



СТРУКТУРА ТА КАЛІБРУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНО ІНТЕГРОВАНИХ ПРИСТРОЇВ МАГНІТНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЕРМОЯДЕРНИХ РЕАКТОРІВ

І. Большакова, Г. Барило, Р. Голяка, Т. Марусенкова, Ф. Шурігін

Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, 79013, Україна

Відповідальний за рукопис: Роман Голяка (e-mail: roman.l.holiaka@lpnu.ua).

(Подано 13 червня 2022)

Розглянуто проблематику побудови засобів магнітної діагностики плазми в термоядерних реакторах наступного покоління. На основі проведеного аналізу запропоновано новий підхід до реалізації функціонально інтегрованих пристроїв вимірювання магнітного поля у таких реакторах, новизною яких є поєднання сенсорів Холла та індукційних котушок. Такий підхід забезпечує періодичне in-situ самокалібрування сигнальних трактів, а відтак підвищення точності пристроїв магнітної діагностики в жорстких умовах експлуатації. Подано результати розроблення апаратно-програмної системи, основними компонентами якої є 3D-зонд, що поєднує сенсори Холла та індукційні котушки, аналоговий фронт-енд сигнального перетворення та програмні засоби подальшого цифрового перетворення сигналів. Відповідно до концепції злиття даних подано структуру та послідовність калібрування функціонально інтегрованих пристроїв магнітної діагностики термоядерних реакторів, а також програмне забезпечення для аналізу шумових стохастичних процесів вимірювальних кіл на основі дисперсій Аллана.

Ключові слова: сенсор; магнітне поле; інтегрування сенсорів; злиття даних; калібрування.

УДК: 621.382

1. Вступ

На сьогоднішньому етапі розвитку світова енергетика наблизилась до практичного використання енергії термоядерного синтезу із магнітним утриманням плазми. Для цього в провідних наукових центрах світу проєктують та споруджують потужні експериментальні реактори нового покоління, зокрема ITER (Франція), JT60SA (Японія), DEMO (ЄС). Однією з визначальних проблем успішної роботи цих реакторів є високоточне вимірювання магнітних полів (магнітна діагностика) плазми термоядерного синтезу, що необхідно для керування характеристиками плазми, зокрема утримання її меж на безпечній відстані від елементів конструкції [1]. Однак проблеми спричиняє наявність інтенсивних потоків нейтронів, гамма-квантів та високих температур у місцях розміщення сенсорів магнітного поля. Крім того, через необхідність використання довгих ліній зв'язку доводиться застосовувати спеціальні завадостійкі методи обробки сигналів.

У термоядерних реакторах попередніх поколінь, де імпульси горіння плазми тривають декілька секунд, магнітна діагностика здійснюється за допомогою індукційних котушок (pick-up

coils), які за фізичною структурою основані на металах, а отже, забезпечують високу радіаційну та термічну стійкість. Вихідний сигнал цих індукційних котушок пропорційний до швидкості зміни магнітного поля, тому для визначення абсолютних значень магнітного поля необхідно застосувати сигнальні перетворювачі інтегрувального типу. Проте установки типу ITER та DEMO працюватимуть у стаціонарному режимі (steady-state), в якому тривалість імпульсів горіння плазми може сягати сотень годин. Таке тривале інтегрування призводить до накопичення великих похибок через наявність у сигнальних перетворювачах паразитних сигналів (завад), пов'язаних із радіаційно стимульованими ефектами в котушках та лініях зв'язку. Науковці працюють над підвищенням точності сигнального перетворення інтегрувального типу для ITER та оптимізації відповідних апаратно-програмних фільтрів [2]. Проте отримані результати поки що не дають змоги повністю усунути вищезгадані завади. Відтак, в ITER та DEMO додатково будуть використані вимірювальні системи на основі радіаційно стійких сенсорів Холла, інформативний сигнал яких безпосередньо визначається абсолютним значенням індукції магнітного поля з відсутністю накопичення похибки тривалого інтегрування сигналу.

Автори цієї праці вже багато років розробляють радіаційно стійкі сенсори Холла на основі різних напівпровідникових матеріалів. За цим напрямом виконано низку міжнародних та вітчизняних проєктів, в межах яких, окрім сенсорів, також були створені нові методи і обладнання для їх in-situ дослідження під час опромінення нейтронами в дослідницьких ядерних реакторах. На основі сенсорів Холла розроблено та виготовлено спеціальні пристрої завадостійкого сигнального перетворення, призначені для використання у системах магнітної діагностики плазми експериментальних термоядерних реакторів. Окрім оптимізації технології виготовлення радіаційно стійких сенсорів, також вирішуються питання підвищення стабільності магнітовимірювальних систем на їх основі, яка в умовах термоядерних реакторів може неконтрольовано змінюватися через дію на сенсори та лінії зв'язку електромагнітних завад, інтенсивних радіаційних та теплових потоків. Для вирішення цієї проблеми автори запропонували новий метод, що ґрунтується на функціональній інтеграції різних за принципом дії первинних вимірювальних перетворювачів магнітного поля – сенсорів Холла та індукційних котушок. На цей метод автори проєкту Р. Л. Голяка та І. А. Більшакова отримали патенти на винахід в Україні (82496), Великобританії (GB2427700) та Франції (FR 2 887 991 B1).

2. Основна концепція та аналіз проблеми

Основна концепція викладених у цій статті результатів розроблення пристроїв магнітної діагностики термоядерних реакторів ґрунтується на забезпеченні високої температурної та радіаційної стабільності вимірювальних трактів сенсорів у жорстких умовах експлуатації з можливістю їх періодичного in-situ калібрування. Реалізується in-situ калібрування тестовим методом – формуванням за допомогою невеликої котушки (соленоїда) тестового магнітного поля відомої величини та вимірювання сигналу сенсора Холла, що зумовлений цим тестовим полем. За результатами вимірювання тестового сигналу коригують коефіцієнти функції перетворення вимірювального пристрою.

Методологічною основою підвищення точності функціональної інтеграції, що великою мірою визначає новизну цієї роботи, є in-situ калібрування та аналіз характеру шумів. Зважаючи на результати такого вимірювання, передбачається можливість оптимізувати процеси селекції інформативних складових сигналів [3]. Запропонований в роботі підхід відповідає новітнім напрямам розвитку інформаційно-вимірювальної техніки та інтелектуальної сенсорики, зокрема, концепції злиття даних вимірювання (Measurement Data Fusion) [4], або, як її прийнято називати в сенсорній техніці, – злиття сенсорів (Sensor Fusion) [5]. Нині у світі за цим напрямом здійснюються дослідження та розробки з оптимізації фільтрів корисних сигналів на основі аналізу шумових стохастичних процесів (Stochastic Compressive Data Gathering) [6] та колірності шуму (Filtering With

Colored Process Noise) [7]. Найпоширеніший метод аналізу шумових процесів, за допомогою якого визначають колір шуму та домінуючі механізми нестабільності вимірювання, ґрунтується на аналізі дисперсій Аллана (Allan Variance) [8]. Здебільшого використовують різноманітні варіації адаптивних фільтрів Калмана (Kalman Filter) [9]. У сучасній сенсорній техніці, й, зокрема, відповідно до технологій Інтернету речей, основні вузли сигнального перетворення отримали назву “аналоговий фронт-енд” (Analog Front-End) [10]. Попередні результати авторів цієї статті в галузі магнітної діагностики плазми в термоядерних реакторах наведено в роботах [11, 12].

Із урахуванням аналізу проблем магнітної діагностики плазми в термоядерних реакторах та вищезгаданого підходу реалізації функціонально інтегрованих пристроїв у цій статті викладено подальші результати розроблення цих пристроїв. Основними структурними компонентами описаної в статті апаратно-програмної системи є 3D-зонд, що поєднує сенсори Холла та індукційні котушки, аналоговий фронт-енд сигнального перетворення та програмні засоби подальшого цифрового перетворення із використанням концепції злиття сенсорів та аналізу шумових стохастичних процесів на основі дисперсій Аллана. Деталізовано питання калібрування функціонально інтегрованих пристроїв.

3. Структура та режими функціонування

Структуру розробленої апаратно-програмної системи магнітної діагностики термоядерних реакторів наведено на рис. 1. До її складу входять 3D-зонд (3D probe), аналоговий фронт-енд (Fnalog Front-End) та засоби цифрового перетворення сигналу (ADC & Soft).

До складу кожного 3D-зонда (рис. 2) входять три ортогонально розташовані сенсори Холла (HG) – HG_X , HG_Y , HG_Z , кожний із яких розміщено у відповідних трьох котушках (Coil) – CL_X , CL_Y , CL_Z , сенсор температури D_T , монтажна плата (PCB) та корпус (Case). Сенсори Холла формують вихідні напруги V_{HG_X} , V_{HG_Y} , V_{HG_Z} , пропорційні до відповідних складових індукції магнітного поля B_X , B_Y , B_Z .

Котушки виконують дві функції. У режимі вимірювання змін магнітного поля (режим pick-up) котушки формують напруги V_{CL_X} , V_{CL_Y} , V_{CL_Z} , які є пропорційними до відповідних складових швидкості зміни індукції магнітного поля ΔB_X , ΔB_Y , ΔB_Z . У режимі калібрування ці котушки створюють тестові магнітні поля B_{0X} , B_{0Y} , B_{0Z} величиною приблизно 5 мТ (за струму живлення приблизно 20 мА). Ці тестові магнітні поля не залежать від дози радіації, тому їх можна використовувати для періодичного визначення чутливості сенсорів Холла. Датчик температури D_T (зокрема на радіаційно стабільній діодній структурі) забезпечує вимірювання температури зонда, значення якої використовується для корекції результатів вимірювання із урахуванням температурних змін параметрів сенсорів Холла та котушок.

Основні вузли аналогового фронт-енду такі:

CS_{HG} – джерело DC струму живлення сенсорів Холла;

CS_{CX} , CS_{CY} , CS_{CZ} – джерела AC струму живлення котушок;

CS_T – джерело DC струму діода;

A_{HX} , A_{HY} , A_{HZ} – диференційні підсилювачі сигналів сенсорів Холла;

A_{CX} , A_{CY} , A_{CZ} – диференційні підсилювачі сигналів котушок;

A_T – диференційний підсилювач сигналу діода;

SD_{HX} , SD_{HY} , SD_{HZ} – синхронні детектори сигналів тестового поля;

SW_{HX} , SW_{HY} , SW_{HZ} , SW_{CX} , SW_{CY} , SW_{CZ} – ключі режимів роботи;

ST – стабілізатор напруги живлення +5 V;

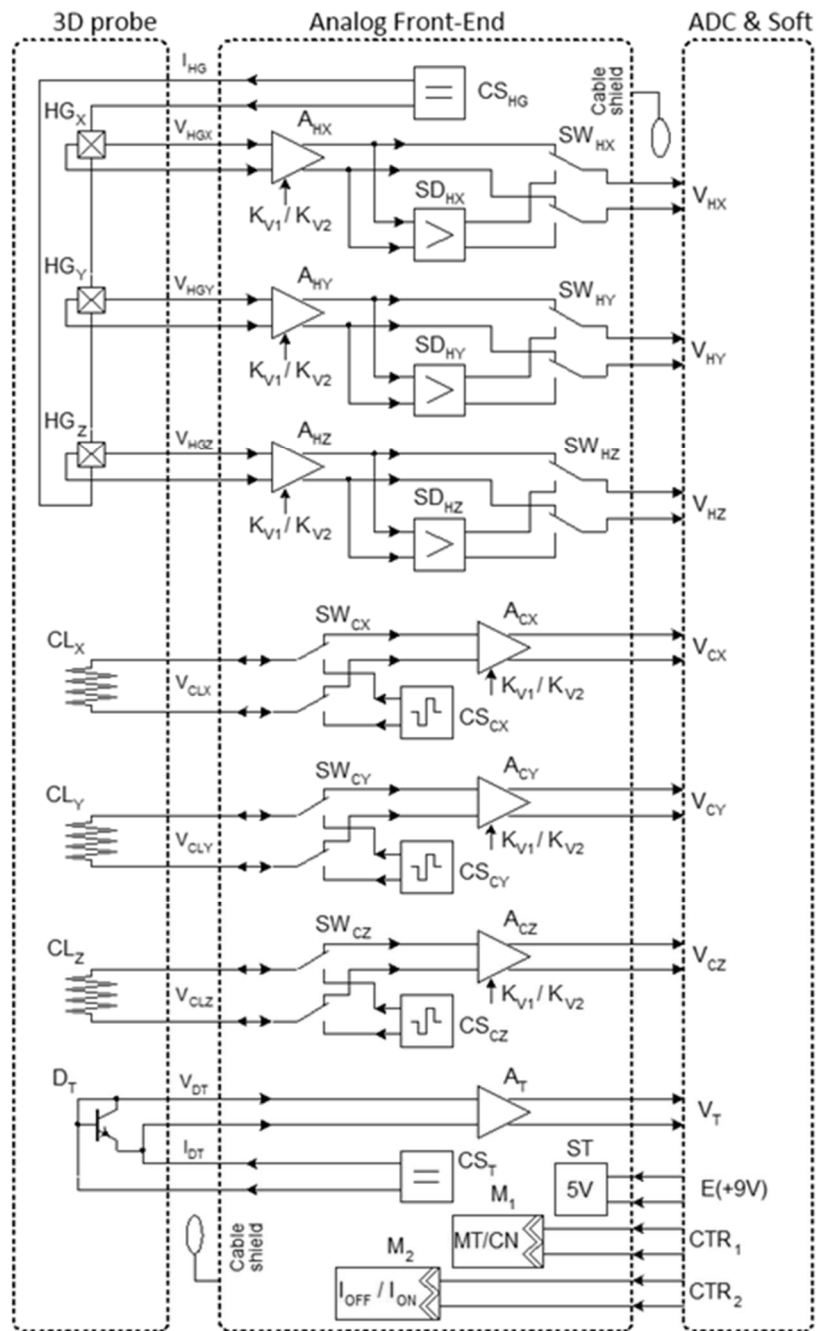


Рис. 1. Структура системи магнітної діагностики

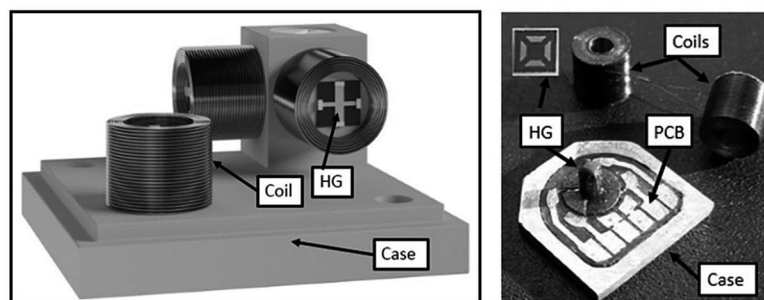


Рис. 2. Спрощений вигляд та фотографія компонентів 3D-зонда

M_1 – контролер режиму функціонування “вимірювання – калібрування”;

M_2 – контролер режиму живлення сенсорів Холла “ON – OFF”.

Вихідними сигналами аналогового фронт-енду є:

V_{HX}, V_{HY}, V_{HZ} – напруги сенсорів Холла (B-Channel);

V_{CX}, V_{CY}, V_{CZ} – напруги котушок (C-Channel);

V_T – напруга на діоді (T-Channel).

Діапазон синфазної складової вихідних сигналів $(0 \div 5) V$, діапазон диференційної складової вихідних сигналів $\pm 5 V$. Підсилювачі диференційних напруг $V_{HX}, V_{HY}, V_{HZ}, V_{CX}, V_{CY}, V_{CZ}$ мають два коефіцієнти підсилення $K_{V1} = 10, K_{V2} = 100$. Коефіцієнти підсилення вибирають незалежно для кожного підсилювача. Це дає змогу вибрати один із двох діапазонів вимірювання магнітного поля, наприклад, перший – $B < 0.2T$, другий – $B < 2T$. Керування режимами роботи блока електроніки забезпечується логічними сигналами $V_{LOW} < 1V, V_{HIGH} > 4.5V, I_{HIGH} < 10mA$:

CRT_1 – керування режимом функціонування “вимірювання – калібрування”;

CRT_2 – керування струмом живлення сенсорів Холла “ON – OFF”.

Система діагностики функціонує у двох режимах:

“Вимірювання” – $CRT_1 = LOW$;

“Калібрування” – $CRT_1 = HIGH$.

Передбачена можливість керувати струмом живлення сенсорів Холла:

“I_{HG}-OFF” – $CRT_2 = LOW$;

“I_{HG}-ON” – $CRT_2 = HIGH$.

У режимі “Вимірювання” (B-Channel) в реальному часі вимірюють три складові індукції магнітного поля B_X, B_Y, B_Z з частотою аналого-цифрового перетворення 5 kHz або 10 kHz. Інформаційними сигналами цього режиму є вихідні напруги: $V_{HMX} = V_{HGX} \cdot K_{Vi}, V_{HMY} = V_{HGY} \cdot K_{Vi}, V_{HMZ} = V_{HGZ} \cdot K_{Vi}$, де $V_{HGX}, V_{HGY}, V_{HGZ}$ – вихідні напруги сенсорів Холла; K_{Vi} – коефіцієнти підсилення диференційних підсилювачів A_{HX}, A_{HY}, A_{HZ} . Крім того, вимірюються значення зміни магнітного поля $\Delta B_X, \Delta B_Y, \Delta B_Z$, інформаційними сигналами яких є вихідні напруги: $V_{CX} = V_{CLX} \cdot K_{Vi}, V_{CY} = V_{CLY} \cdot K_{Vi}, V_{CZ} = V_{CLZ} \cdot K_{Vi}$, де $V_{CLX}, V_{CLY}, V_{CLZ}$ – вихідні напруги на котушках у режимі pick-up; K_{Vi} – коефіцієнти підсилення диференційних підсилювачів A_{CX}, A_{CY}, A_{CZ} .

Режим “Калібрування” (C-Channel) призначений для періодичного визначення чутливості сенсорів Холла, параметри яких упродовж довготривалої експлуатації в радіаційних умовах можуть частково дрейфувати. Інформаційними сигналами цього режиму є напруги: $V_{HCX} = V_{HGX}(B_{0X}) \cdot K_{VC}, V_{HCY} = V_{HGY}(B_{0Y}) \cdot K_{VC}, V_{HCZ} = V_{HGZ}(B_{0Z}) \cdot K_{VC}$, де $V_{HBX}(B_{0X}), V_{HBY}(B_{0Y}), V_{HBZ}(B_{0Z})$ – вихідні напруги сенсорів Холла за тестових полів у котушках $B_{0X}, B_{0Y}, B_{0Z}, K_{VC}$ – сумарні коефіцієнти передачі диференційних підсилювачів A_{HX}, A_{HY}, A_{HZ} та синхронних детекторів $SD_{HX}, SD_{HY}, SD_{HZ}$ (типове значення $K_{VC} \approx 1000$, що за $B \approx 5mT$ та чутливості сенсорів Холла $S_B \approx 100mV/T$ забезпечує вихідний сигнал блока електроніки $V_{HCX} \approx V_{HCY} \approx V_{HCZ} \approx 0.5V$).

Принципово важливо те, що в режимі “Калібрування” значення зовнішніх магнітних полів B_X, B_Y, B_Z , за яких виконують такі вимірювання, не впливають на напруги $V_{CHX}, V_{CHY}, V_{CHZ}$. Це реалізується синхронними детекторами, які виділяють сигнали, зумовлені АС тестовим магнітним

полем котушок, від сигналів, створюваних DC зовнішніми магнітними полями. Режим І_{НС}-OFF призначений для вимірювання рівня електромагнітних завад. У всіх режимах здійснюють вимірювання температури (Т-Channel), інформаційним сигналом якої є напруга $V_T = V_{DT} \cdot K_{VT}$, де V_{DT} – напруга на діоді D_T , K_{VT} – коефіцієнт підсилення диференційного підсилювача A_T . Контролери M_1 та M_2 мають вбудовані елементи гальванічної розв'язки.

4. Алгоритм оброблення даних та аналізу шумових стохастичних процесів

Параметри кожного каналу вимірювання системи магнітної діагностики описуються масивом 32 коефіцієнтів калібрування (див. таблицю).

Масив коефіцієнтів калібрування

| Параметр моделі | | α | A_0 |
|-----------------|----------------------------|----------------------|-----------------|
| 1 | T-channel | $\alpha_T[\#]$ | $V_{T0}[\#]$ |
| 2 | C-Channel X | $\alpha_C[\#X]$ | $V_{C0}[\#X]$ |
| 3 | C-Channel Y | $\alpha_C[\#Y]$ | $V_{C0}[\#Y]$ |
| 4 | C-Channel Z | $\alpha_C[\#Z]$ | $V_{C0}[\#Z]$ |
| 5 | B-Channel X @ KL for V_0 | $\alpha_{V0@L}[\#X]$ | $V_{00@L}[\#X]$ |
| 6 | B-Channel X @ KL for K_B | $\alpha_{KB@L}[\#X]$ | $K_{B0@L}[\#X]$ |
| 7 | B-Channel Y @ KL for V_0 | $\alpha_{V0@L}[\#Y]$ | $V_{00@L}[\#Y]$ |
| 8 | B-Channel Y @ KL for K_B | $\alpha_{KB@L}[\#Y]$ | $K_{B0@L}[\#Y]$ |
| 8 | B-Channel Z @ KL for V_0 | $\alpha_{V0@L}[\#Z]$ | $V_{00@L}[\#Z]$ |
| 10 | B-Channel Z @ KL for K_B | $\alpha_{KB@L}[\#Z]$ | $K_{B0@L}[\#Z]$ |
| 11 | B-Channel X @ KH for V_0 | $\alpha_{V0@H}[\#X]$ | $V_{00@H}[\#X]$ |
| 12 | B-Channel X @ KH for K_B | $\alpha_{KB@H}[\#X]$ | $K_{B0@H}[\#X]$ |
| 13 | B-Channel Y @ KH for V_0 | $\alpha_{V0@H}[\#Y]$ | $V_{00@H}[\#Y]$ |
| 14 | B-Channel Y @ KH for K_B | $\alpha_{KB@H}[\#Y]$ | $K_{B0@H}[\#Y]$ |
| 15 | B-Channel Z @ KH for V_0 | $\alpha_{V0@H}[\#Z]$ | $V_{00@H}[\#Z]$ |
| 16 | B-Channel Z @ KH for K_B | $\alpha_{KB@H}[\#Z]$ | $K_{B0@H}[\#Z]$ |

Температурні залежності вимірюваних величин A_{MT} апроксимуються виразами

$$A_{MT} = A_{T0}(1 + \alpha_A T),$$

де A_{T0} , α_A – коефіцієнти лінійної апроксимації; T – температура, °С.

Під час калібрування коефіцієнти A_{MT} , α_A визначають на основі вимірювань значення A_{MT} за двох температур T_1 , T_2 (наприклад, $T_1 = 25^\circ\text{C}$, $T_2 = 100^\circ\text{C}$):

$$\begin{cases} A_{MT1} = A_{T0} \cdot (1 + \alpha_A \cdot T_1) \\ A_{MT2} = A_{T0} \cdot (1 + \alpha_A \cdot T_2) \end{cases}$$

Після перетворень

$$\frac{A_{MT2}}{A_{MT1}} = \frac{1 + \alpha_A \cdot T_2}{1 + \alpha_A \cdot T_1}, A_{MT2} + A_{MT2} \cdot \alpha_A \cdot T_1 = A_{MT1} + A_{MT1} \cdot \alpha_A \cdot T_2$$

отримуємо формули для розрахунку коефіцієнта лінійної апроксимації

$$\alpha_A = \frac{A_{MT2} - A_{MT1}}{A_{MT1} \cdot T_2 - A_{MT2} \cdot T_1}; A_{T0} = \frac{A_{MT1}}{1 + \alpha_A \cdot T_1}$$

Розрахунок температури T_M зонда виконують за формулою

$$T_M = \frac{V_{TT} - V_{T0}}{V_{T0} \cdot \alpha_T}, \quad (1)$$

де V_{TT} – вимірне значення вихідної напруги T-channel; V_{T0} та α_T – коефіцієнти лінійної апроксимації.

Виконуючи калібрування, зонд поміщають у термостат та за двох визначених еталонним термометром температур T_1 , T_2 вимірюють вихідні напруги V_{T1} , V_{T2} T-channel. Використовуючи систему рівнянь:

$$\begin{aligned} V_{T1} &= V_{T0} \cdot (1 + \alpha_T \cdot T_1) \\ V_{T2} &= V_{T0} \cdot (1 + \alpha_T \cdot T_2) \end{aligned}$$

розраховують коефіцієнти лінійної апроксимації

$$\alpha_T = \frac{V_{T2} - V_{T1}}{V_{T1} \cdot T_2 - V_{T2} \cdot T_1}; V_{T0} = \frac{V_{T1}}{1 + \alpha_T \cdot T_1}.$$

Надалі коефіцієнти α_T та V_{T0} використовують для визначення температури зонда.

Розрахунок значення індукції магнітного поля B_R здійснюють за формулою

$$B_T = K_{BT} \cdot (V_M - V_{0T}), \quad (2)$$

де V_M – вимірне значення вихідної напруги B-channel; K_{BT} – температурозалежний коефіцієнт перетворення; V_{0T} – температурозалежне значення off-set напруги.

Температурні залежності величин K_{BT} та V_{0T} описуються виразами:

$$K_{BT} = K_{B0} \cdot (1 + \alpha_{KB} \cdot T_M), \quad (3)$$

$$V_{0T} = V_{00} \cdot (1 + \alpha_{V0} \cdot T_M), \quad (4)$$

де K_{B0} , α_{KB} , V_{00} , α_{V0} – коефіцієнти лінійної апроксимації, які визначають під час калібрування B-channel; T_M – вимірне значення температури зонда, °C.

Передбачено можливість вибору одного із двох діапазонів вимірювання магнітного поля ± 2 Т або $\pm 0,2$ Т, що забезпечується відповідним вибором коефіцієнтів підсилення K_L або K_N вихідної диференційної напруги. Тому, виконуючи калібрування, визначають два набори коефіцієнтів:

$K_{KB@L}$, $\alpha_{KB@L}$, $V_{00@L}$, $\alpha_{V0@L}$ та $K_{KB@H}$, $\alpha_{KB@H}$, $V_{00@H}$, $\alpha_{V0@H}$.

Вимірювання магнітного поля здійснюється етапами #b у такій послідовності:

#b1 – вимірюють напругу V_{TN} T-channel та за формулою (1) розраховують температуру T_N ;

#b2 – використовуючи формулу (3), розраховують температурозалежне значення коефіцієнта перетворення K_{BT} B-channel;

#b3 – за формулою (4) розраховують температурозалежне значення off-set напруги V_{0T} B-channel;

#b4 – вимірюють напругу V_M B-channel та за формулою (2) розраховують реальне значення (real value) B_R індукції магнітного поля.

Під час вимірювання магнітного поля вибирають оптимальний коефіцієнт підсилення (K_L або K_N), а у розрахунках використовують відповідний набір коефіцієнтів.

Калібрування В-channel виконується етапами #k у такій послідовності:

#k1 – зонд поміщають у нуль-камеру магнітного поля ($B = 0$);

#k2 – вимірюють значення off-set напруги В-channel V_{0T1} за температури T_{1B0} (наприклад $T_{1B0} = 25^\circ\text{C}$) та V_{0T2} за температури T_{2B0} (наприклад, $T_{2B0} = 100^\circ\text{C}$);

#k3 – використовуючи систему рівнянь

$$\begin{cases} V_{0T1} = V_{00} \cdot (1 + \alpha_{V0} \cdot T_{1B0}) \\ V_{0T2} = V_{00} \cdot (1 + \alpha_{V0} \cdot T_{2B0}) \end{cases}$$

розраховують коефіцієнти лінійної апроксимації

$$\alpha_{V0} = \frac{V_{0T2} - V_{0T1}}{V_{0T1} \cdot T_{2B0} - V_{0T2} \cdot T_{1B0}}; V_{00} = \frac{V_{0T1}}{1 + \alpha_{V0} \cdot T_{1B0}}. \quad (5)$$

#k4 – зонд разом із еталонним гауссметром встановлюють у калібрувальному електромагніті; #k5 – за температури T_{1B} (наприклад, $T_{1B} = 25^\circ\text{C}$; рівність температур $T_{1B} = T_{1B0}$ не є обов'язковою) та за двох значень індукції B_{T1} магнітного поля, які є протилежними за знаком (наприклад, $B_{T1} = 500\text{mT}$, $B_{T1} = -500\text{mT}$ для коефіцієнта підсилення K_L та $B_{T1} = 100\text{mT}$, $B_{T1} = -100\text{mT}$ для коефіцієнта підсилення K_N) вимірюють значення вихідних напруг В-channel V_{T1B+} та V_{T1B-} ; #k6 – розраховують температурозалежні значення коефіцієнта перетворення K_{VT1} (для температури T_{1B})

$$K_{BT1} = \frac{B_{T1+} - B_{T1-}}{V_{T1B+} - V_{T1B-}},$$

#k7 – за заданого значення індукції B_t магнітного поля та двох значень температури T_{1BT} , T_{2BT} (наприклад, $T_{1B} = 25^\circ\text{C}$; $T_{2B} = 100^\circ\text{C}$) вимірюють значення вихідних напруг В-channel V_{T1B} та V_{T2B} ; #k8 – розраховують температурозалежні значення off-set напруги

$$V_{0T1B} = V_{00} \cdot (1 + \alpha_{V0} \cdot T_{1B}), V_{0T2B} = V_{00} \cdot (1 + \alpha_{V0} \cdot T_{2B}),$$

#k9 – розраховують температурні коефіцієнти лінійної апроксимації

$$\alpha_{KB} = \frac{V_{BT2} - V_{BT1}}{V_{BT1} \cdot T_{2B} - V_{BT2} \cdot T_{1B}}, B_{B0} = \frac{K_{BT1}}{1 + \alpha_{KB} \cdot T_{1B}},$$

де $V_{BT1} = V_{T1B} - V_{0T1B}$; $V_{BT2} = V_{T2B} - V_{0T2B}$.

Вищенаведений процес калібрування виконують для обох значень коефіцієнтів підсилення c або K_N вихідної диференційної напруги блока електроніки.

Розрахунок температурно компенсованого значення напруги періодичного in-situ калібрування виконують за формулою

$$V_{CT} = V_{C0} \cdot (1 + \alpha_C \cdot T). \quad (6)$$

Напруги V_{CT} С-channel визначаються як різниця

$$V_{CT} = V_{CT} \cdot [I_{HG} \geq ON] - V_{CT} \cdot [I_{HG} \geq OFF],$$

де $V_{CT} \cdot [I_{HG} \geq ON]$ та $V_{CT} \cdot [I_{HG} \geq OFF]$ – відповідно, виміряне значення напруги С-channel за увімкненого та вимкненого струму живлення через сенсор Холла.

Під час калібрування виконують вимірювання вихідних напруг V_{CT} С-channel за двох температур T_1 , T_2 , які визначають за допомогою Т-channel. За результатами цих вимірювань, використовуючи систему рівнянь

$$\begin{cases} V_{CT1} = V_{C0} \cdot (1 + \alpha_C \cdot T_1) \\ V_{CT2} = V_{C0} \cdot (1 + \alpha_C \cdot T_2) \end{cases}$$

розраховують константи

$$\alpha_C = \frac{V_{CT2} - V_{CT1}}{V_{CT1} \cdot T_2 - V_{CT2} \cdot T_1}, V_{C0} = \frac{V_{CT1}}{1 + \alpha_C \cdot T_1}.$$

Під час періодичного in-situ калібрування виконують такі вимірювання та розрахунки відповідно до етапів #с:

#с1 – вимірюють напругу V_{TN} T-channel та за формулою (1) розраховують температуру T_N ;

#с2 – використовуючи формулу (6), розраховують базове температурно компенсоване значення напруги V_{CTN} C-channel;

#с3 – вимірюють реальне значення напруги V_{CTR} C-channel

$$V_{CTR} = V_{CT} [I_{HG} \geq ON] - V_{CTR} [I_{HG} \geq OFF].$$

#с4 – розраховують коефіцієнт $K_C = V_{CTR} / V_{CTN}$, який визначає відхилення реальної чутливості сенсора Холла від його базового значення. Цей коефіцієнт використовують для визначення дрейфу чутливості сенсорів Холла під дією радіації, а за необхідності – для корекції коефіцієнта перетворення K_{BT} .

Принципово важливою проблемою забезпечення точності вимірювання магнітного поля в реакторах термоядерного синтезу є високий рівень електромагнітних завад, спричинених нестабільністю плазми та струмами силових котушок стабілізації плазми. Відтак, пристрої магнітної діагностики реакторів повинні забезпечувати можливість встановлення виду цих завад та аналізу шумових стохастичних процесів. Як зазначено вище, ефективним рішенням для аналізу таких процесів, зокрема для реалізації адаптивних фільтрів Калмана, є розрахунок дисперсій Аллана (Allan Variance) [8].

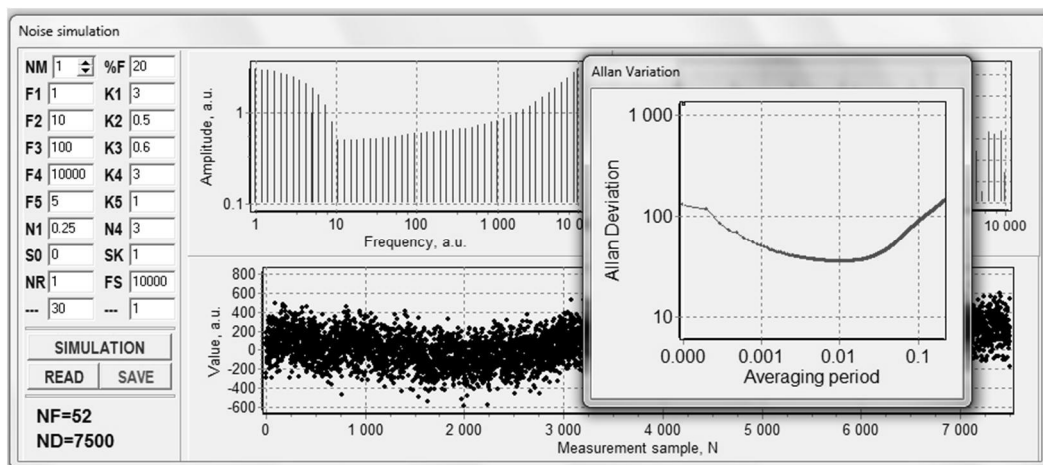


Рис. 3. Приклад використання програмного забезпечення синтезу та аналізу шумів (Noise simulation)

Дисперсія Аллана визначається вибірковою дисперсією із N вибірок з часом T між вибірками та часом спостереження τ

$$\sigma_y^2(N, T, \tau) = \frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\bar{y}_i - \frac{1}{N} \cdot \sum_{y=1}^N \bar{y}_y \right)^2,$$

$$y_n = \frac{1}{\tau} \cdot \int_{t_k}^{t_{k+1}} y(t) \cdot dt, t_{k+1} - t_k = \tau.$$

Для верифікації такого розрахунку дисперсій Аллана та апробації результатів розрахунку для оптимізації фільтрів Калмана розроблено програмне забезпечення синтезу та аналізу шумів – Noise simulation. Приклад його використання подано на рис. 3.

Алгоритм розрахунку реалізовано програмним кодом та наведено на рис. 4.

```

procedure TForm1.Allan_variance(sender: TObject)
var
i, k: integer;
thetasq: real;
pre: real;
begin
Series1.Clear;
for i:=0 to (N-1) do
begin
SumANXP[i]:=0;
Theta[i]:=0;
end;
Theta[0]:=TimeSeries[0];
for i:=1 to N-1 do
Theta[i]:=Theta[i-1]+TimeSeries[i];
for i:=0 to N-1 do
Theta[i]:=Theta[i]/fs;
for i:=1 to maxM do
begin
for k:=0 to (N-2*i-1) do
begin
thetasq:=(Theta[k+2*i]-2*Theta[k+i]+Theta[k]);
SumANXP[i]:=SumANXP[i]+thetasq*thetasq;
end;
pre:=Power(i/fs,2.0);
pre:=2*pre*(N-2*i);
if pre>0 then pre:=SumANXP[i]/pre;
SumANXP[i]:=Power(pre,0.5);
end;
end;
end;

```

Рис. 4. Фрагмент коду алгоритму розрахунку дисперсій Аллана

Детальніше це програмне забезпечення, зокрема алгоритм синтезу шумів, буде висвітлено в подальших публікаціях авторів.

5. Реалізація та апробація

Реалізацію дослідних зразків функціонально інтегрованих пристроїв магнітної діагностики термоядерних реакторів подано на рис. 5 (3D-зонд) та рис. 6 (плата аналогового фронт-енду). Процес керування параметрами вимірювання, зокрема, часовою роздільною здатністю, розмірами блоків, селекцією інформативної складової сигналу тощо, відображено на рис. 7. Приклад дослідження шуму з використанням дисперсії Аллана наведено на рис. 8, а один із результатів вимірювання магнітного поля в реакторі в серії імпульсів реактора JET (pulse #64418) – на рис. 9.

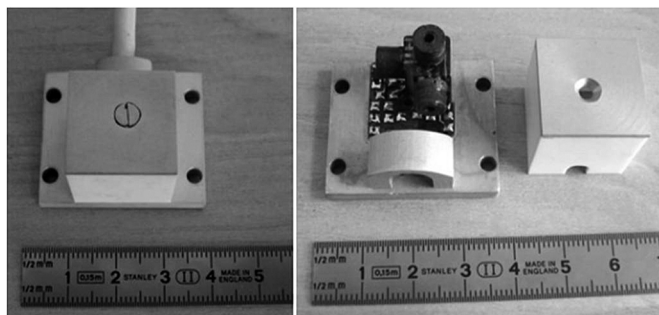


Рис. 5. Конструкція 3D-зонда

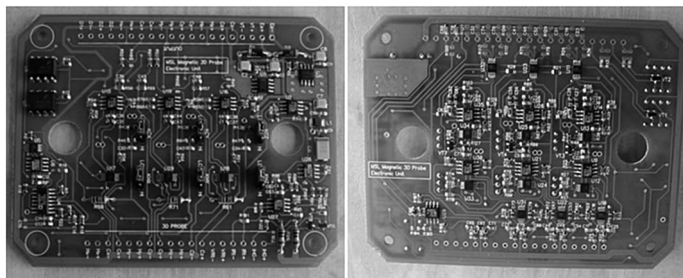


Рис. 6. Плата аналогового фронт-енду

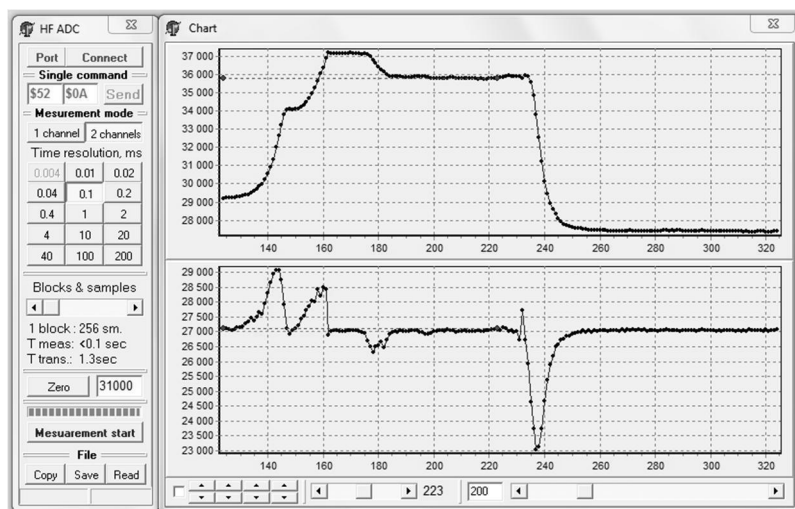


Рис. 7. Програмне забезпечення керування процесом вимірювання

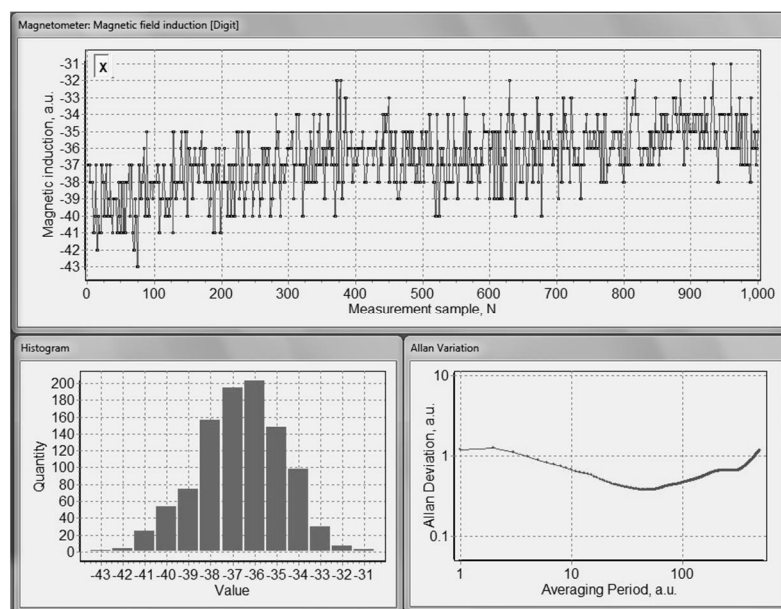


Рис. 8. Приклад дослідження шуму з використанням дисперсії Аллана

На 2022 р. шість комплектів описаних у цій роботі функціонально інтегрованих пристроїв магнітної діагностики термоядерних реакторів уже встановлено для дослідної експлуатації у реактор JET (Joint European Torus, Оксфорд, Великобританія). Тривають дослідження, під час яких накопичуються дані для подальшої оптимізації режимів адаптивних фільтрів Калмана та планування робіт щодо створення наступного покоління таких пристроїв магнітної діагностики.

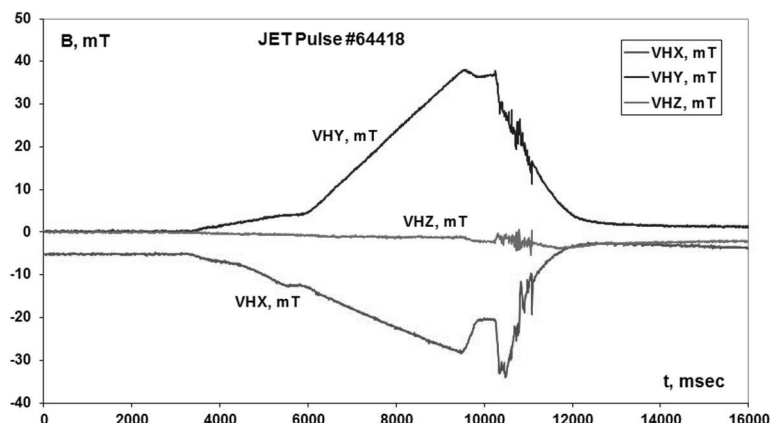


Рис. 9. Результат вимірювання магнітного поля в реакторі JET (pulse #64418)

Висновки

Проаналізовано проблематику побудови засобів магнітної діагностики плазми в термо ядерних реакторах наступного покоління, зокрема, ITER (Франція), JT60SA (Японія), DEMO (ЄС). Основна концепція результатів розроблення пристроїв вимірювання магнітного поля у цих реакторах ґрунтується на забезпеченні високої температурної та радіаційної стабільності вимірювальних трактів сенсорів у жорстких умовах експлуатації з можливістю їх періодичного in-situ калібрування. Реалізація in-situ калібрування здійснюється тестовим методом – формуванням за допомогою котушки (соленоїда) тестового магнітного поля відомої величини та вимірювання сигналу сенсора Холла, що зумовлений цим тестовим полем. За результатами вимірювання тестового сигналу коригують коефіцієнти функції перетворення вимірювального пристрою. Методологічною основою підвищення точності функціональної інтеграції є in-situ калібрування та аналіз виду шумів. Відповідно до результатів такого вимірювання передбачено можливість оптимізувати процеси селекції інформативних складових сигналів.

Основними структурними компонентами запропонованої апаратно-програмної системи є 3D-зонд, що поєднує сенсори Холла та індукційні котушки, аналоговий фронт-енд сигнального перетворення та програмні засоби подальшого цифрового перетворення із використанням концепції злиття сенсорів та аналізу шумових стохастичних процесів. Деталізуються питання калібрування функціонально інтегрованих пристроїв. Надано програмне забезпечення для вимірювання магнітних полів, in-situ калібрування та аналізу виду нестабільності вимірювальних трактів із використанням дисперсії Аллана.

На 2022 р. шість комплектів описаних у цій роботі функціонально інтегрованих пристроїв магнітної діагностики термоядерних реакторів встановлено для дослідної експлуатації у реактор JET (Joint European Torus, Оксфорд, Великобританія).

Список використаних джерел

- [1] Peruzzo S., Brombin M., Furno Palumbo M., [et al.]. (2016), “Progress in the design and testing of in-vessel magnetic pickup coils for ITER”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 44, No. 9, pp. 1704–1710. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2016.2580380>.
- [2] Zhang Z., Fu P., Gao G., [et al.]. (2018), “A Rogowski digital integrator with comb filter signal processing system”, *IEEE Transactions on Plasma Science*. Vol. 46, No. 5. pp. 1338–1343. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2815699>.
- [3] Vyhnánek J., Ripka P. (2017), “Experimental comparison of the low-frequency noise of small-size magnetic sensors” *IEEE Transactions on Magnetics*. Vol. 53, No. 4, pp. 4001304 (4 p.). DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2016.2633398>.

- [4] He X., Wang T., Liu W., Luo T. (2019), "Measurement data fusion based on optimized weighted least-squares algorithm for multi-target tracking", *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 13901–13916. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2894641>.
- [5] Nemec D., Janota A., Hrubos M., Simak V. (2016), "Intelligent real-time MEMS sensor fusion and calibration", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 16, No. 19, pp. 7150–7160. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2597292>.
- [6] J. Huang, B., Soong H. (2019), "Cost-aware stochastic compressive data gathering for wireless sensor networks", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, pp. 1525–1533. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2018.2887091>.
- [7] Shmaliy Y., Zhao S., Ahn C. K. (2019), "Optimal and unbiased filtering with colored process noise using state differencing", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol. 26, No. 4, pp. 548–551. DOI: <https://doi.org/10.1109/LSP.2019.2898770>.
- [8] Luo C., Casaseca-de-la-Higuera P., McClean S., [et al.] (2018), "Characterization of received signal strength perturbations using Allan variance", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. Vol. 54, No. 2, pp. 873–889. DOI: <https://doi.org/10.1109/TAES.2017.2768278>.
- [9] Cichon D., Psiuk R., Brauer H., Töpfer H. (2019) "A Hall-sensor-based localization method with six degrees of freedom using unscented Kalman filter", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, No. 7, pp. 2509–2516. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2887299>.
- [10] Jo S. H., Cho H. W., Yoo H. J. (2019), "A fully reconfigurable universal sensor analog front-end IC for the Internet of Things Era", *IEEE Sensors Journal*, Vol. 19, No. 7, pp. 2621–2633. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2018.2890211>.
- [11] Murari A., Edlington T., Angelone M., Bertalot L., Bolshakova I., Bonheure G., Brzozowski J., Coccoresse V., Holyaka R., Kiptily V., Lengar I., Morgan P., Pillon M., Popovichev S., Prior P., Prokopowicz R., Quercia A., [et al.] (2010), "Measuring the Radiation Field and Radiation Hard Detectors at JET: Recent Developments", *JET Preprint and Reports. EFD-P(07)32. 29P.* <http://www.iop.org/Jet/fulltext/EFDP07032.pdf>.
- [12] Ďuran, I. Bolshakova I., Viererbl L., Sentkerestiová J., Holyaka R., Lahodová Z., Bém P. (2010), "Irradiation tests of ITER candidate Hall sensors using two types of neutron spectra", *Review of Scientific Instruments*, Vol. 81, Is. 10, pp. 10E122–10E122. <https://doi.org/10.1063/1.3479115>.

STRUCTURE AND CALIBRATION OF FUNCTIONALLY INTEGRATED DEVICES FOR THERMONUCLEAR REACTORS MAGNETIC DIAGNOSTICS

I. Bolshakova, G. Barylo, R. Holyaka, T. Marusenkova, F. Shurygin

Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine

The analysis of magnetic diagnostics in next generation thermonuclear reactors is carried out. Based on this analysis, the new approach of magnetic field measurement in hard radiation and temperature condition is presented. The concept is based on data fusion concept by integration of Hall sensor and coil. High precision of magnetic field measurement insures on periodic in-situ calibration, namely, forming by the coil test magnetic field of known magnitude and measuring the signals of the Hall sensor, which are due to this test field. According to the results of measuring the test signals, the coefficients of the measuring conversion function are calculated. Main calibration issues of functionally integrated devices on Hall sensors and coils are detailed. Measurement system consists a functionally integrated 3D probe on Hall sensor and coil, analog front-end and software. Currently six sets of such devices have been installed for trial operation in JET (Oxford, GB).

Key words: *sensor; magnetic field; sensor integration; data fusion; calibration.*