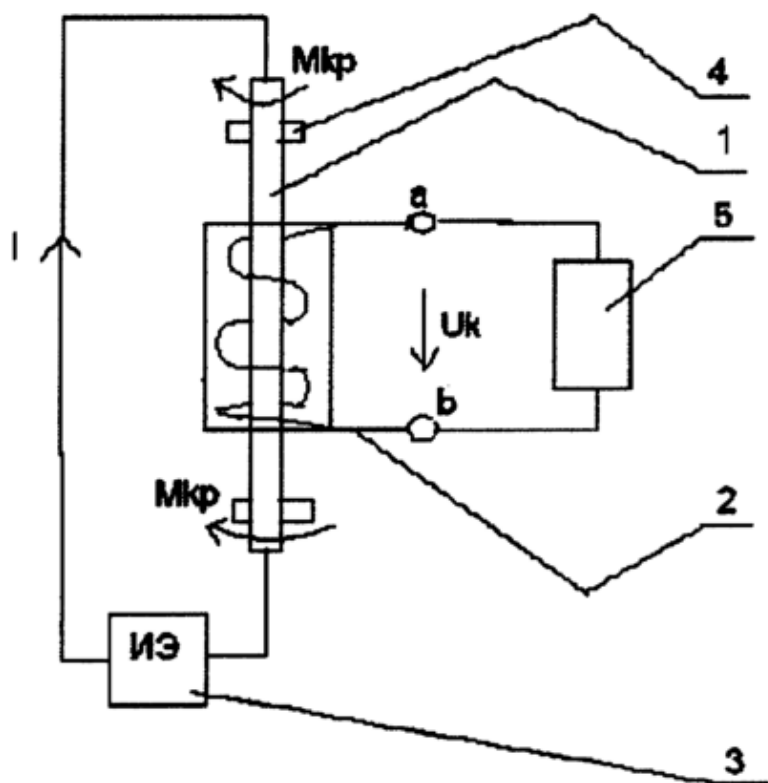
(73) Патент ообладатель(и):

Институт проблем машиностроения Российской академии наук (RU)

(54) УСТРОЙСТВО ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ, ПРОПОРЦИОНАЛЬНОГО КРУТЯЩЕМУ МОМЕНТУ ВАЛА

(57) Реферат:

Изобретение относится к измерительной технике и может быть использовано для измерения деформации валов. Устройство содержит измерительную катушку индуктивности, установленную параллельно оси испытываемого вала, и источник переменного тока, снабженный токопроводящими пластинами для подключения его к испытываемому валу в момент измерения. Технический результат заключается в расширении функциональных возможностей, повышении точности определения напряжений и обеспечении бесконтактного определения напряжений. 1 табл., 2 ил.



Фиг. 1

(56) (продолжение):

CLASS="b560m"(Фридлендорговские чтения). СПб., 2002, с.336-342. Жуков С.В., Капица Н.Н. Исследования параметров полей механических напряжений в металлических конструкциях приборами "Комплекс-2". Сб. научных трудов, академия транспорта, Отд, "Спец-проблемы транспорта", 1999, с.214-223. Туричин А.М., Новицкий В.П. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. Л.: Энергия, 1975, 575 с. Фурманов Е.Ф. Теплостойкий измерительный преобразователь давления агрессивных жидкостей. Известия ВУЗов Приборостроения. 1970, т.13, №7, с.88-91. Лукьянц В.А. Физические эффекты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993, 203 с. Берг Ю. Справочное пособие по магнитным явлениям. М.: Энергоатомиздат, 1991.

Изобретение относится к измерительной технике, а именно к классу электромагнитных измерителей крутящего момента, приложенного к валу, механических напряжений, и может быть использовано для бесконтактного (дистанционного) измерения деформаций (концентрации напряжений) валов, которые возникают в металле в результате приложения к валу крутящего момента.

Известен способ бесконтактного измерения концентрации напряжений (КН), возникающих в работающих конструкциях, на основе использования которого широко применяют приборы, разработанные НПО "Энергодиагностика". В основе измерений, выполняемых этим способом, лежит использование эффекта магнитной памяти металлов (МГМ), которая фактически отражает действие механических нагрузок (Индикатор концентраций напряжений "ИКН-1М"),

Основная задача при использовании МГМ - диагностика наиболее опасных участков изделий, характеризующихся зонами КН. Выявление зон КН не требует специальных намагничивающих устройств, так как используется естественное намагничивание изделий в процессе эксплуатации. По анализу естественной намагниченности на поверхности материала определяются зоны, характеризующиеся нулевым значением нормальной составляющей магнитного поля. Обычно концентрация напряжений соответствует месту с нулевым значением напряженности магнитного поля. Имеется экспериментальное и теоретическое подтверждение геометрического совпадения линии КН и нулевого значения напряженности магнитного поля.

Высокие значения погрешностей, получаемые при использовании МГМ (~5%), обусловлены следующими причинами: слабая изученность физических явлений, лежащих в основе намагничивания верхнего слоя металла (~0,2 мм), который к тому же находится в напряженном состоянии из-за остаточных факторов его обработки; магнитомеханический гистерезис; необходимость поиска минимальной величины напряженности нормальной составляющей магнитного поля, которой соответствует максимальное механическое напряжение.

Для исследования механических напряжений применяют известные приборы серии "Комплекс-2.05", которые относятся к классу электромагнитных измерителей напряжений. Принцип их действия основан на способности ферромагнитных материалов изменять магнитное состояние

под влиянием механических напряжений. Магнитоанизотропные преобразователи, с которыми работают приборы серии "Комплекс-2", используют анизотропию материалов, которые намагничивают внешним полем. (Гурова Г.Г., Жуков В.С. и др. Магнитоанизотропный сканер - дефектоскоп "Комплекс - 2.05" для обнаружения в нефти", газопроводах и стенках стальных резервуаров стресскоррозионных трещин и других дефектов. "КГБ бетона и железобетона" ФГУП Институт "ДИМЕНС тест", 1992 г.). При напряжении намагниченного материала внешней силой осуществляется изменение магнитной индукции, создаваемой в месте расположения измерительной катушки индуктивности (ИКИ), напряжение на зажимах ИКИ определяется по уравнению

$$U = K \frac{W_2}{W_1} B_2 S_2 f_1 \sin \beta, \quad (1)$$

где K - коэффициент пропорциональности, W_1 и W_2 - число витков измерительных катушек индуктивности, B_2 - среднее значение индукции в месте расположения ИКИ катушки, S_2 - площадь, охватываемая обмоткой, f_1 - частота питающего катушку 1 напряжения, β - угол между плоскостью (нормали) измерительной катушки индуктивности и вектором магнитной индукции B_2 , которая изменяется при нагрузке вала внешней силой.

Приборы серии "Комплекс-2", реализующие способ электромагнитного измерения напряжений, для повышения точности требуют учета зависимости свойств преобразователя от магнитомеханической петли гистерезиса. Для этой цели приборы серии "Комплекс-2" программируются с учетом марки диагностируемой стали и других ее свойств, связанных с ориентацией кристаллов материала.

Известен способ измерения крутящего момента, приложенного к валу, на основе эффекта Ж.Видемана (Турчин А.М., Новицкий В.П. и др. Электрические измерения неэлектрических величин. "Энергия". Ленинград, 1975, 575 с. (стр.322-323); Фурманов Е.Ф. Теплостойкий измерительный преобразователь давления агрессивных жидкостей. "Известия ВУЗов Приборостроения", 1970, т.13, №7, с.88-91). Действующее значение э.д.с., возникающей под воздействием крутящего момента, который приложен к валу, определяется приближенной формулой

$$E = 4,44 B_m f \frac{\lambda_3 \mu}{B_s S^2} \sigma \frac{\ell}{\pi R^2} M_{кр}, \quad (2)$$

$$\frac{\pi B_s^2 R^2}{24 \lambda_3 \mu M_{кр}} \gg 1,$$

действительной при условии

где B_m - индукция магнитного поля, создаваемая током, проходящим через вал при отсутствии $M_{кр}$, f - частота напряжения питания; μ , B_s , λ_3 - магнитная проницаемость, индукция насыщения, максимальная магнитострикция материала стержня; R , ℓ - длина и радиус стержня, $M_{кр}$ - крутящий момент, приложенный к валу.

В других литературных источниках (Лукьянц В.А. Физические эффекты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993, 203 с.; Берг Ю. Справочное пособие по магнитным явлениям. М.: Энергоатомиздат, 1991) при изложении этого способа приводится действующее значение индуцируемой э.д.с. в виде

$$E = 4,44 B_m f \frac{\lambda_3 \mu}{B_s^2} \sigma \frac{\ell}{\pi R^2} M_{кр}. \quad (3)$$

В выражениях (2) и (3) σ - предел прочности материала вала.

Несовпадение размерностей правой и левой частей выражений (2) и (3) из-за наличия параметра, определяющего предел прочности материала вала (σ), потребовал дополнительных исследований по уточнению этих выражений.

Уточнение выражений (2) и (3) выполнено авторами в работах (Коверкин Ю.Б., Губанов Н.Н. Некоторые замечания по эффекту Видемана. 5-я Международная конференция по проблемам физической метрологии. СПб ГПУ, 2002, с.28-29; Коверкин Ю.Б., Проурзин В.А., Снарский А.В. Бесконтактный метод измерения деформаций кручения вала на основе обратного эффекта Ж.Видемана. Труды пятой сессии Международной научной школы (Фриддендоровские чтения). СПб, 2002, с.336-342).

Решение использования эффекта Ж.Видемана для измерения крутящих моментов валов привело авторов к уточнению приближенных выражений (2) и (3) и к записи их в виде

$$E_2 = 4,44B_m f \frac{\lambda_3 \mu}{B_s^2} \sigma \frac{\ell}{\pi R^2} M_{кр}, \quad (4, a)$$

где w - число витков измерительной катушки индуктивности.

Коэффициент, отражающий предел прочности материала стержня, исключен, так как в этом случае размерности правой и левой частей выражения (4.а) совпадут.

Авторами выполнено уточнение теоретической зависимости э.д.с., наведенной в катушке индуктивности, когда к валу приложен крутящий момент, а по валу пропущен ток $i = I_m \cos \omega t$. Согласно этой работе э.д.с. имеет вид

$$\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt} = \omega w B_m S_k \sin J \sin \omega t,$$

где J - угол между нормалью к площади витков катушки и вектором индукции, Ψ - потокосцепление, пронизывающее витки измерительной катушки.

Отсюда действующее значение

$$E_1 = 4,44 f B_m S_k \sin J \quad (4, б)$$

Нормаль к площади витков ИКИ направляют параллельно оси вала, поэтому $J = \pi/2$ и, следовательно, действующее значение э.д.с. максимально.

Как будет показано ниже, выражение (4,а) при $M_{кр} = 0$ обеспечивает минимальное значение э.д.с., а поэтому именно оно выбрано за исходное (прототип). Учитывая вращение (преломление) вектора индукции за счет действия приложенного к валу момента, следует объединить выражения (4,а) и (4,б) в обобщенную комплексную форму, что будет выполнено ниже.

В соответствии с выражением (4,а,б) э.д.с. в ИКИ возрастает пропорционально крутящему моменту. Это свойство позволяет определять или диагностировать наиболее напряженные участки валов, когда к ним приложен крутящий момент.

Устройство, выбранное за прототип (фиг.1), приведено в работе авторов (Коверкин Ю.Б., Губанов Н.Н. Некоторые замечания по эффекту Видемана. 5-я Международная конференция по проблемам физической метрологии. СПб ГПУ, 2002, с.28-29; Коверкин Ю.Б., Проурзин В.А., Снарский А.В. Бесконтактный метод измерения деформаций кручения вала на основе обратного эффекта Ж.Видемана. Труды пятой сессии Международной научной школы (Фридендоровские чтения). СПб, 2002, с.336-342).

Принцип действия устройства заключается в преобразовании измеряемого крутящего момента $M_{кр}$, приложенного к валу 1, в э.д.с. (напряжение), индуцируемой измерительной катушкой индуктивности 2. От источника энергии 3 через вал 1 пропускают переменный электрический ток, который создает вокруг вала магнитное поле с индукцией B_m . Измерительную катушку индуктивности 2 располагают на валу, нормаль к площади витка которой направляют параллельно оси вала (см. фиг. 1). Если к валу не приложен крутящий момент ($M_{кр} = 0$), то согласно выражения (4,а) наведенная в индуктивной катушке э.д.с. имеет минимальное значение. Когда к валу прикладывают крутящий момент ($M_{кр} > 0$), который поворачивает вектор индукции магнитного поля, то он создает в ИКИ пропорциональную крутящему моменту э.д.с., которую измеряют вольтметром 5. Это напряжение возникает на зажимах а, б, вольтметра.

Рассмотрим прототип устройства, реализующего эффект Ж.Видемана, с целью анализа его общих свойств.

Известно, что в основе эффекта лежит поворот (преломление) вектора индукции магнитного поля, которое создает протекающий по валу ток $i = I_m \cos \omega t$, где I_m , ω - амплитуда и круговая частота. Приложенный к валу 1 крутящий момент $M_{кр}$ осуществляет преломление вектора индукции на некоторый угол, поэтому в ИКИ 2 индуцируется напряжение u_k . Известно, что напряжение, измеряемое прибором 5 с высоким внутренним сопротивлением, имеет значение:

$$u_k = -\varepsilon = - \frac{d\psi}{dt}. \quad (5)$$

Запишем энергию, запасенную в магнитном поле вала при изменении потокосцепления Ψ_0 от 0 до Ψ_b в виде

$$W_{эм} = \int^{\psi_b} i d\psi.$$

В соответствии с законом полного тока $i=N_1$, где $\psi_b = 2\pi R$, а $d\psi_b = S'dB$. Здесь $S'=Ri$ и $dB=\mu dH$.

Принимая магнитную проницаемость μ постоянной во всем объеме вала, запишем энергию

$$W_{эм} = \int_0^{B_s} \mu H dH = \pi R^2 \ell H_s B_s = V H_s B_s,$$

где $B_s = \mu H_s$ - индукция насыщения вала.

$$\psi = \frac{\pi}{2} - J,$$

Учитывая, что нормаль к площади витков ИКИ образует с вектором индукции угол J , где J - угол поворота вектора индукции, который при $M_{кр}=0$ имеет значение $J=0$, потокосцепление можно представить:

$$\psi_b = \omega S_k B_m \cos \psi \quad (6)$$

$$B_m = \mu \frac{I_m}{2\pi R}$$

где I_m - индукция, создаваемая на поверхности вала, протекающим по нему током i , S_k - эффективная площадь измерительной катушки индуктивности.

При преломлении вектора индукции на угол J сила, создающая крутящий момент, совершает работу $W_{мех} = JM_{кр}$.

Подставляя выражение (6) в (5) и переходя к комплексной форме, имеем

$$\underline{\varepsilon} = j\omega \omega B_m S_k e^{i\psi} e^{i(\omega t + \pi/2)}. \quad (7)$$

В соответствии с законом Гука для кручения определим угол вращения вектора индукции

$$\operatorname{tg} \psi = J \frac{\omega_{мех}}{\omega_{эм}} \frac{\sin J}{1 - \cos J}, \quad (8)$$

где $\omega_{мех} = \frac{M_{кр}}{\pi R^2 \ell}$, $W_{эм} = \mu H_s^2$ - плотность энергии,

$$M_{кр} = W_{мех}/J.$$

Учитывая среднее расположение витка измерительной катушки индуктивности 2, из выражения (7) запишем наводимую в ней э.д.с.

$$\varepsilon_2 = u_k = \omega \omega B_m S_k \cos \psi \sin(\omega t + \psi),$$

$$B_{mk} = \mu \frac{I_m}{2\pi R_k}$$

где I_m - индукция магнитного поля в месте расположения ИКИ на расстоянии R_k от оси вала.

Следовательно, действующее значение э.д.с. принимает вид

$$E = 4,44 f B_{mk} S_k \omega \frac{\lambda \ell}{\pi R^3 \ell \mu H_s^2} M_{кр} \frac{\sin J}{1 - \cos J},$$

который при $J = \pi/2$ совпадает с выражением (4,а). Действительно запишем его в виде

$$E = 4,44 f B_{mk} S_k \omega \frac{\lambda \ell \mu M_{кр}}{\pi R^2 \mu B_s^2 S'} \frac{\sin J}{1 - \cos J}, \quad (9)$$

где S_k - эффективная площадь ИКИ. Здесь принято $J = \Delta l / R$, а $\lambda = \Delta l / l = \lambda_3 \operatorname{tg} J$,

λ_3 - максимальная магнитострикция ферромагнитного материала вала.

Устройство, выбранное за прототип, имеет следующие недостатки:

- требуется настройка прибора при замене исследуемого вала;
- устройство реализует контактное измерение крутящего момента, так как измерительная катушка индуктивности располагается на исследуемом валу;
- внутренний диаметр измерительной катушки индуктивности должен быть согласован с

диаметром исследуемого вала.

Задачей изобретения является расширение функциональных возможностей и улучшения точности, обеспечение устройством бесконтактного (дистанционного) определения напряжения, пропорционального крутящему моменту вала, изготовленного из ферромагнитных материалов.

Поставленная задача достигается тем, что в устройстве, содержащем ИКИ, соединенную с измерительным прибором, источник переменного тока снабжен токопроводящими пластинами с возможностью подключения к исследуемому валу в момент определения напряжения, пропорционального крутящему моменту. ИКИ в момент измерения установки параллельно оси вала. При этом напряжение, регистрируемое измерительным прибором 2, пропорционально измеряемому крутящему моменту, позволяет в соответствии с выражением (9) определить момент:

$$M_{\text{кр}} = \frac{ER_k}{I_m w S_k K} \quad (10)$$

где E - показания измерительного прибора (В),
R_k - расстояние между осями катушки и вала (м),

I_m - амплитуда тока (А),

w - число витков ИКИ,

S_k - эффективная площадь ИКИ (м²),

K - коэффициент, характеризующий свойства материала испытуемого вала (1/м с А²).

Изложенная сущность поясняется чертежами, на которых на фиг.1 изображено устройство, взятое за прототип, а на фиг.2 - предлагаемое устройство.

Предлагаемое устройство для определения напряжения, пропорционального крутящему моменту вала (фиг.2) содержит измерительную катушку индуктивности 1, соединенную с измерительным прибором (вольтметром) 2, источник переменного тока 3, снабженный токопроводящими пластинами 4, подключаемыми к испытуемому валу в напряжение, регистрируемое в измерительной катушке индуктивности 1, пропорционально крутящему моменту M_{кр}. Позицией 5 обозначен испытуемый вал.

Величину крутящего момента находим из выражения (10), в котором [K]=[f][μ²][λ][1]/[R²][B²][S]=1/м сек А²

$$K = 4,44f\mu^2 \frac{\lambda l \sin J}{2\pi^2 R^2 B_s^2 S' (1 - \cos J)}$$

где K имеет размерность 1/м с

Если в рассмотренном устройстве вал 5 считать образцовым, а испытуемый вал расположить в магнитном поле образцового (условно не показан), то реализуется устройство с использованием эффекта магнитной памяти металлов (МПМ). Учитывая свойства суперпозиции индукции магнитных полей образцового вала 5 и испытуемого, получим

$$M_{\text{кр}} = \frac{ER_k}{I_m w S_k K K_1}$$

где K₁ - безразмерный коэффициент, учитывающий действие магнитного поля материала испытуемого вала, который совместно с коэффициентом K находят теоретически или опытным путем.

Выполненные эксперименты в лаборатории методов и средств измерений ИП МАШ РАН для валов с параметрами R=0,005 м, 1-0,25 м, из стали марки 60С2А подтвердили справедливость выражений (7) и (9). Исследовались свойства электромагнитного стержня из стали марки 60С2А. Действующее значение переменного тока устанавливалось для разных частот I=0,4 А.

При расчетах и в экспериментальных исследованиях использовались следующие значения электромагнитных и других параметров:

- переменный ток с частотой 1000, 2000, 3000 Гц;

$$B_m = \mu \frac{I_m}{2\pi R}$$

- магнитная индукция

- индукция насыщения B_s=1,4 Тл;

- среднее значение магнитострикции λ₃=6,3·10⁻⁷;

- магнитная проницаемость μ=μ_{ст}μ₀=1,68·10⁻⁴ мкГ/С² А²;

- крутящий момент $M_{кр}=19,2$ нм; 25,6 нм; 32 нм, соответствующий соответственно 3^0 , 4^0 , 5^0 закручивания стержня;

- центр ИКИ расположен на расстоянии $R_k=0,03$ м от оси вала, а ее площадь $S_k=1,93 \cdot 10^{-3}$ м².

Результаты вычислений по выражению (9) и опытные данные приведены в таблице. Вал закручивался на угол $J=5^\circ$ при изменении частоты и при постоянной частоте $f=1000$ Гц на углы, приведенные в таблице. При указанном в выражении (9) значении λ оно переходит в (4,а), для которого выполнен расчет индуцируемого напряжения.

Частота	Теоретическое	Опытное	Угол	Теоретическое	Опытное
Гц	значение	значение	закручивания	значение	значение
($J=5^\circ$)	E_2 , В	E_2 , В	вала	E_1 , В	E_2 , В
				($f=1000$ Гц)	
1000	0,075	0,0740	3	0,0451	0,0435
2000	0,1502	0,1445	4	0,0601	0,0592
3000	0,2253	0,2240	5	0,0751	0,0740

Таким образом, полученные выражения (7) и (9) определяют новый способ измерения крутящих моментов, концентрации механических напряжений. Они отражают идею индуктивного или трансформаторного преобразования механических напряжений валов в э.д.с. $\epsilon=\epsilon_k$, которую измеряет вольтметр 2.

Измерение крутящего момента, приложенного к валу 5, состоит в том, что от источника энергии пропускают через исследуемый вал заданной величины и частоты электрический ток. Для измерения применяют измерительную катушку индуктивности 1, нормаль к площади витков которой направлена параллельно оси вала. Измерительная катушка индуктивности 1 подключена к измерительному прибору 2. От источника энергии 3 через токопроводящие контакты 4 при касании их с валом 5 в местах контактов к валу подводится ток i .

Когда крутящий момент равен нулю, устанавливают катушку 1 так, чтобы э.д.с. в ней была минимальной. Затем к валу прикладывают крутящий момент и в измерительной катушке 1 индуцируется э.д.с., пропорциональная крутящему моменту, которая измеряется прибором 2.

Индуктивный преобразователь легко дополняется системой, выполняющей измерения на основе использования МПМ или емкости для измерений на резонансной частоте. В этом случае приборы на основе предлагаемого устройства будут представлять принципиально новый подход в области диагностики металлических изделий промышленности. Они смогут обеспечивать контроль нагруженных конструкций и оценивать их фактическое напряженно-деформированное состояние.

ЛИТЕРАТУРА

1. Туричин А.М., Новицкий В.П. и др. Электрические измерения неэлектрических величин, "Энергия", Ленинград, 1975. 575 с.
2. Фурманов Е.Ф. Теплостойкий измерительный преобразователь давления агрессивных жидкостей. "Известия ВУЗов Приборостроения". 1970. Т.13, № 7, с 88-91.
3. Лукьянц В.А. Физические эффекты в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 203 с.
4. Берг Ю. Справочное пособие по магнитным явлениям. М.: Энергоатомиздат, 1991.
5. Коверкин Ю.Б., Губанов Н.Н. Некоторые замечания по эффекту Видемана. 5-я Межд. конференция по проблемам физической метрологии, СПб ГПУ, 2002, с.28-29.
6. Коверкин Ю.Б., Проурзин В.А. Снарский А.В. Бесконтактный метод измерения деформаций кручения вала на основе обратного эффекта Ж.Видемана. Труды пятой сессии Международной научной школы (Фридрендорговские чтения). СПб, 2002, с.336-342.
7. Жуков С.В., Капица Н.Н. Исследования параметров полей механических напряжений в металлических конструкциях приборами "Комплекс-2". Сб.научных Трудов, Академия транспорта, Отд. "Спец-проблемы транспорта", 1999, с.214-223.

Формула изобретения

Устройство определения напряжения, пропорциональное крутящему моменту вала, содержащее измерительную катушку индуктивности, соединенную с измерительным прибором, и источник переменного тока, отличающееся тем, что измерительная катушка индуктивности установлена параллельно оси испытуемого вала, а источник переменного тока снабжен токопроводящими пластинами с возможностью подключения его к испытуемому валу в процессе измерения крутящего

момента, при этом напряжение, регистрируемое в измерительной катушке индуктивности, пропорционально крутящему моменту

$$M_{кр} = ER_k / I_m w S_k K,$$

где $M_{кр}$ - крутящий момент, (нм);

E - показания измерительного прибора, (В);

R_k - расстояние между осями катушки и вала, (м);

I_m - амплитуда тока, (А);

S_k - эффективная площадь измерительной катушки индуктивности, (m^2);

w - число витков измерительной катушки;

K - коэффициент, характеризующий свойства материала вала, ($1/m \cdot c \cdot A^2$).

РИСУНКИ

