

РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ МЕТОДІВ І ПРИСТРОЇВ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ НАПРУГ У МЕТАЛЕВИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБАХ

Б. Горкунов, С. Львов, В. Олійник, В. Вевенко

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

Анотація

Розглянуті теоретичні основи і алгоритм реалізації диференціального трансформаторного електромагнітного перетворювача накладного типу для контролю зміни електромагнітних параметрів феромагнітного вала, на який діє обертовий момент. Створена експериментальна установка та отримано характеристики перетворювача для амплітудного, фазового та змінно-частотного методів контролю. Із отриманих залежностей видно, що при використанні диференціального методу, в якості інформативних параметрів є магнітна проникність та частота струму намагнічування, які є найбільш чутливими до зміни механічних навантажень циліндричного виробу. Встановлено, що така система має високу розрізняльну здатність і розширені функціональні можливості.

Ключові слова: обертовий момент, діагностування, електромагнітний метод, трансформаторний електромагнітний перетворювач, диференціальний метод, функції перетворення.

1. Вступ

До теперішнього часу підвищений науковий та практичний інтерес представляє розвиток і вдосконалення методів та засобів для визначення фізико-механічних величин. Визначення механічних зусиль необхідне в багатьох галузях народного господарства, так як є невід'ємною частиною різних випробувань, наукових досліджень, технологічних процесів, технічної та медичної діагностики та в інших випадках [1-6,10,11]. Діапазони виміру зусиль досить широкі: внутрішні напруження в матеріалах становлять $0 \div 2000$ МПа, сили - від 0 до 10^9 Н, моменти - від 0 до 10^8 Н·м, тиску – $0 \div 10^3$ МПа. Вимір зусиль потрібно робити в різних середовищах, в умовах дії різноманітних величин, що впливають, у широкому діапазоні температур та частотному спектрі.

Досить актуальне завдання створення засобів контролю та технічної діагностики різноманітних машин, механізмів і елементів їх конструкцій при динамічних режимах роботи. Для їх вирішення досить перспективним є використання електромагнітних методів, які дозволяють створити перетворювачі з такими позитивними якостями, як слабка залежність від зміни властивостей навколишнього середовища (вологість, забруднення поверхні та ін.), безконтактність, простота конструкції, висока швидкодія, надійність, універсальність і технологічність електрична форма вихідного сигналу [2-6].

2. Мета статті

Вирішення питань розробки, дослідження нових електромагнітних методів і пристроїв для визначення фізико-механічних параметрів, а також завдання вдосконалення існуючих методів і засобів є досить актуальним і перебуває постійно в центрі

уваги фахівців різних науково-дослідних інститутів і лабораторій. Тому, метою роботи є, вдосконалення існуючих і створення нових електромагнітних методів і пристроїв для безконтактного контролю фізико-механічних величин (механічних напруг, деформацій, зусиль, моментів скручування та ін.).

Дослідження показують, що для абсолютних методів безконтактного електромагнітного контролю відносні похибки визначення магнітних μ , і електричних ρ параметрів циліндричних виробів навіть у раціональній області зміни узагальненого параметра x складають 2% і 4% відповідно. Остання обставина вказує на те, що зміна електромагнітних параметрів, вимірюваних абсолютним методом, повинна перевищувати хоча б на порядок, тобто в 10 разів більше при переході від одного стану виробу до іншого. Тому абсолютними методами практично неможливо користуватися для контролю механічних напруг, оскільки чутливість перетворювача не дозволяє контролювати досить незначні зміни електромагнітних параметрів μ , і ρ виробів при впливі на них механічних зусиль у рамках застосовності закону Гука [2,7].

3. Виклад основного матеріалу

У роботі запропоновані диференціальний електромагнітний перетворювач. Диференціальні методи широко використовуються у вимірювальній техніці для підвищення розрізняльної здатності (чутливості) пристроїв і підвищення точності контролю. За допомогою приладів, які працюють на основі диференціального методу, визначаючи зміну контрольованого параметра навіть із не високою точністю, одержують абсолютні значення контрольованого параметра з досить високою точністю [7].

Для підвищення чутливості безконтактного контролю механічних напруг у металевих зразках в роботі запропоновано один з варіантів диференціального трансформаторного електромагнітного перетворювача (ТЕМП) накладного типу для безконтактного контролю механічних моментів скручування вала.

На рис. 1 наведена функціональна схема розміщення диференціального ТЕМП накладного типу та досліджуваного циліндричного зразка, який в середині жорстко затиснений, на один кінець діє момент $M = 0$, а на другий діє момент скручування $M \neq 0$.

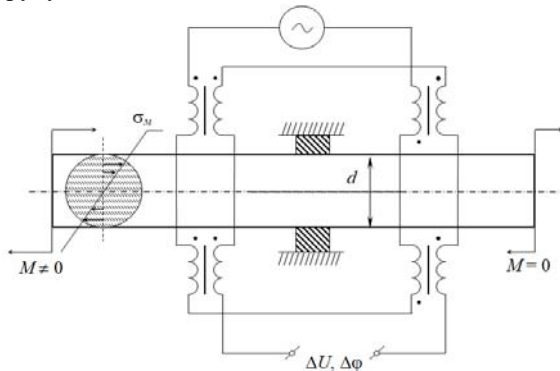


Рис. 1. Диференціальний ТЕМП накладного типу для контролю електромагнітних параметрів феромагнітного вала, на який діє момент скручування M

Диференціальний ТЕМП складається із двох пар ідентичних трансформаторів, причому одна пара трансформаторів розташована з обох сторін зразка на який діє механічний момент скручування, а друга пара трансформаторів розташована по обидва боки ненавантаженого зразка.

Всі чотири первинні (намагнічуючі) обмотки ТЕМП з'єднані між собою послідовно узгоджено та підключені до генератора синусоїдального струму. Вторинні (вимірювальні) обмотки кожної пари з'єднані послідовно узгоджено, а між собою пари обмоток з'єднані послідовно зустрічно. Тому на виході диференціального ТЕМП отримаємо різницеве значення напруги та фази. Варто відмітити, що таке включення обмоток перетворювача і їхнє розміщення в першому наближенні зменшує вплив зазору на результати контролю [2,11].

Так, наприклад, для ТЕМП накладного типу, розташованого над криволінійною поверхнею (циліндр, сфера) формула для напруги вихідного сигналу в загальному вигляді буде [1-3]:

$$\dot{U}_{\text{вн}} = j\mu_0 W_n W_u \omega I R \pi \times \int_0^\infty \phi_{\text{ок}} \exp(-xh_*) J_1(x\sqrt{a_n/a_u}) J_1(x\sqrt{a_u/a_n}) dx, \quad (1)$$

де $R = \sqrt{a_n a_u}$ – еквівалентний радіус ЕМП;

$h_* = (h_n + h_u)/R$ – узагальнений параметр, що характеризує відстань між центрами обмоток ЕМП і поверхнею ОК; h_n і h_u – відстань від центра відповідної обмотки ЕМП до зовнішньої поверхні ОК; $J_1(x\sqrt{a_n/a_u})$, $J_1(x\sqrt{a_u/a_n})$ – функції Бесселя [8] першого роду першого порядку; $\phi_{\text{ок}}$ – функція впливу ОК, тобто комплексна функція, що залежить від граничних умов і характеризує вплив ОК із площинно-паралельними шарами та обумовлена питомою електричною провідністю, магнітною проникністю та товщиною відповідних шарів

$$\phi_{\text{ок}} = \frac{\mu_r x - \sqrt{x^2 + j\mu_r \beta^2}}{\mu_r x + \sqrt{x^2 + j\mu_r \beta^2}}. \quad (2)$$

В роботі проведені експериментальні дослідження безконтактного контролю механічного навантаження циліндричних феромагнітних виробів з допомогою диференціального ТЕМП накладного типу, при реалізації змінно-частотного методу при фіксованому значенні узагальненого параметру x [9].

Суть змінно-частотного методу полягає в тому, щоб зміною частоти f струму намагнічування ЕМП домогтися сталості величини $x = \text{const}$, а значить і глибини проникнення магнітного поля в досліджуваний виріб.

На рис. 2 показана лабораторна установка, яка використовувалась для дослідження залежності вихідного сигналу диференціального ТЕМП накладного типу від величини механічного моменту скручування циліндричного феромагнітного виробу.

В якості об'єкта дослідження обрано циліндричний вал, що піддається механічній деформації під дією моменту скручування. Діаметр вала із початковими (без навантаження) значеннями $\mu_r = 500$ і $\rho = 1,210 \cdot 10^{-7}$ Ом·м.



Рис. 2. Лабораторна установка для дослідження залежності вихідного сигналу диференціального ТЕМП накладного типу від величини механічного моменту скручування циліндричного феромагнітного виробу

Поблизу нього розташований диференціальний ТЕМП накладного типу з феромагнітним осердям, що підвищує його чутливість. ТЕМП містить намагнічуючу обмотку, із числом витків $W_n = 100$, намотану дротом ПЕВ - 0,2 мм і чотири вимірювальні обмотки із числом витків $W_b = 50$ витків кожна, намотаними дротом ПЕВ - 0,1 мм. Всі обмотки розташовані на П - образному феритовому осерді.

У табл. 1 і табл. 2 наведені результати експерименту отримані на дослідній установці, що реалізує змінно-частотний метод визначення μ_r і ρ для двох фіксованих значень узагальненого параметра x .

Таблиця 1 – Залежність μ_r і ρ від механічного напруження σ_m для $x = 2$.

σ_m , МПа	f , Гц	U , В	ϕ , град	μ_r	$\rho \cdot 10^{-7}$, Ом·м
0,00	1178	0,220	22,1	340	1,11
2,26	957	0,224	22,4	432	1,15
4,53	874	0,230	22,6	490	1,19
6,79	824	0,235	22,7	534	1,22
9,05	788	0,238	22,8	564	1,23
11,32	774	0,240	22,9	582	1,25

Таблиця 2 – Залежність μ_r і ρ від механічного напруження σ_m для $x = 3$.

σ_m , МПа	f , Гц	U , В	ϕ , град	μ_r	$\rho \cdot 10^{-7}$, Ом·м
0,00	2634	0,576	31,2	350	1,14
2,26	2215	0,585	31,4	435	1,19
4,53	2028	0,596	31,6	488	1,22
6,79	1903	0,604	31,9	532	1,25
9,05	1802	0,613	32,0	569	1,27
11,32	1734	0,622	32,2	600	1,28

Отримані дані з табл. 1 і табл. 2 дозволяють визначити диференціальні чутливості параметрів U , ϕ , f , μ_r і ρ до механічної напруги σ_m .

Як відомо [7], відносні чутливості зазначених параметрів до величини σ_m можна визначаються похідними вихідних величин до σ_m . Тому, відносні зміни $\delta U/U_0$, $\delta \phi/\phi_0$, $\delta f/f_0$, $\delta \mu_r/\mu_{r0}$ і $\delta \sigma/\sigma_0$ можна визначити як:

$$\frac{\delta U}{U_0} = \frac{\partial U}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{U_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (3)$$

$$\frac{\delta \phi}{\phi_0} = \frac{\partial \phi}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{\phi_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (4)$$

$$\frac{\delta f}{f_0} = \frac{\partial f}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{f_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (5)$$

$$\frac{\delta \mu_r}{\mu_{r0}} = \frac{\partial \mu_r}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{\mu_{r0}} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}; \quad (6)$$

$$\frac{\delta \rho}{\rho_0} = \frac{\partial \rho}{\partial \sigma_m} \cdot \frac{\sigma_{m0}}{\rho_0} \cdot \frac{\delta \sigma_m}{\sigma_{m0}}. \quad (7)$$

На графіках рис. 3–7 наведені зображення залежностей відносних збільшень вимірюваних величин U , ϕ , f , μ_r і ρ від відносного збільшення величини σ_m , тобто від $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$, де σ_{m0} – середнє значення механічної напруги у виробі.

Всі результати, які наведені на рис. 3–7, отримані для режиму роботи ТЕМП при $x = 2$, а в якості робочого (середнього) був обраний режим, що відповідає значенням: $U_0 = 0,233$ В; $\phi_0 = 22,6$ град; $f_0 = 846$ Гц; $\mu_{r0} = 500$; $\rho_0 = 1,2 \cdot 10^{-7}$ Ом·м і $\sigma_{m0} = 5,69$ МПа.

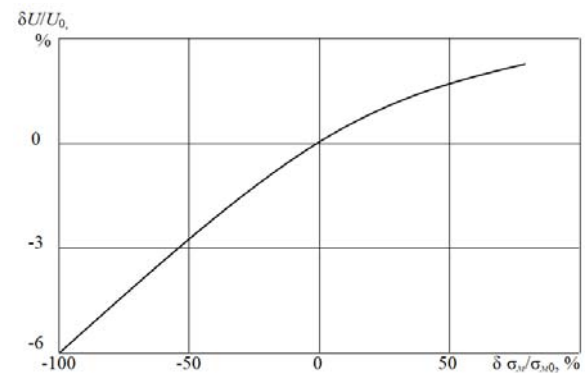


Рис. 3. Відносні збільшення величини U від дії відносного механічного навантаження $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$

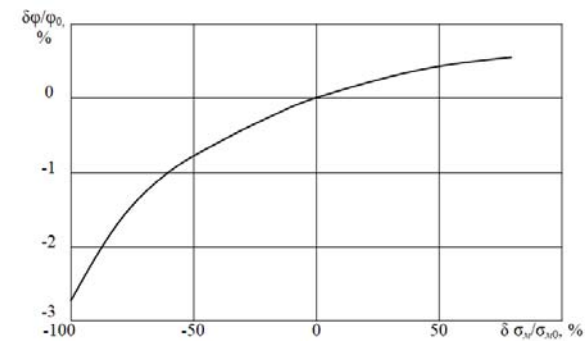


Рис. 4. Відносні збільшення величини ϕ від дії відносного механічного навантаження $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$

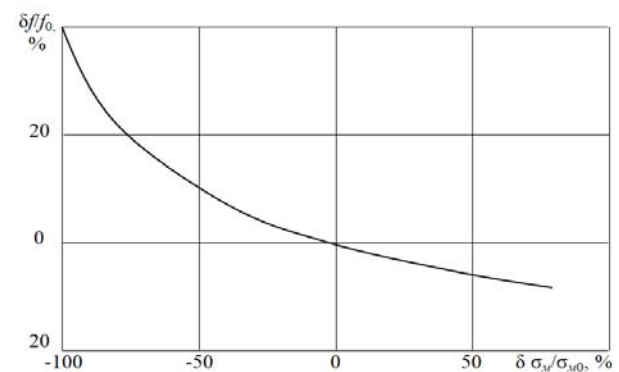


Рис. 5. Залежність відносних збільшень величини f від дії відносного механічного навантаження $\delta \sigma_m/\sigma_{m0}$

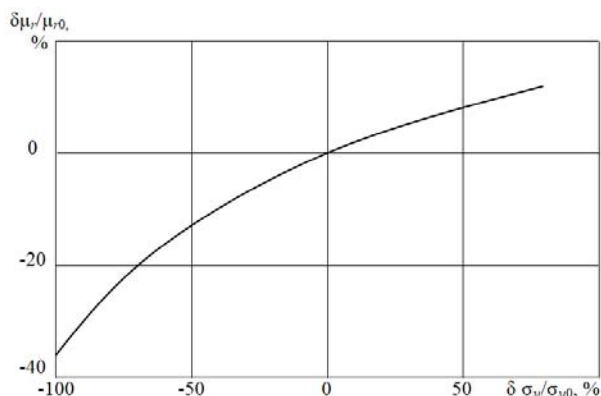


Рис. 6. Відносні збільшення величини μ_r від дії відносного механічного навантаження $\delta\sigma_m/\sigma_{m0}$

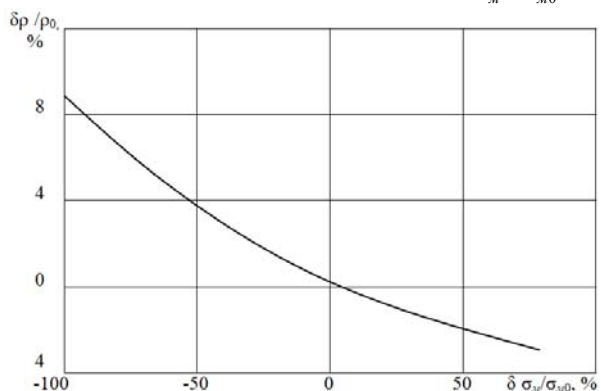


Рис.7. Відносні збільшення величини ρ від дії відносного механічного навантаження $\delta\sigma_m/\sigma_{m0}$

З отриманих графіків видно, що при використанні диференціального методу доцільне застосування як інформативні параметри відносної магнітної проникності μ_r і частоти струму намагнічування f . Саме ці параметри, у порівнянні з іншими, дають найбільшу чутливість ТЕМП до зміни механічної напруги σ_m . Приміром, середня чутливість до частоти $(\delta f/f_0) \approx 47\%$, а до магнітної проникності $\delta\mu_r/\mu_{r0} \approx 45\%$.

Це підтверджує той факт, що вплив механічного навантаження більшою мірою відбивається на магнітних властивостях феромагнітного матеріалу зразка й визначення σ_m через μ_r дає більшу чутливість у порівнянні із залежністю σ_m від ρ .

Диференціальний ТЕМП в комплексі об'єднує магнітопружний і тензометричний ефекти, його легко адаптувати на розв'язання задач визначення механічних моментів скручування, що виникають у циліндричних виробах (валах), виготовлених як з феромагнітних, так і немагнітних металів. Формування ТЕМП в якості інформаційного електричного сигналу дозволяє розширити функціональні можливості розробленого датчика при використанні в автоматизованих системах безперервного безконтактного контролю параметрів окремих елементів кінематичних схем.

Як показано раніше, а також у роботах [2-6,11] розглянуті три методи (амплітудний, фазовий та

змінно-частотний), що використовуються для контролю механічних напружень, деформацій, зусиль, моментів. Суть амплітудного та фазового методів полягає в тому, що при механічному впливі на феромагнітний зразок, розміщений в електромагнітний перетворювач, вимірюють амплітуду U або фазу ϕ вихідного сигналу перетворювача. Приміром, формули для визначення механічної напруги σ_m при використанні амплітудного та фазового методів у межах закону пружності мають вигляд [2]:

$$\sigma_m = \pm k_a \left(\frac{x^2(U)}{x_0(U)} - 1 \right); \quad (8)$$

$$\sigma_m = \pm k_\phi \left(\frac{x^2(\phi)}{x_0(\phi)} - 1 \right), \quad (9)$$

де «+» і «-» - відповідають розтягуванню та стисканню виробу відповідно; k_a і k_ϕ - розмірний коефіцієнт; $x(U)$, $x(\phi)$ - залежність узагальненого параметра x від U і ϕ при навантаженому виробі $x_0(U)$, $x_0(\phi)$ - ті ж функції з виробом, але без навантаження.

Змінно-частотний метод (амплітудний і фазовий) полягає в тому, що спочатку, під час відсутності механічного навантаження у виробі, встановлюють значення частоти поля намагнічування f_n , що відповідає раціональному режиму роботи ЕМП. При цьому, фіксують значення U або ϕ вихідного сигналу ЕМП. Потім, при кожному фіксованому механічному навантаженні зразка, змінюють значення частоти поля доти, поки амплітуда (фаза) вихідного сигналу ЕМП стане такою ж, як U і ϕ при відсутності механічного навантаження. Для змінно-частотного методу формула для визначення σ_m має вигляд:

$$\sigma_m = \pm k_f \left(\frac{f_k}{f_n} - 1 \right), \quad (10)$$

де k_f - розмірний коефіцієнт; f_k і f_n - частоти поля навантаженого й ненавантаженого зразка.

4. Висновки

Вирази (8)-(10) і отримані залежності U , ϕ і f від механічної напруги σ_m дозволяють визначити розрізняльну здатність ЕМП. Приміром, в області пружної деформації розрізняльна здатність ЕМП при використанні амплітудного, фазового та змінно-частотного методів становить 6,6 мВ/МПа; 0,3 град/МПа і 25 Гц/МПа відповідно. Звідси можна зробити висновок, що змінно-частотний метод дозволяє одержати максимальну чутливість до механічної напруги. Описані в роботі методи спільного визначення μ_r і ρ дозволяють установити функціональні залежності $\mu_r = f(\sigma_m)$ і $\rho = f(\sigma_m)$ та визначити відносні чутливості S_{μ_r} і S_ρ , які становлять 10% і 5% відповідно.

Список літератури

1. Патон Б.Є. Неразруйний контроль якості в Україні / Б.Є. Патон, В.А. Троїцький, Ю.М. Посипайко / Неруйнівний контроль та технічна діагностика: наук.-техн. конф., 19 – 23 травня 2003р.: матер. конф. К.: 2003. С. 11–14.
2. Горкунов Б.М., Львов С.Г., Борисенко Є.А. Теоретичні та практичні основи побудови електромагнітних перетворювачів для багатопараметрового контролю металевих виробів. Монографія, Харків: Факт, 2022. 349 с.
3. Gorkunov B., Lvov S., Borysenko Y., Saliba Abdel Nour. Contactless electromagnetic method for monitoring mechanical stresses in cylindrical products. The scientific heritage. Budapest, Hungary, N 70 Vol.1 (2021). PP 35-42.
4. Горкунов Б.М., Львов С.Г., Сиренко М.М., Шибан Тамер. Багатопараметровий електромагнітний перетворювач для систем контролю та діагностики. Електротехнічні та комп'ютерні системи. Одеса: ОНПУ, 2019. №30(106). С.218-225.
5. Gorkunov B., Lvov S., Borysenko Y., Issam Chahine. Aspects of the design of the electromagnetic transducer for diagnosing machinery elements. / 3rd Conference proceedings. Week on Advanced Technology IEEE. October 03-07, 2022, Kharkiv, Ukraine. P. 390-393. doi:10.1109/KhPI 57572.2022.9916376.
6. Gorkunov B., Lvov S., Borysenko Y. Uncertainty estimation while proceeding multi-parameter eddy current testing. Системи обробки інформації. 2018. Вип.4(155). С.92-97. doi:10.30748/soi.2018.155.12.
7. Основи метрології та вимірювальної техніки: Підручник: У 2 т. за ред. Б.І.Стадника. Т.2. Вимірювальна техніка. Львів: НУ «Львівська політехніка», 2005. 656 с.
8. Dvait G. Tables of integrals and other mathematical data. Herbert Bristol Dwight Fourth Edition. .NEW YORK the Macmillan company, 1961. 234 p.
9. Горкунов Б.М., Борисенко Є.А., Шибан Тамер. Нормовані функції перетворення під час здійснення вихорострумowego контролю. Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції "Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіти, здоров'я" Ч.ІІ Харків: НТУ "ХПІ", 2018. С.15.
10. ISO/IEC 17025:2017 "Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій".
11. Горкунов Б.М., Тищенко А.А., Горкунова І.Б. Вихорострумний контроль фізико-механічних параметрів металевих виробів. Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції ПРИЛАДОБУДУВАННЯ 2014: стан і перспективи, 23-24 квітня 2014р., м.Київ, ПБФ НТУУ "КПІ", 2014. С.182-183.

Надійшла (Received) 23.10.2024

Прийнята до друку (accepted for publication) 11.11.2024

Відомості про авторів / About the authors

Горкунов Борис – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", E-mail: borys.horkunov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8175-858X>

Gorkunov Boris – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department Information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" E-mail: borys.horkunov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8175-858X>

Львов Сергій – Кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри інформаційно-вимірювальних технологій і систем, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", E-mail: , serhii.lvov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3830-0570>

Lvov Serhii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department Information and measuring technologies and systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute" E-mail: serhii.lvov@khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3830-0570>

Олійник Василь – аспірант кафедри Інформаційно- вимірювальних технологій і систем Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», E-mail: oleynikwasya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3568>

Oliinyk Vasyly – PhD student, Department of Information and Measurement Technologies and Systems, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute," Email: oleynikwasya@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7582-3568>

Вевенко Віталій – Аспірант кафедри Інформаційно- вимірювальних технологій і систем Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", E-mail: Vitalii.Vevenko@cit.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9589-0287>

Vevenko Vitaliy – PhD student, Department of Information and Measuring Technologies and Systems National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", E-mail: Vitalii.Vevenko@cit.khpi.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-9589-0287>

Expansion of the functional capabilities of electromagnetic methods and devices for monitoring mechanical stresses in metal cylindrical products

Boris Gorkunov, Lvov Serhii, Vasyli Oliinyk, Vevenko Vitaliy

Abstract

This study addresses the theoretical foundations and the implementation algorithm of a differential transformer electromagnetic overlay transducer designed for monitoring variations in the electromagnetic parameters of a ferromagnetic shaft subjected to torque. An experimental setup was created, and the transducer's characteristics for amplitude, phase, and variable-frequency control methods were obtained. The obtained dependencies show that using the differential method, magnetic permeability and magnetizing current frequency serve as informative parameters, being the most sensitive to changes in mechanical loads on the cylindrical product. It has been established that such a system has high resolution and expanded functional capabilities.

Key words: torque, diagnostics, electromagnetic method, transformer electromagnetic converter, differential method, transformation functions.