

УДК 531.7

В.Ю. Ларін, д.т.н.

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ПРИНЦИПУ ДІЇ ФЕРОМАГНІТНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА МЕХАНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

Національний авіаційний університет, м. Київ, vjlarin@gmail.com

В статті за допомогою векторних діаграм дано теоретичне обґрунтування принципу дії феромагнітного перетворювача. Показано поведінку сумарних векторів індукції доменів пластин матеріалу чутливого елемента перетворювача при дії на них зовнішньої сили, що пояснює поведінку гармонік вихідного сигналу перетворювача.

### Вступ

Для побудови первинних перетворювачів с потрібною чутливістю, ідентичними характеристиками перетворення та високими метрологічними характеристиками потрібне глибоке розуміння процесів, які відбуваються в матеріалі з якого створені чутливі елементи перетворювачів. Феромагнітні перетворювачі (ФомП) мають свою назву завдяки латинському слову «ferrum» («залізо»), яке входить до складу чутливих елементів будь-якого з подібних феромагнітних перетворювачів [1].

**Аналіз існуючих положень.** Як відомо магнітні матеріали володіють багатьма різноманітними ефектами. Це такі ефекти, як – магніторезистивні ефекти, магнітооптичні ефекти, магніторезонансні ефекти, термомагнітні ефекти, магніострикційні та магнітопружні ефекти. Кожен з перелічених ефектів дозволяє побудувати різні за своєю конструкцією та призначенням вимірювальні пристрої та перетворювачі.

Розглянемо існуюче тлумачення принципу дії ФомП який засновано на магнітопружному ефекті. Магнітопружний ефект, або ефект Віллари, це явище зміни магнітної проникності феромагнітного зразка при постійному значенні напруженості зовнішнього намагнічуючого поля при дії на зразок зовнішньої механічної сили [2].

Згідно [3] магнітопружний ефект пояснюється зміною доменної структури, тобто зростанням об'єму тих доменів магнітного матеріалу, енергія яких знижується при дії механічних напруг. Це відбувається в феромагнітному зразку, крива намагнічування якого знаходиться у так званій зоні зсуву доменних границь, яка визначена у теорії Кондорського. Але кількісну оцінку цього явища виконати дуже складно з багатьох причин [3]. Крім того, згідно цієї теорії зсув доменних границь відбувається при зростанні зовнішнього поля до значення індукції насичення. Відповідно до цього, ефект Віллари не відбуватимуться в зразку, який знаходиться під дією змінної зовнішньої механічної напруги, а величина зовнішнього поля є константою  $H_{зон} = const$ . Але це не відповідає дійсності.

Тому виникає потреба в більш точному тлумаченні цього явища. Відомо, що магнітний момент атома  $M$  внаслідок гіромагнітної аномалії спіна не буде антипаралельним повному механічному моменту  $P$ . Це показано на рис.1 де  $|M|$  не лежить в одній площині із  $|P_J|$  [4].

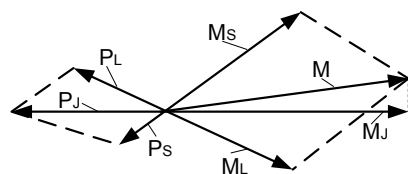


Рис. 1. Додавання магнітних і механічних моментів електронної оболонки атома

Складові  $M_L$  і  $M_S$  магнітного моменту прецесують навкруги напрямку  $P_J$ . При цьому перпендикулярні до  $P_J$  складові моментів у середньому за період обертання дорівнюють нулю, оскільки вони безперервно змінюють свій напрям, і повний магнітний момент  $M_J$  електронної оболонки атома визначається паралельними до  $P_J$  складовими моментів, тобто

$$M_J = M_S \cos(P_S, P_J) + M_L \cos(P_L, P_J).$$

Було висунуто гіпотезу, яка обумовлює принцип дії ФомП [5]: зміна вектора механічних моментів атомів, які складають домени матеріалу ФомП, що обумовлена зовнішньою механічною напругою, викликає пропорційну гіромагнітному відношенню зміну векторів магнітних моментів спінів цих атомів.

**Мета дослідження.** Виконати теоретичне обґрунтування принципу дії феромагнітного перетворювача сил, яка пояснює поведінку гармонік вихідного сигналу перетворювача і у такій спосіб розвинути теоретичні положення феромагнетизму в області магнітопружних ефектів.

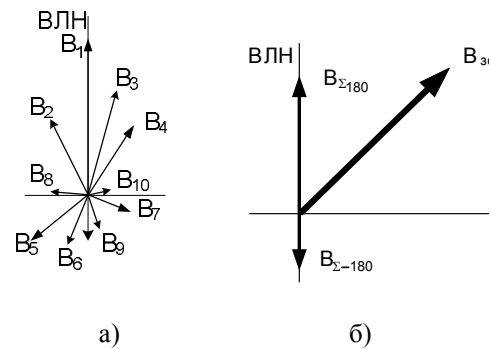
**Викладення основного матеріалу.** Оберемо ізотропну структуру чутливого елемента (ЧЕ)

ФоМП, тобто кожна парна феромагнітна пластина в пакеті пластин ЧЕ, повернена на  $90^\circ$  відносно непарної, тоді сумарний вектор вісі легкого намагнічування (ВЛН) непарних пластин розташовуватиметься вертикально (вертикальні пластини), а парних – горизонтально (горизонтальні пластини). Розташовуючи вісь обмотки живлення перетворювача під кутом  $45^\circ$  до ВЛН обох (парного та непарного) наборів пакету пластин, забезпечується рівноімовірна можливість зміни сумарного вектора магнітної індукції при дії на ФоМП зовнішньої напруги.

При відсутності зовнішнього поля має місце рівноімовірне розташування магнітних моментів доменів - певна частина векторів магнітних моментів доменів (рис. 2а) будуть співпадати з напрямом ВЛН (вектор  $B_1$ ), інші магнітні моменти не співпадатимуть з напрямом ВЛН (вектори  $B_2 - B_{10}$ ). Внаслідок цього феромагнітний зразок, як відомо, знаходиться в розмагніченому стані.

При появі зовнішнього поля феромагнітний зразок переводиться в зону лінійної ділянки кривої намагнічування. Вектор індукції  $B_{зовн}$  цього поля направлений під кутом  $45^\circ$  по відношенню до ВЛН, і розташування магнітних моментів змінюється (рис. 2б).

Домен, магнітні моменти яких до появи поля були розташовані під деяким кутом до ВЛН, змінюють свій напрям і шикуються по вісі, утворюючи два сумарні антипаралельні вектори з  $180^\circ$  сусідством –  $B_{\Sigma 180}$  і  $B_{\Sigma -180}$ . Кількісно ці вектори не будуть рівні один одному, оскільки кількість доменів, вектор індукції яких направлений по напрямку зовнішнього поля, буде іншим, чим доменів, вектор індукції яких направлений протилежно полю.



а) б)  
Рис. 2. Вектори магнітних моментів феромагнітного зразка: а) – при відсутності зовнішнього поля і б) – зміна розташування магнітних моментів при дії зовнішнього поля

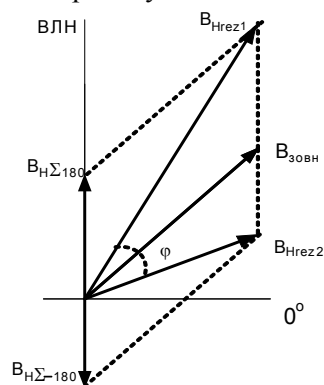


Рис. 3. Поведінка векторів магнітних моментів доменів горизонтальних пластин при відсутності зовнішньої сили

Розглянемо поведінку векторів магнітних доменів горизонтальних пластин, в яких вектор зовнішньої сили буде направлений паралельно ВЛН. Між власним магнітним вектором доменів  $B_{H\Sigma 180}$  і вектором, викликаним зовнішнім полем  $B_{зовн}$  буде розташований результуючий вектор – позначимо його  $B_{Hrez1}$ . Між другим власним магнітним вектором із антипаралельних доменів  $B_{H\Sigma -180}$  і вектором зовнішнього поля  $B_{зовн}$  також буде результуючий вектор – позначимо його  $B_{Hrez2}$  (рис. 3).

Під дією на ЧЕ зовнішньої сили відбувається деформація кристалічних ґраток феромагнітного матеріалу і його доменів – домен, розташований перпендикулярно дії вектора сили, стискаються впоперек і домен подовжується, таким чином, збільшується його механічний момент. Згідно відомому факту зв'язку механічного і магнітного моментів відбувається зміна і магнітного моменту. Якщо механічний момент збільшується то і магнітний момент також збільшується пропорційно силі, що діє на зразок. На відміну від відомих теоретичних положень, висунуто припущення, що ця силова дія викликає певний нахил вісі намагнічування. Таким чином, вектор  $B_{H\Sigma 180}$  збільшиться на величину  $B_1(F)$ , а вектор  $B_{H\Sigma -180}$  збільшиться на величину  $B_2(F)$ , причому  $B_1(F) \neq B_2(F)$ , що викличе збільшення і сумарних результуючих векторів  $B_{Hrez1}$  та  $B_{Hrez2}$  для горизонтальних пластин ФоМП. З урахуванням висунутого припущення про нахил ВЛН по якій орієнтовані вектори  $B_{H\Sigma 180}$  та  $B_{H\Sigma -180}$ , а також враховуючі те, що вектор зовнішнього поля залишається постійним і по рівню, і по напрямку, то зміниться кут між сумарними векторами на деяку величину  $\nu$  у бік збільшення (рис. 4). При збільшенні навантаження збільшуються власні магнітні вектори доменів, і відбувається ще більший нахил ВЛН. Внаслідок чого збільшуються і сумарні вектори –  $B_{Hrez1}$  та  $B_{Hrez2}$  і кут між ними. Цей факт добре підтверджується експериментом.

Розглянемо, (рис. 5) що відбувалося б під впливом сили при слідуванні існуючим теоретичним обґрунтуванням магнітопружних ефектів, тобто, якби б не відбувався нахил векторів  $B_{H\Sigma 180}$  та  $B_{H\Sigma -180}$ . При збільшенні сили вектор  $B_{Hrez1}$  збільшується, кут також збільшується, а вектор  $B_{Hrez2}$  зменшується. Вихідний сигнал горизонтальних пластин, який є

наведеною е.р.с., зніматиметься з вертикальної обмотки, оскільки вектори індукції і індукованої напруги розташовані під кутом  $90^\circ$  один до одного. Оскільки наведена е.р.с. залежить від

характеру зміни індукції, то можна сказати, що вихідний електричний сигнал міститиме дві складові, нерівні по величині і зсунені по відношенню одна до одної на певний кут. При збільшенні навантаження, обидві складові збільшуватимуться, оскільки їх початкові значення не були рівні, то і швидкість їх зміни при навантаженні також буде неоднаковою, і кут між цими складовими також збільшуватиметься.

Сумарні вектори  $B_{Hrez1}$  і  $B_{Hrez2}$  знаходяться під певним кутом  $\varphi$  по відношенню один до одного. Оскільки присутні два вектори, то у вихідному індукованому електричному сигналі також будуть присутні дві складові, які спотворюватимуть його синусоїдальну форму.

Досліджено поведінку векторів вертикальних пластин, для яких вектор зовнішньої сили буде розташований в тому ж напрямку що і ВЛН їх доменів. Тоді при відсутності сили векторна діаграма виглядатиме таким чином (рис. 6). При дії сили на вертикальні пластини зменшуються і сумарні вектори  $B_{Vrez1}$  та  $B_{Vrez2}$  на величини  $B_3(F)$  та  $B_4(F)$  відповідно, кут  $\psi$  між сумарними векторами зменшується на величину  $\lambda$ , що також підтверджується експериментом (рис. 3б).

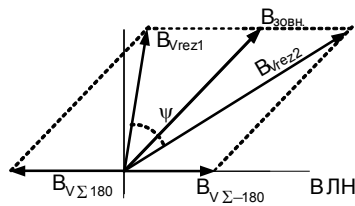


Рис. 6. Поведінка векторів магнітних моментів доменів вертикальних пластин ЧЕ при відсутності зовнішньої сили

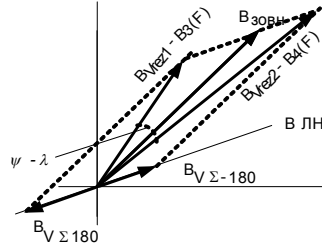


Рис. 7. Поведінка векторів магнітних моментів доменів вертикальних пластин ЧЕ при дії на ЧЕ зовнішньої сили при нахилі ВЛН

збільшуватимуться, оскільки їх початкові значення не були рівні, швидкість їх зміни при навантаженні також буде неоднаковою, кут між цими складовими також збільшуватиметься.

**Висновок.** За допомогою векторних діаграм роз'яснено поведінку доменів матеріалу чутливого елемента, що дає змогу надати уточнений принцип дії ферромагнітного перетворювача механічних величин.

### Список літературних джерел

1. Ларин В. Ю. Основы построения приборов и систем с ферри и ферромагнитными преобразователями / Виталий Юрьевич Ларин. – Донецк : Вебер, 2007. – 367 с.
2. Вонсовский С. В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримагнетиков / С. В. Вонсовский. – М. : Наука, 1971. – 1032 с.
3. Физическая энциклопедия / [под ред. А.М. Прохорова]. – М. : Советская энциклопедия, 1988. – 1530 с.
4. Преображенский А. А. Магнитные материалы и элементы : [учебник для студ. вузов по спец. «Полупроводники и диэлектрики»] / А. А. Преображенский, Е. Г. Бишард. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высшая школа, 1986. – 352 с.
5. Ларин В.Ю. Принципы построения ферромагнитных преобразователей типа ФоМП / В.Ю. Ларин // Наукові праці Донецького національного технічного університету – 2009. – Вип. 176. – С. 127–135.

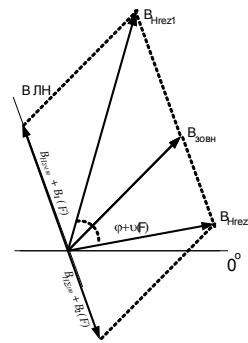


Рис. 4. Поведінка векторів магнітних моментів доменів горизонтальних пластин при дії на ЧЕ зовнішньої сили при нахилі ВЛН

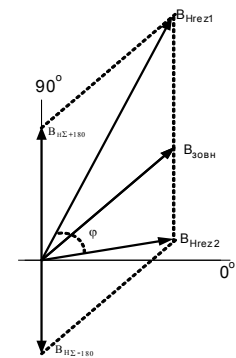


Рис. 5. Поведінка векторів магнітних моментів доменів горизонтальних пластин при дії на ЧЕ зовнішньої сили без нахилу ВЛН