

УДК 623.004.67

К.Р. Радутна, А.М. Науменко

*Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРИНЦИПІВ ПОБУДОВИ МАГНІТОПРУЖНИХ ДАТЧИКІВ МЕХАНІЧНИХ НАПРУЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕФЕКТУ ХОЛА

*В статті досліджені принципи побудови магнітопружних датчиків механічних напружень з використанням ефекту Хола, цей принцип має ефективно впровадження в промисловість систем автоматизації, поряд зі спеціалізацією виробництва, уніфікацією та нормалізацією номенклатури продукції, що випускається і механізацією виробництва, спирається на високу оснащеність підприємств спеціальними вимірювальними приладами для надійного контролю якості, експлуатаційних та фізичних властивостей виробів.*

**Ключові слова:** магнітопружні датчики механічних напружень, ефект Хола, системи автоматизації, уніфікація та нормалізація номенклатури продукції.

### Вступ

**Постановка задачі.** В останнє десятиліття в нашій країні і за кордоном поряд з подальшим удосконаленням широко відомих первинних перетворювачів телединамометричних систем ведуться інтенсивні дослідження і конструкторські розробки нових типів тензодатчиків, до їх числа відносяться магнітопружні датчики.

З огляду на можливість широкого застосування МД в промислових цілях, приділяється все більше уваги питанню про технологічність конструкції.

Новою гідністю МД є можливість вимірювання безконтактним способом механічних напружень в рухомих деталях без зменшення їх жорсткості. Ця проблема є досить актуальною, тому що зовнішні чинники значно впливають на результат вимірювання. Саме для того, щоб збільшити точність вимірювання впровадженій цей метод.

**Аналіз літератури.** В відомій літературі [1-6] розглядаються магнітопружні датчики різних типів та принципів дії зі структурними схемами і можливістю їх застосування у промислових цілях, але в цій літературі не розкривається вся суть питання, що пов'язана із дослідженнями магнітопружних датчиків механічних напружень з використанням ефекту Хола.

**Мета статті.** Досягнення максимальної точності при вимірюванні зусиль за допомогою магнітопружних датчиків, та створення спеціалізованих інформаційно-вимірюваних систем, що є спільною рисою автоматизації виробничих процесів.

### Основний матеріал

Магнітопружні датчики володіють високою чутливістю, а також простотою і надійністю конструкції.

Принцип дії магнітопружних датчиків заснований на використанні магнітопружного ефекту - фізичного явища, що полягає у зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією механічних сил.

В даний час відомі десятки конструкцій МД, які знайшли застосування для дистанційного контролю та регулювання різних виробничих процесів.

Переваги магнітопружних датчиків проявляються в найбільшій мірі при вимірюванні параметрів об'єктів, що працюють в важких умовах експлуатації (прокатні стани, шахтні підйоми, бурові установки і т. п.).

З огляду на можливість широкого застосування магнітопружних датчиків в промислових цілях, приділяється все більше уваги питанню про технологічність конструкції. Виходячи з цього, в цілому ряді випадків перевага віддається магнітопружним датчикам, в яких чутливий елемент виготовлений із суцільного матеріалу і має циліндричну форму, а котушки розміщуються поза тіла чутливого елемента.

Конструктивними елементами датчика, здійснюючими механічне перетворення, є зовнішній механічний перетворювач і чутливий елемент. За допомогою зовнішнього механічного перетворювача вимірювальний параметр може змінюватися за величиною, знаком або видом. Наприклад, в деяких датчиках, що вимірюють розтягуюче зусилля, вимірюваний параметр перетворюється на зусилля стиску чутливого елемента, а датчиках, що вимірюють стискує або розтягуюче зусилля, параметр перетворюється на зусилля скручування чутливого елемента.

Аналіз конструктивних схем відомих магнітопружних датчиків дозволяє виділити дві основні групи:

1. Магнітопружні датчики, в яких використовується зміна магнітних характеристик матеріалу чутливого елемента в якому-небудь одному або двох взаємно перпендикулярних напрямках. До них відносяться магнітопружні датчики:

- електричного опору;
- дросельного;
- мостового;
- диференційно-трансформаторного;
- Шунтового типів.

2. Магнітопружні датчики, в яких використовується зміна ступеня магнітної анізотропії матеріалу чутливого елемента. До них відносяться :

- магнітоанізотропні;
- селсині датчики трансформаторного типу.

Принцип дії МД дросельного типу (рисунок 1, а) заснований на зміні повного електричного опору котушки 1, що живиться змінним струмом і створюючий магнітний потік в чутливому елементі 3, до якого прикладено вимірюване зусилля.

У магнітопружному датчику електричного опору (рис. 1, б) через електроди 1 до чутливого елемента підводиться змінний струм, а за допомогою електродів 2 вимірюється падіння напруги на ділянці чутливого елемента 3, яке при незмінному струмі пропорційно електричному опору цієї ділянки.

Принцип дії магнітопружного датчика мостового типу (рис. 1, в) заснований на вимірюванні різниці повних електричних опорів котушок 1, магнітні осі яких взаємно перпендикулярні.

У магнітопружного датчика шунтового типу (рис. 1, г) при відсутності вимірюваного зусилля магнітний потік, створений котушкою збудження 1, замикається в основному через магнітопровід, не охоплений вимірюваною котушкою.

Під дією вимірюваного зусилля магнітний опір магнітопроводу 3, виготовленого із матеріалу з позитивною магнітострикцією, в осьовому напрямку зростає, і частина потоку, обумовлена величиною вимірюваного зусилля, відгалужується в шунтувальний магнітопровід, охоплений вимірювальною котушкою 2, з якої знімається вихідна напруга.

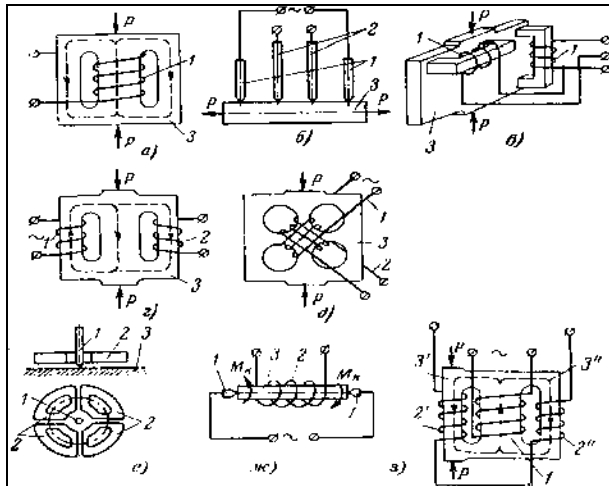


Рис. 1. Конструктивні схеми відомих магнітопружних датчиків

У котушечному магнітоанізотропному датчику (рис. 1, д) сумарний вектор магнітного потоку, зчепленого з котушкою збудження 1, спрямований всередині чутливого елемента 3 під кутом  $45^\circ$  до векторів головних механічних напружень. Магнітна вісь вимірювальної котушки 2 розташована перпен-

дикулярно до осі котушки збудження, завдяки чому при відсутності навантаження, яке вимірюють і повної магнітної ізотропності матеріалу чутливого елемента потокозчеплення з вимірювальною котушкою 2, а отже, і коефіцієнт взаємодукції дорівнюють нулю.

У електродно-котушечному анізотропному датчику (рис. 1, е) через електрод 1 підводиться змінний електричний струм до чутливого елемента 3; в останньому виникають магнітні потоки розсіювання, зчеплені з вимірювальними котушками 2. Котушки 2 з'єднанні зустрічно, тому при повній магнітній ізотропності матеріалу індуковані в цих котушках е. р. с. рівні між собою і вихідна напруга датчика дорівнює нулю.

Магнітна анізотропія, яка виникла наслідок механічних напружень, призводить до розбалансу схеми і до появи вихідної напруги.

У електродно-котушечному анізотропному датчику (рис. 1, ж) всередині чутливого елемента 3 при пропусканні через нього змінного струму створюються циркулярні магнітні потоки, які при повній магнітній ізотропності матеріалу не зчеплені з вимірювальною котушкою 2. При скручуванні чутливого елемента в цій котушці наводиться е. р. с, тобто, що є функцією вимірюваного крутного моменту.

У магнітопружних датчиках диференційно-трансформаторного типу (рис. 1, з) магнітний потік, зчеплений з котушкою збудження 1, розгалужується на два потоки, перший з яких пронизує магнітопровід 3'' з одним, а інший потік – магнітопровід 3' з відмінним від нього характером зміни магнітних характеристик під дією вимірювального навантаження. Один з цих магнітопроводів умовно названий чутливим, а інший – компенсаційним елементом.

Вибір типу та конструктивної схеми МД визначається вимогами, яким він повинен відповідати.

До числа цих вимог належать:

1. Велика потужність вихідного сигналу.
2. Перетворення механічної напруги, що виникають у рухомих деталях. У цих випадках з метою підвищення надійності зазвичай застосовуються безконтактні МД, а чутливий елемент виготовляється з суцільного матеріалу.

3. Технологічність виготовлення, а також малий розкид вихідних характеристик при серійному виготовленні МД. Цим вимогам більшою мірою відповідають МД з циліндричними чутливими елементами.

4. Лінійність перетворення. Оскільки, як буде показано нижче, магнітопружне перетворення має принципово нелінійний характер, то найбільш доцільним є застосування тієї схеми МД, яка забезпечить можливість лінеаризації вихідної характеристики. Кращі результати в цьому відношенні отримані для безконтактних МД трансформаторного та диференційно-трансформаторного типів.

Вимірювальні системи з магнітопружними датчиками можуть бути розділені на дві групи. До першої групи належать схеми із вторинними приладами безпосередньої оцінки, а до другої – системи з приведенням вихідного параметра до нуля (нуль-балансні) Нуль-балансні системи мають велику чутливість (до 0,07% від межі вимірювання)

Існує два зусилля магнітопружних датчиків промислового призначення (стискаючі і розтягуючі).

У цих МД використовуються два чутливі елемента трубчастої форми 1. На кожному з них розміщені тороїдальні обмотки збудження 4 і компенсаційна 6, а також співвісно з чутливими елементами вимірювальні обмотки 5 (рис. 2, а).

За допомогою зовнішнього механічного перетворювача відбувається перетворення вимірюваного стискаючого (рис. 2, б) або розтягуючого (рис. 2, в) зусиль в крутний момент, прикладений до чутливого елемента. Зусилля передається через опір 2 з встановленою на ній системою важелів 3 на чутливі елементи 1. Важелі зміщені відносно осей чутливих елементів.

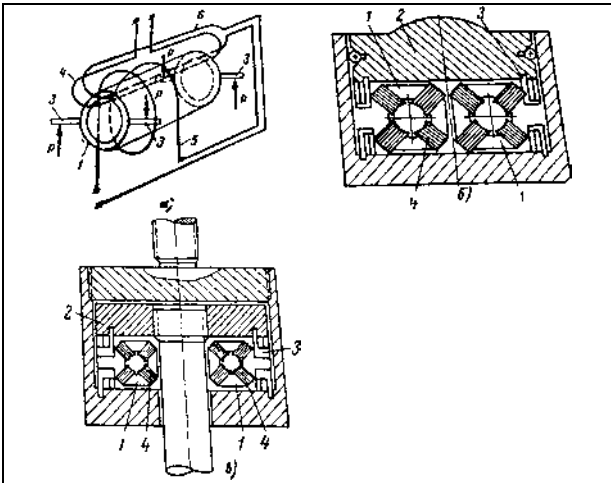


Рис. 2. Чутливі елементи магнітопружних датчиків

Ці МД застосовані в. Літакових вагах.

Найбільш широке поширення одержали МД стискаючих та розтягуючих зусиль з багатосекційними чутливими елементами кільцевої та призматичної форми.

При застосуванні ефекту Хола, вимогам високої експлуатаційної надійності відповідають трансформаторні і магнітоанізотропні магнітопружні перетворювачі (МПП). Вони знайшли застосування в судових автоматичних системах управління для контролю і виміру: крутного моменту, механічної напруги, вантажних і тягових зусиль.

У МПП використовується магнітопружний ефект, який проявляється в тій чи іншій мірі у всіх феромагнітних матеріалів і полягає в зміні магнітних властивостей феромагнітних матеріалів під дією пружних механічних напруг. Спільне використання трансформаторного МПП і магнітоанізотропного перетворювача

(МАП) з датчиком Хола дозволило розробити багатофункціональні датчики механічних величин.

Удосконалення магнітопружного перетворювача в теперішній час йде в основному шляхом пошуку матеріалів, що поєднують високу тензочутливість, стабільність коефіцієнта перетворення і високу механічну міцність. Принципи дії пристроїв і основні характеристики МПП, отримані на основі досліджень електромагнітних процесів.

Ефект Хола – непарний гальваномагнітний ефект (пропорційний першого ступеня напруженості магнітного поля);

Датчики Хола застосовуються для вимірювання лінійних та кутових переміщень будь-яких об'єктів, що знаходяться в магнітних полях.

Застосування датчиків Хола в значній мірі зменшує вплив потоків розсіювання, створюваних обмоткою збудження, на вихідний сигнал трансформаторного магнітопружного перетворювача.

Магнітоанізотропні перетворювачі відрізняються високою стабільністю і невеликою похибкою.

На рис. 3 наведена конструкція магнітоанізотропного перетворювача. Магнітопровід перетворювача представляє пакет, набраний із пластин трансформаторного заліза.

На діагоналях пакету симетрично розташовані чотири отвори. У кожній парі отворів А, В та С, D знаходиться обмотка. Обмотки розташовані взаємно перпендикулярно, і до обмотки збудження подається живлення від джерела змінного струму. З вимірювальної обмотки знімається вихідний сигнал.

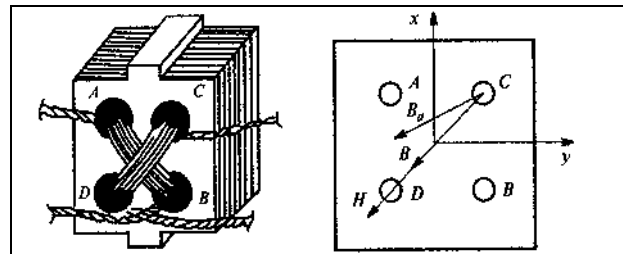


Рис. 3. Магнітоанізотропний перетворювач та його принцип дії

Для матеріалів з позитивною магнітострикцією магнітна проникність вздовж осі x зменшується, в той час як уздовж осі y вона залишається незмінною. Таким чином, під дією механічного зусилля матеріал МПП стає анізотропним.

Виникнення анізотропії матеріалу магнітопроводу призводить до спотворення магнітних силових ліній, які з кіл перетворюється в еліпси.

При наявності зовнішнього зусилля матеріал магнітопровода МПП стає анізотропним, вектор магнітної індукції B повертається на деякий кут (рис. 3), внаслідок чого частина магнітного потоку, створюваного обмоткою збудження, буде перетинати витки вимірюваної обмотки, і на виході з'явиться сигнал, що пред-

ставляє собою напругу змінного струму. При живленні МПП постійним струмом вирази для складових вектора магнітної індукції мають такий вигляд:

$$B_a = \frac{\ell \mu_z}{2\pi r}; \quad (1)$$

$$B_r = \frac{\ell \mu_z (\mu_y - \mu_x) \sin 2a}{4\pi r (\mu_y \cos^2 a + \mu_x \sin^2 a)}. \quad (2)$$

Значення магнітного потоку на одиницю довжини, що пронизує площину між точками С і D, визначається вираженням:

$$\Phi = \frac{\ell \mu_z}{2\pi r} \ln \frac{\mu_x}{\mu_y}. \quad (3)$$

Використання вираження радіальної складової магнітної індукції для нитки з постійним струмом дозволило розробити магнітоанізотропний датчик механічних зусиль, в якому радіальна складова  $B_r$ , що виникає під дією механічних зусиль, вимірюється перетворювачами Холла.

### Висновки

Розвиток автоматизації промислового виробництва йде по шляху поступового переходу від регулювання окремих параметрів до пов'язаного регулювання безлічі параметрів і в підсумку до автоматизованих систем управління виробництвом.

Впровадження таких систем передбачає створення спеціалізованих інформаційно-вимірювальних систем для збору даних про хід процесу і стан об'єктів з подальшою централізованою обробкою інформації, що надходить обчислювальними та керуючими машинами. Спільною рисою автоматизації виробничих процесів є постійно зростаюче значення вимірювань неелектричних величин і підвищення ролі обчислювальних пристроїв в замкнутому ланцюзі керування.

З огляду на можливість широкого застосування МД в промислових цілях, приділяється все більше

уваги питанню про технологічність конструкції. Виходячи з цього, в цілому ряді випадків перевага віддається МД, в яких чутливий елемент виготовлений із суцільного матеріалу і має циліндричну форму, а котушки розміщуються поза тіла чутливого елемента. Технічна і економічна доцільність застосування магнітопружних датчиків в різних галузях промисловості у випадках, коли допустимі похибки, що перевищують 2 – 3%, в даний час ні в кого не викликає сумнівів. За допомогою магнітопружних датчиків виявляються здійсненням найрізноманітніших задач вимірювання зусиль, причому забезпечуються вони при високій надійності, компактності і конструктивності пристроїв. За працездатність, довговічність, стійкість в роботі пристрої цього класу не мають собі рівних.

### Список літератури

1. Гинзбург В.В. Безконтактный магнитоупругий датчик крутящего момента / В.В. Гинзбург, П.Б. Гинзбург // *НТС Машины и нефтяное оборудование*. – ВНИИОЭНГ. – 2004. – № 4. – С. 24-27.
2. Жадобин Н.Е. Магнитоупругие датчики механических напряжений с датчиками Холла / Н.Е. Жадобин // *Sensors & Systems*. – 2006. – № 9. – С. 45-49.
3. Иванова И.И. О погрешностях магнитоупругих преобразователей / И.И. Иванова // *Труды Ленинградского Политехнического института*. – 2006. – № 184. – С. 32-35.
4. Столбун М.И. Магнитоупругие датчики для измерения механических усилий / М.И. Столбун // *Электричество*. – 2003. – № 1. – С. 56-59.
5. Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки / В.М. Чинков. – МО, 2001. – 424 с.
6. Чинков В.М. Цифрові вимірювальні прилади; ч. 1, ч. 2 / В.М. Чинков. – МО, 2007. – 856 с.

Надійшла до редколегії 25.05.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТОУПРУГИХ ДАТЧИКОВ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭФФЕКТА ХОЛЛА

К. Р. Радутная, А. Н. Науменко

*В статье исследованы, принципы построения магнитоупругих датчиков механических напряжений с использованием эффекта Холла, этот принцип имеет эффективное внедрение в промышленность систем автоматизации, наряду со специализацией производства, унификации и нормализацией номенклатуры выпускаемой продукции и механизацией производства, опирается на высокую оснащенность предприятий специальными измерительными приборами для надежного контроля качества, эксплуатационных и физических свойств изделий.*

**Ключевые слова:** магнитоупругие датчики механических напряжений, эффект Холла, системы автоматизации, унификация и нормализация номенклатуры, приборы для надежного контроля качества.

### RESEARCH OF PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF MAGNETOELASTIC SENSORS OF MECHANICAL TENSIONS WITH THE USE OF EFFECT OF HALL

K.R. Radutnay, A. N. Naumenko

*In the article principles of construction of magnetoelastic sensors of mechanical tensions are investigational with the use of effect of Hall, effective introduction has this principle in industry of the systems of automation, along with specialization of production, standardizations and by normalization of nomenclature of the produced products and mechanization of production, leans against high equipped of enterprises the special measurings devices for reliable control of quality, operating and physical properties of wares.*

**Keywords:** magnetoelastic sensors of mechanical tensions, effect of Hall, systems of automation, standardization and normalization of nomenclature.