

УДК 621.317

## СИСТЕМА АВТОМАТИЧНОЇ КОМПЕНСАЦІЇ НЕВИМІРЮВАНОЇ СКЛАДОВОЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА ЇЇ ПОХИБКИ

© Мокренко П.В., Іваниця О.І., Лазорик М.П., Пугач Ю.М., 2000  
 ДУ “Львівська політехніка”, кафедра “Автоматика і телемеханіка”

**Розглянуто питання побудови і алгоритм роботи системи автоматичної компенсації невимірюваної складової геомагнітного поля. Отримано аналітичні вирази для розрахунку її основних параметрів.**

**The questions of construction and operation algorithm of the system of automatic compensation of geomagnetic field non-measuring component are considered. The analytic expressions for calculating main system parameters are obtained.**

Останнім часом квантові магнітометричні давачі (КМД) набули поширення в практиці геофізичних досліджень та при побудові квантових вимірювальних перетворювачів [1-3]. КМД з оптичною орієнтацією атомів, окрім вимірювання повного вектора геомагнітного поля, використовують і для вимірювання компонент магнітного поля. Обов'язковим елементом подібного вимірювального пристрою є наявність системи компенсуючих кілець, всередині яких розміщується магнітометричний давач.

Відомо, що модуль повного вектора геомагнітного поля  $\bar{T}$  в прямокутній системі координат [4] можна розкласти на три лінійні складові  $\bar{X}$ ,  $\bar{Y}$  і  $\bar{Z}$ . Осі цієї системи (рис.1) зорієнтовані: по напрямках географічного меридіану (північна складова  $\bar{X}$ ), перпендикулярно до нього (східна складова  $\bar{Y}$ ) і по вертикалі місця (вертикальна складова  $\bar{Z}$ ). Для вимірювання однієї з цих компонент необхідно за допомогою ортогональних компенсуючих кілець скомпенсувати відповідні невимірювані компоненти. Так, наприклад, для вимірювання  $\bar{Y}$ -складової необхідно скомпенсувати  $\bar{Z}$  і  $\bar{X}$  складові.

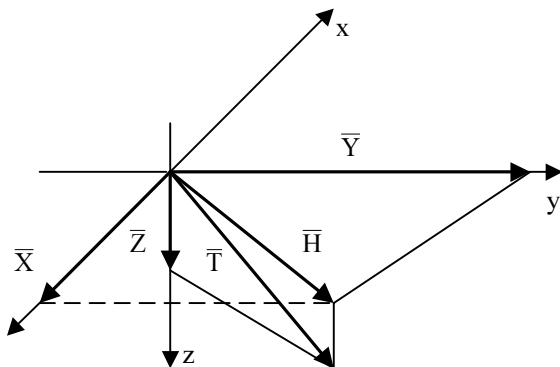


Рис.1. Векторна діаграма геомагнітного поля.

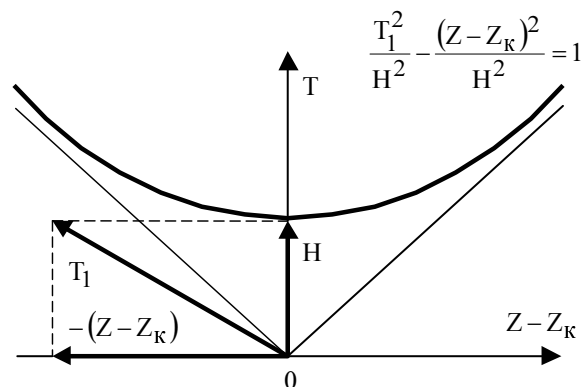


Рис.2. Зміна модуля сумарного вектора магнітного поля в об'ємі КП.

При подачі струму в компенсуючу кільцеву систему в центральній зоні створюється сумарне поле, яке дорівнює за величиною векторній сумі двох векторів, а саме – магнітного поля Землі і магнітного поля кільцевої компенсуючої системи. Надалі магнітне поле, яке створюється кільцевою системою, будемо називати полем компенсації  $Z_K$  і розглянемо закон зміни модуля вектора сумарного поля при лінійній зміні модуля вектора поля компенсації. Позначимо проекцію вектора геомагнітного поля на площину, перпендикулярну напрямку вектора поля компенсації,  $H$ , модуль результуючого (сумарного) поля –  $T_1$ . Беручи до уваги, що при компенсації напрямки  $\vec{T}$  і  $\vec{Z}_K$  не змінюється, а модуль  $H = \text{const}$ , можна записати (рис.2), що

$$T_1 = \varphi(Z - Z_K)$$

або

$$T_1^2 = (Z - Z_K)^2 + H^2.$$

Якщо поділити останній вираз на  $H^2$  і перенести невідомі в лівий бік, то отримаємо

$$\frac{T_1^2}{H^2} - \frac{(Z - Z_K)^2}{H^2} = 1.$$

Останній вираз є рівнянням гіперболи, яка має назву рівносторонньої. Отже, при компенсації однієї з складових модуль сумарного вектора магнітного поля в об'ємі комірки поглинання буде змінюватися за законом рівносторонньої гіперболи. При збіжності напрямків  $\vec{T}$  і  $\vec{Z}_K$  гіпербола вироджується. Тому задача системи автоматичної компенсації (надалі – компенсатора) зводиться до пошуку і підтримки такої величини  $\vec{Z}_K$ , при якій виконується рівність  $H = T_1$ .

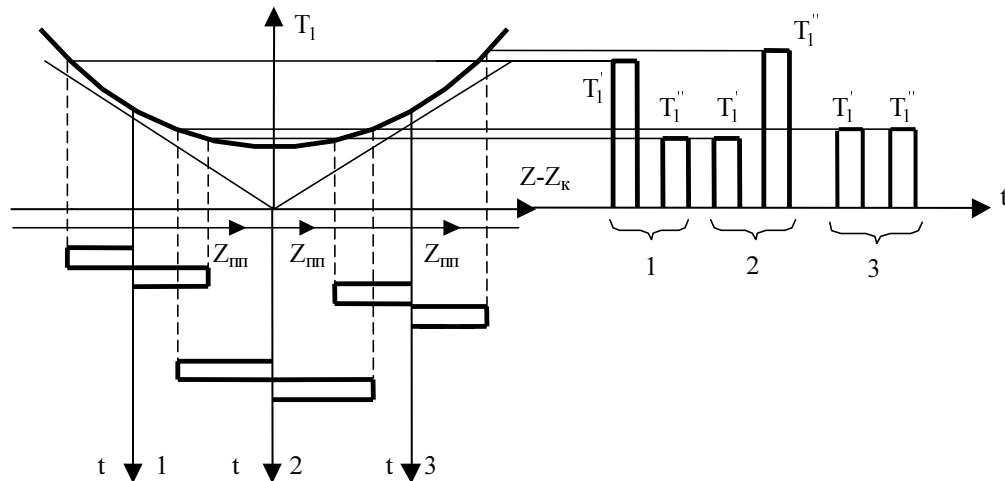


Рис.3. Часові діаграми методу компенсації складової.

Методика компенсації в розроблюваній системі повинна полягати в такому. Перед кожною зміною (кроком) регулюючого впливу необхідно проводити перевірні сканування у вигляді накладання на основне компенсуюче поле додаткового поля, спочатку у напрямку  $\bar{Z}_k$ , потім проти  $-\bar{Z}_k$ , вимірюючи при цьому значення модулів результуючих полів в першому і другому випадках. Порівнюючи ці покази, можна однозначно встановити (рис.3), що необхідно робити – зменшувати, збільшувати або залишати без зміни  $Z_k$  і проводити вимірювання некомпенсованої компоненти. Ця методика добра тим, що (як буде показано далі) вона дає можливість побудувати систему з великою швидкістю, яка не буде мати ризикання навколо екстремуму, не реагуватиме на природну зміну вимірюваної компоненти як на показник якості, і може бути побудована на елементах цифрової техніки.

Структурна схема системи автоматичної компенсації складової в квантовому магнітометрі, яка використовує описану вище методику, наведена на рис.4. Вона складається з: магніточутливого давача (МЧД), який має височастотний генератор (ВЧГ), призначений для збудження цезієвої спектральної лампи, комірки поглинання (КП); підсилювача сигналу прецесії (ПСП); компенсуючої кільцевої системи (ККС); схеми допоміжних вимірювань (СДВ); цифрового аналізатора (ЦА); схеми накладання перевірного поля (СНПП); схеми компенсації (СК); схеми автоматики (СА). Крім того, квантовий компонентний магнітометр має блок вимірювання (БВ) та блок електронного годинника (БЕГ). Система компенсуючих кілець має дві обмотки: основну і допоміжну. Основна обмотка призначена для створення поля компенсації, а допоміжна – для створення перевірного поля.

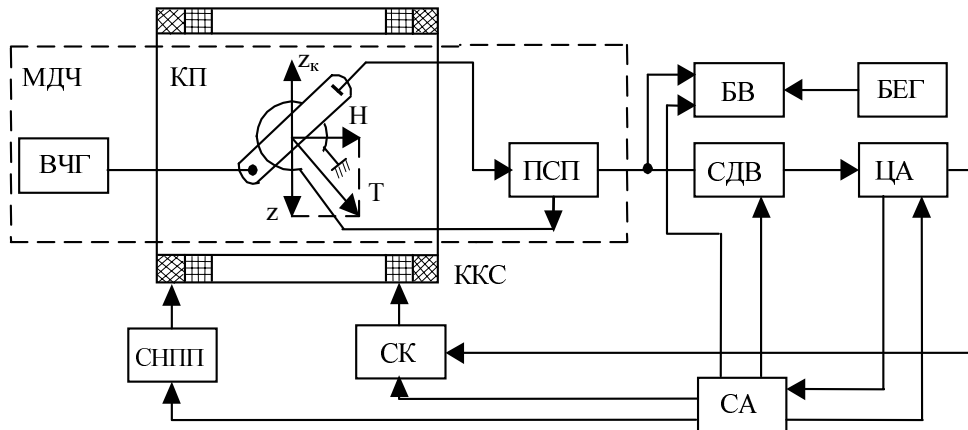


Рис.4. Структурна схема компенсатора.

Робота компенсатора відбувається у такий спосіб. За командою із СА у допоміжну обмотку з СНПП подається струм, який створює перевірне поле  $Z_{\text{пн}}^+$ , останнє напрямлено проти поля компенсації  $Z_k$ . Після закінчення перехідного процесу встановлення струму СДВ фіксує з певною точністю напруженість результуючого магнітного поля в об'ємі КП давача. Потім за командою з СА змінюється напрям перевірного поля на протилежне ( $Z_{\text{пн}}^-$ ) і в той самий момент часу відбувається фіксація

результуючого поля. Отже, у СДВ зберігається інформація про  $T_1'$  і  $T_1''$ . Ця інформація подається на ЦА, який після її обробки видає одну з наступних команд на СК залежно від значень  $T_1'$  і  $T_1''$ :

- 1)  $T_1' > T_1''$  – збільшувати  $Z_K$ ,
- 2)  $T_1' < T_1''$  – зменшувати  $Z_K$ ,
- 3)  $T_1' = T_1''$  – залишити  $Z_K$  без зміни і перейти до вимірювання компоненти.

За першою командою СК збільшує  $Z_K$  на величину крокового регулюючого впливу  $\Delta Z$ . При другій команді СК зменшує  $Z_K$  на величину  $\Delta Z$ . При третій команді  $Z_K$  залишається без зміни і у БВ фіксується результат вимірювання компоненти.

Отже, компенсатор при достатній швидкодії буде підтримувати таку величину  $Z_K$ , при якій результуюче поле дорівнюватиме проекції  $T_1$  на площину, перпендикулярну напрямку  $Z_K$ , і якщо напрям  $Z_K$  сумістити з вертикаллю, то результуюче поле буде дорівнювати компоненті  $H$ .

Для реальної оцінки компенсатора даного типу треба визначити такі залежності:

а) між граничним значенням похибки компенсації і похибкою вимірювання компоненти;

б) між величиною амплітуди перевірного поля, роздільною  $\Delta H$  здатністю СДВ, кроком регулюючого впливу  $\Delta Z$  і значенням вимірюваної компоненти  $H$ .

Ці залежності дають можливість: визначити необхідну швидкодію системи; забезпечити задану точність вимірювання компоненти; забезпечити такий режим роботи системи, при якій вона б не входила в режим генерації, а зміна величини  $Z_K$  відбувалася б тільки тоді, коли похибка  $\Delta Z_K$  перевищувала б граничну.

Виведемо залежність похибки вимірювання компоненти від похибки компенсації. Різниця між дійсним значенням компоненти  $H$  і вимірним значенням компоненти  $H_{\text{вим.}}$  (при  $Z - Z_K \neq 0$ ) буде абсолютною похибкою вимірювання за рахунок похибки компенсації  $\Delta H_K$ , тобто

$$\begin{cases} H_{\text{вим.}} - H = \Delta H_K, \\ H_{\text{вим.}}^2 = H^2 + (Z - Z_K)^2. \end{cases} \quad (1)$$

Друге рівняння можна отримати, розглядаючи прямокутний трикутник векторів з катетами  $\bar{H}$  і  $(\overline{Z - Z_K})$  і гіпотенузи  $\bar{H}_{\text{вим.}}$  (рис.5). Розв'язуючи цю систему рівнянь, отримаємо:

$$\begin{aligned} \sqrt{H^2 + (Z - Z_K)^2} - H &= \Delta H_K, \\ \left( \sqrt{H^2 + (Z - Z_K)^2} \right)^2 &= (H + \Delta H_K)^2, \\ H^2 + (Z - Z_K)^2 &= H^2 + 2H\Delta H_K + \Delta H_K^2, \\ (Z - Z_K) &= \sqrt{2H\Delta H_K + \Delta H_K^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Позначивши  $Z - Z_K = \Delta Z_K$ , отримаємо

$$\Delta Z_K = \sqrt{2N\Delta H_K + \Delta H_K^2} = \sqrt{2N\Delta H_K(1 + \Delta H_K)}.$$

Значенням  $\Delta H_K$  в дужках можна знехтувати, тоді остаточно

$$\Delta Z_K = \sqrt{2N\Delta H_K}, \quad (3)$$

або

$$\Delta H_K = \frac{\Delta Z_K^2}{2N}. \quad (4)$$

Назвемо зоною екстремуму сукупність значень  $\Delta Z_K$ , при яких  $\Delta H_K \leq \Delta H_{K \text{ доп}}$ . Очевидно, що ця зона поширюється як в один, так і в інший бік від істинного екстремуму. Тому величину цієї зони  $\Delta Z_{\text{екстр}}$  визначають як

$$\Delta Z_{\text{екстр}} = 2\Delta Z_K = 2\sqrt{2N \cdot \Delta H_{K \text{ доп}}}. \quad (5)$$

Оскільки  $Z_K$  змінюється стрибком на величину  $\Delta Z$ , а задача системи автоматичної компенсації зводиться до підтримки  $Z - Z_K$  в зоні екстремуму, то для того, щоб система “обминула” зону екстремуму, необхідно виконати умову  $\Delta Z \leq \Delta Z_{\text{екстр}}$  у всьому діапазоні значень  $N$ . Оскільки мінімальна величина  $\Delta Z_{\text{екстр}}$  буде при мінімальному значенні  $N$ , то на величину  $\Delta Z$  накладається умова

$$\Delta Z \leq \Delta Z_{\text{екстр, min}} = 2\sqrt{2N_{\text{min}} \Delta H_{K \text{ доп}}}. \quad (6)$$

Вираз (6) є необхідною і достатньою умовою забезпечення знаходження системою зони екстремуму.

Для того, щоб охарактеризувати компенсатор з погляду швидкодії і стійкості, необхідно визначити залежність  $Z_{\text{шт}} = \Phi(\Delta H; \Delta H_K; N)$ , а алгоритм роботи компенсатора, виходячи з (рис.3), можна описати так:

а) якщо  $(Z - Z_K) > \Delta Z_{\text{екстр}}$ , різниця  $|T_1' - T_1''| > \Delta H$  або  $|N_1' - N_1''| > 1$ , де  $N_1'$  – число, яке фіксується в СДВ, пропорційне до  $T_1'$ ;  $N_1''$  – число, яке фіксується в СДВ, пропорційне до  $T_1''$ .

б) якщо  $(Z - Z_K) < \Delta Z_{\text{екстр}}$ ,  $|T_1' - T_1''| \leq \Delta H$  або  $|N_1' - N_1''| = 0$  – одна з умов стійкості автокомпенсатора.

Назвемо зоною нечутливості сукупність  $2(Z - Z_K) > \Delta Z_{\text{нч}}$ , при якій виконується алгоритм  $|T_1' - T_1''| < \Delta H$ . На зону нечутливості повинні бути накладені такі умови:

- 1) для забезпечення  $\Delta H_K \leq \Delta H_{K \text{ доп}}$ , необхідно, щоб  $\Delta Z_{\text{нч}} \leq \Delta Z_{\text{екстр}}$ ;
- 2) для забезпечення стійкості необхідно, щоб  $\Delta Z \leq \Delta Z_{\text{нч min}}$ .

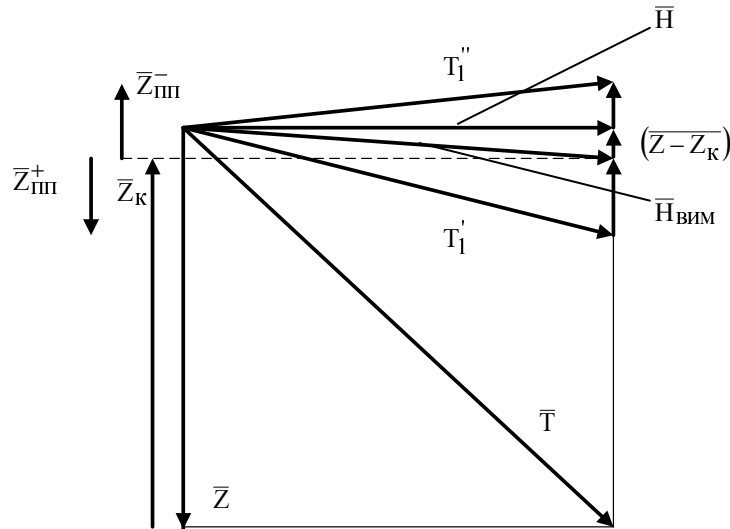


Рис. 5. Векторна діаграма процесу компенсації.

Запишемо (згідно з рис.5) вирази для  $T_1'$  і  $T_1''$  через їх складові

$$T_1' = \sqrt{H^2 + [(Z - Z_k) + Z_{III}]^2}, \quad (7)$$

$$T_1'' = \sqrt{H^2 + [-(Z - Z_k) + Z_{III}]^2}. \quad (8)$$

Враховуючи, що перевірене поле одного напрямку за модулем дорівнює модулю перевірного поля протилежного напрямку, тобто  $|\bar{Z}_{III}^+| = |\bar{Z}_{III}^-|$  і беручи до уваги умову

$|T_1' - T_1''| \leq \Delta H$  (алгоритм б), запишемо її з урахуванням виразів (7) і (8)

$$\begin{aligned} \sqrt{H^2 + [(Z - Z_k) + Z_{III}]^2} - \sqrt{H^2 + [Z_{III} - (Z - Z_k)]^2} &\leq \Delta H; \\ \sqrt{H^2 + [(Z - Z_k) + Z_{III}]^2} &\leq \sqrt{H^2 + [Z_{III} - (Z - Z_k)]^2} + \Delta H. \end{aligned} \quad (9)$$

Піднесемо до квадрата ліву і праву частини нерівності (9) і, виконуючи ряд перетворень, отримаємо

$$Z_{III}^2 \leq \frac{4\Delta H^2 [H^2 + (Z - Z_k)^2] - \Delta H^4}{16(Z - Z_k)^2 - 4\Delta H^2}, \quad (10)$$

або

$$(Z - Z_k)^2 \leq \frac{4\Delta H^2 (H^2 + Z_{III}^2) - \Delta H^4}{16Z_{III}^2 - 4\Delta H^2}. \quad (11)$$

Вирази (10) і (11) встановлюють зв'язок між основними параметрами такого компенсатора. Оскільки  $(Z - Z_k)$  – зона нечутливості і за умовою

$$Z - Z_k = \frac{\Delta Z_{нч}}{2} \leq \frac{\Delta Z_{екстр.}}{2} = \sqrt{2H\Delta H_k}, \quad (12)$$

то, підставляючи у вираз (10) гранично допустиме значення  $(Z - Z_k)$  з (12), отримаємо

$$Z_{\text{III}}^2 \leq \frac{4\Delta H^2(H^2 + 2H\Delta H_k) - \Delta H^4}{16 \cdot 2H\Delta H_k - 4\Delta H^2};$$

$$Z_{\text{III}} \leq \sqrt{\frac{4\Delta H^2(H^2 + 2H\Delta H_k) - \Delta H^4}{32H\Delta H_k - 4\Delta H^2}} \leq \sqrt{\frac{4H\Delta H^2(H + 2\Delta H_k) - \Delta H^4}{32H\Delta H_k - 4\Delta H^2}}. \quad (13)$$

Оскільки величина  $Z_{\text{III}}$  в компенсаторі повинна бути закладена постійно, то необхідно визначити, за яким значенням напруженості його треба розраховувати. Якщо знехтувати в чисельнику виразу (13) значенням  $2\Delta H_k$  при постійних  $\Delta H_k$  і  $\Delta H$ , то отримаємо

$$Z_{\text{III}} \approx k\sqrt{H}, \quad (14)$$

де  $k$  – коефіцієнт пропорційності.

З виразу (14) видно, що значення  $Z_{\text{III}}$  буде більше при більших значеннях  $H$ . Тоді для забезпечення  $\Delta Z_{\text{III}} \leq \Delta Z_{\text{екстр}}$  необхідно  $Z_{\text{III}}$  розраховувати за максимальним значенням  $H$ , тобто

$$Z_{\text{III}} \leq \sqrt{\frac{4H_{\text{max}}^2\Delta H^2 - \Delta H^4}{32H_{\text{max}}\Delta H_k - 4\Delta H^2}}. \quad (15)$$

Тепер знайдемо, при яких значеннях напруженості  $H$  значення  $(Z - Z_k)$  буде мінімальним. Розглядаючи вираз (11), бачимо, що значення напруженості  $H$  входить до чисельника, звідси неважко переконатися, що воно буде мінімальним при мінімальній напруженості, тобто

$$(Z - Z_k)_{\text{min}} = \sqrt{\frac{4\Delta H^2(Z_{\text{III}}^2 + H_{\text{min}}^2) - \Delta H^4}{16Z_{\text{III}}^2 - 4\Delta H^2}}. \quad (16)$$

Визначаючи за формулою (16) значення  $(Z - Z_k)_{\text{min}}$ , можна знайти величину крокового регулюючого впливу. За умовою стійкості компенсатора

$$\Delta Z \leq \Delta Z_{\text{III min}} = 2(Z - Z_k)_{\text{min}}$$

або

$$\Delta Z \leq 2\sqrt{\frac{4\Delta H^2(Z_{\text{III}}^2 + H_{\text{min}}^2) - \Delta H^4}{16Z_{\text{III}}^2 - 4\Delta H^2}}. \quad (17)$$

Наведені вирази (15) і (17) є основними для розрахунку системи автоматичної компенсації невимірюваної складової геомагнітного поля.

Підсумовуючи викладене, зазначимо, що розроблення методики компенсації невимірюваної складової та самої структури компенсатора дають можливість його практичної реалізації з параметрами, які визначаються виразами (10) ÷ (17).

1. Померанцев Н.М., Рыжков В.М., Скроцкий Г.В. *Физические основы квантовой магнитометрии*. М., 1972. 2. Мокренко П.В. *Квантові вимірювальні перетворювачі постійного струму*. Львів, 1999. 3. *Средства измерений параметров магнитного поля / Афанасьев Ю.В., Студенцов Н.В., Хорев В.Н. и др. Л., 1979.* 4. Яновский В.М. *Земной магнетизм*. Л., 1963. 5. Вонсовский С.В. *Магнетизм*. М., 1971.

УДК 621.372.061

## **СИНТЕЗ АЛГОРИТМІВ ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ГАРМОНІЧНИХ СИГНАЛІВ ІНТЕГРАТОРАМИ ТА ІНТЕГРУВАННЯ ДИФЕРЕНЦІАТОРАМИ**

© Тимошук П.В., 2000

ДУ “Львівська політехніка”, кафедра “Радіотехнічні пристрої”

**Синтезовано алгоритми фільтрів, призначених для виконання операції диференціювання на основі інтеграторів та операції інтегрування на базі диференціаторів при обробці гармонічних сигналів. Для цього будуються аналогові макромоделі у вигляді рівнянь, що містять дії, їх похідні, інтеграли та реакції фільтрів. Потім здійснюється перехід від рівнянь в аналоговій формі до дискретних рівнянь. За побудованими макромоделями на базі диференціаторів, інтеграторів, функціональних перетворювачів та ланок затримки реалізуються відповідні функціональні схеми .**

**The filters algorithms intended for the realization of differentiation operation on the integrators base and integration operation on the differentiation base at the garmonic signals treatment has been synthesized. For this object the analogue macromodels in the eguations form with influences, their derivatives, integrals and filters reactions are constructed. Then the conversion from the analogue form eguation to discrete equation are carried out. By the constructed macromodels on the differentiators, integrators, functional converters and delayunits the corresponding function diagrams are realized.**

У напівпровідниковій схемотехніці часто необхідно здійснювати перетворення сигналів, зокрема гармонічних, яке має характер диференціювання або інтегрування. Традиційно таке перетворення виконують за допомогою диференціаторів або інтеграторів . Однак , як відомо, диференціатор недостатньо точно і стійко працює на високих частотах, а інтегратор, своєю чергою, має невисоку точність на нижніх частотах. Водночас на практиці операцію диференціювання необхідно виконувати також на високих частотах, а інтегрування – на нижніх. Крім того, іноді необхідно здійснювати як диференціювання, так і інтегрування гармонічних сигналів в широкому частотному діапазоні [3]. Для підвищення ефективності виконання операцій диференціювання та інтегрування гармонічних сигналів доцільним було б на нижніх частотах мати