

# ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ ТА ТОЧНОСТІ ПРИСТРОЇВ СИНХРОННО-ФАЗОВОЇ ДЕМОДУЛЯЦІЇ

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр  
Галузь знань 17 – Електроніка та телекомунікації

Спеціальність 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Спеціалізація Телекомунікаційні системи та мережі

Керівник роботи  
к.т.н., доц. кафедри ТКСТБ ВНТУ  
Городецька О.С.

Виконавець: ст. гр. ТСМ-16м  
Коробка А.М.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз та удосконалення існуючих методів підвищення завадостійкості та точності цифрових та цифро-аналогових синхронно-фазових демодуляторів при збереженні їх динамічних властивостей в синхронних та усталених режимах.

Для досягнення поставленої мети дослідження у роботі необхідно розв'язати такі задачі:

- виконати техніко-економічне обґрунтування доцільності дослідження;
- провести аналіз методів побудови синхронно-фазових цифрових та цифро-аналогових демодуляторів;
- провести аналіз показників якості СФД;
- провести аналіз методів підвищення точності цифрових та цифро-аналогових синхронно-фазових демодуляторів;
- провести оцінку впливу зовнішніх завад на показники якості синхронно-фазових демодуляторів;
- провести аналіз методів підвищення завадостійкості засобів синхронізації;
- удосконалити методи підвищення точності та завадостійкості синхронно-фазових демодуляторів;
- проаналізувати економічну ефективність проведеного дослідження;
- здійснити аналіз питань охорони праці та безпеки в надзвичайних ситуаціях.

Предметом дослідження є методи та засоби підвищення точності та завадостійкості при обробці інформації в цифрових та цифро-аналогових демодуляторах.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в наступному:

проведена оцінка впливу зовнішніх завад на параметри синхронно-фазового демодулятора, що дало можливість удосконалити методи підвищення завадостійкості;

удосконалено метод підвищення точності шляхом коригування по зовнішній задавальній дії, що дає можливість зменшити вплив перехідного процесу без порушення стійкості синхронно-фазового демодулятора;

удосконалено метод підвищення точності шляхом введення додаткового розімкненого каналу керування з неединичним зворотнім зв'язком, що дало можливість підвищити порядок астатизму.

**Достовірність теоретичних положень** магістерської кваліфікаційної роботи підтверджується коректним застосуванням математичних методів та збіжністю результатів комп'ютерного моделювання з результатами, що отримані іншими дослідниками.

- Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:
- запропонована структурна схема синхронно-фазового демодулятора, яка забезпечує підвищення завадостійкості відношення сигнал/шум на виході у 1,2 разів;
- запропонована структурна схема цифрового синхронно-фазового демодулятора з додатковим розімкненим каналом керування з неодиначним зворотнім зв'язком, що дає можливість підвищити порядок астатизму на один порядок.
- **Апробація результатів роботи.** Матеріали дослідження доповідались на науковій конференції ВНТУ у 2017 році.
- Проведена перевірка матеріалів МКР на плагіат показала 100% оригінальність виконаної роботи.

# Показники якості синхронно-фазових демодуляторів систем зв'язку

- Синхронно-фазові демодулятори знаходять широке застосування в сучасних телекомунікаційних системах та засобах керування. Від основних показників якості синхронно-фазових демодуляторів залежить ефективність роботи засобів зв'язку. До основних показників якості таких пристроїв слід віднести точність в усталених режимах, завадостійкість та швидкість обробки інформації.
- В умовах дії завад точність синхронно-фазових демодуляторів (СФД) визначається модуляційними та шумовими складовими похибок. Модуляційна або динамічна похибка характеризується випадковою і регулярною складовими. В більшості випадків повідомлення, що передається, є випадковим процесом, тому динамічна похибка характеризується дисперсією або середньо-квадратним відхиленням, тобто обумовлене випадковими змінами модулюючої функції.

Другим важливим показником якості СФД є завадостійкість. СФД характеризується високою завадостійкістю завдяки покращенню їх порогових властивостей.

В загальному випадку під завадостійкістю системи зв'язку розуміють здатність системи розрізняти чи відновлювати сигнали із заданою достовірністю при дії завад.

Завдання визначення завадостійкості всієї системи зв'язку досить складне, тому часто визначають завадостійкість окремих ланок системи, наприклад приймача для заданих способів передачі, системи кодування, модуляції тощо. У загальному випадку завадостійкість системи зв'язку залежить від виду повідомлень, рівня та характеристик завад, параметрів окремих складових частин системи.

Порівняння реальної та потенційної завадостійкості дає можливість оцінювати якість реального пристрою і знайти ще не використані резерви.

Третім найважливішим показником якості роботи СФД є його швидкодія або час регулювання, яка визначається тривалістю перехідних процесів в колах демодулятора.

Звичайно вважають, що перехідний процес закінчився, якщо остаточна напруга від нього приблизно складає 0,1 від усталеного значення. Намагання підвищити швидкодію СФД традиційними методами призводить до збільшення динамічних похибок, що спричиняє потребу компромісного настроювання таких СФД. Тому існує необхідність пошуку шляхів підвищення швидкодії СФД одночасно з підвищенням їх динамічної точності в усталених режимах.

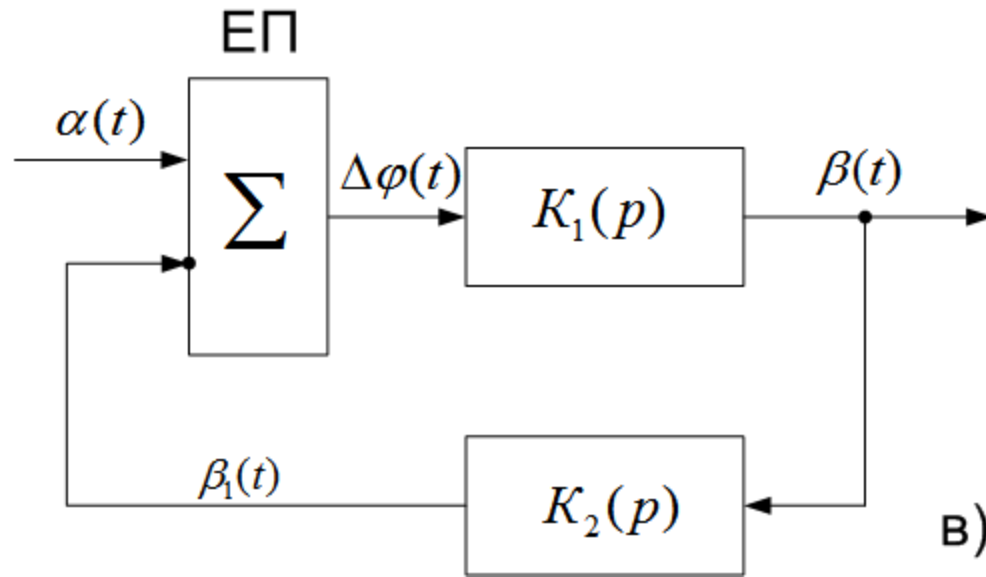
# Способи підвищення точності функціонування СФД

Неточності фільтрації фази в СФД знижують відношення сигнал-шум на його виході. Тому під час фільтрації фази потрібно забезпечити мінімальну похибку. Намагання збільшити здатність СФД у класі замкнених систем призводить до неухильного звуження смуги утримання, а прагнення підвищити порядок астатизму погіршує динаміку (якість перехідного процесу) системи. Розглянемо вирішення цих задач в класі СФД з головним зворотним зв'язком.

- Для підвищення точності СФД в синхронному режимі пропонується в замкнений контур системи фазової автопідстройки ввести інтегровальну ланку, яка утворює прямий зворотній зв'язок.
- Будемо використовувати для побудови СФД спосіб керування по відхиленню. Структурна схема такого СФД наведена на рис. 1, в.

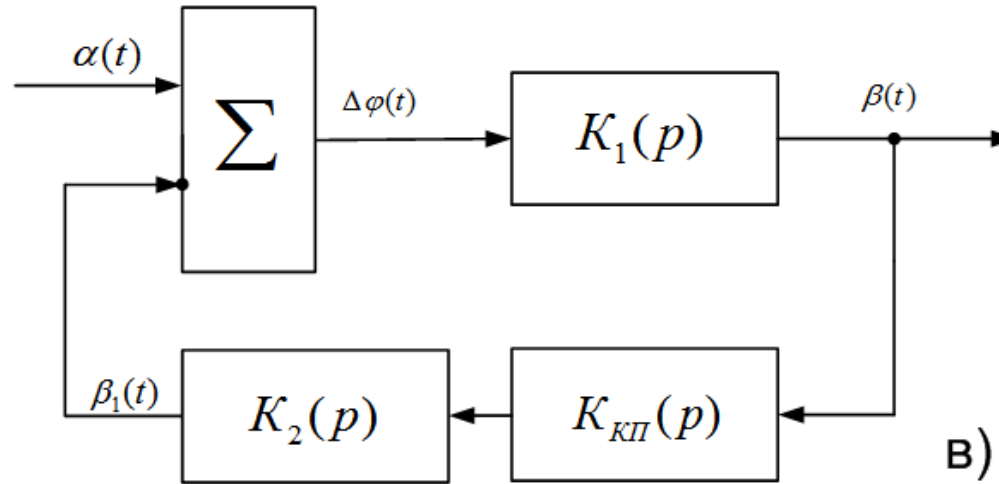


# Способи підвищення точності функціонування СФД

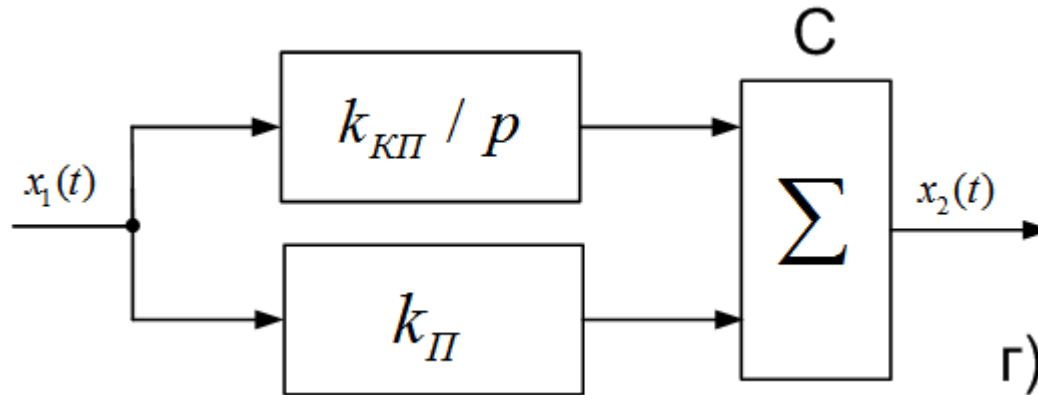


- Розглянутий СФД з принципом управління по відхиленню є астатичною системою з астатизмом першого порядку.
- Увімкнемо в замкнений контур коригуючий пристрій з оператором (рис. 2, в)

# Способи підвищення точності функціонування СФД



– Структурна схема такого пристрою зображена на рис. 2, г.



# Способи підвищення точності функціонування СФД

Порядок астатизму СФД з масштабуючим коригуючим пристроєм визначається степенем  $v$  оператора  $P$ , який є загальним множником чисельника оператора СФД щодо похибки. Як бачимо з виразу (2.18), поліноми  $i$  входять у чисельник оператора, тому можна підвищити порядок астатизму системи ФАП, який відповідає вибору цих поліномів, маючи на увазі, що такий вибір не призводить до втрати стійкості замкненого контуру СФД.

$$\left. \begin{aligned} 1) \text{ при } p^0 d_0 c_0 - c_0 \tau_0 &= 0; \\ 2) \text{ при } p^1 d_0 c_1 + d_1 c_0 - c_0 \tau_1 &= 0; \\ 3) \text{ при } p^2 d_0 c_2 + d_1 c_1 + d_2 c_0 - c_0 \tau_2 &= 0; \\ 4) \text{ при } p^3 d_0 c_3 + d_1 c_2 + d_2 c_1 + d_3 c_0 - c_0 \tau_3 &= 0; \\ 5) \text{ при } p^4 d_0 c_3 + d_2 c_1 + d_4 c_0 - c_0 \tau_4 &= 0; \end{aligned} \right\}$$

З рівнянь можна визначити коефіцієнти чисельника (коефіцієнти при похідних від керованої величини) і коефіцієнти знаменника оператора  $K_{КП}(p)$ , і підвищуючи порядок астатизму СФД.

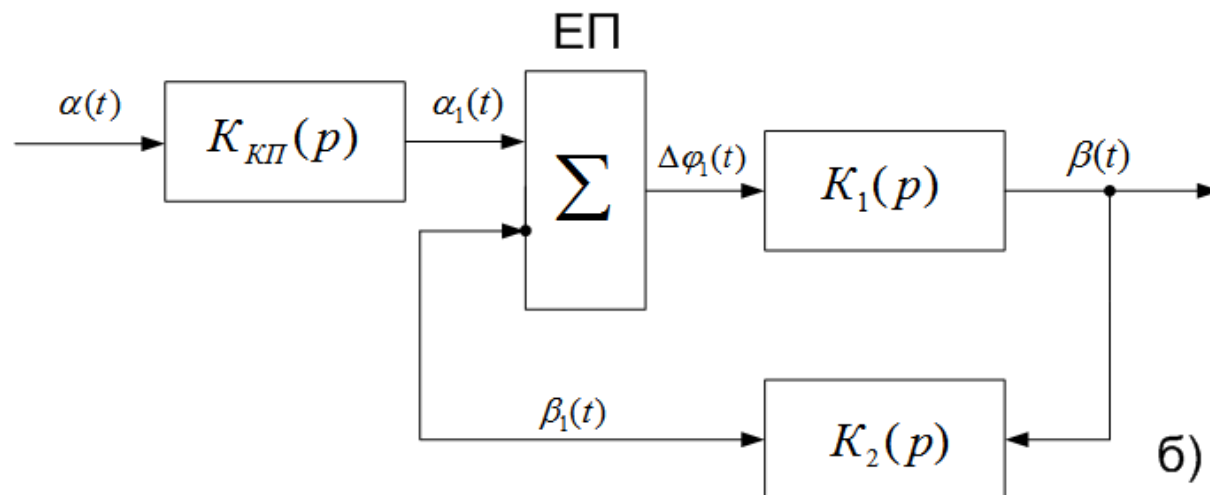
# Способи підвищення точності функціонування СФД

→ З першого рівняння системи знаходимо, що  $\tau_0 = d_0$  (при  $c_0 = 0$ ), тобто якщо замкнений контур СФД має астатизм першого порядку (поліном  $F_p(p)$  в якості спільного множника має оператор  $P$ ), тоді у випадку СФД з МКП є потреба формувати за допомогою МКП задавальне діяння, бо при  $\tau_0 = d_0 = 1$  порядок астатизму дорівнюватиме порядку астатизму СФД без МКП.¶

→ Коефіцієнти  $\overline{d_1, d_n}$  полінома  $F_{КП}(p)$  оператора  $K_{КП}(p)$  визначаються з урахуванням операторів диференціюючих пристроїв, за допомогою яких реалізується оператор  $K_{КП}(p)$ , і вимог, які зумовлені допустимими значеннями перехідної складової похибки СФД. Реалізуючи четверту похідну від керованої величини  $\tau_4 p^4$  з коефіцієнтом, який задовольняє п'яте рівняння, можна підвищити порядок астатизму СФД до п'ятого.¶

# Способи підвищення точності функціонування СФД

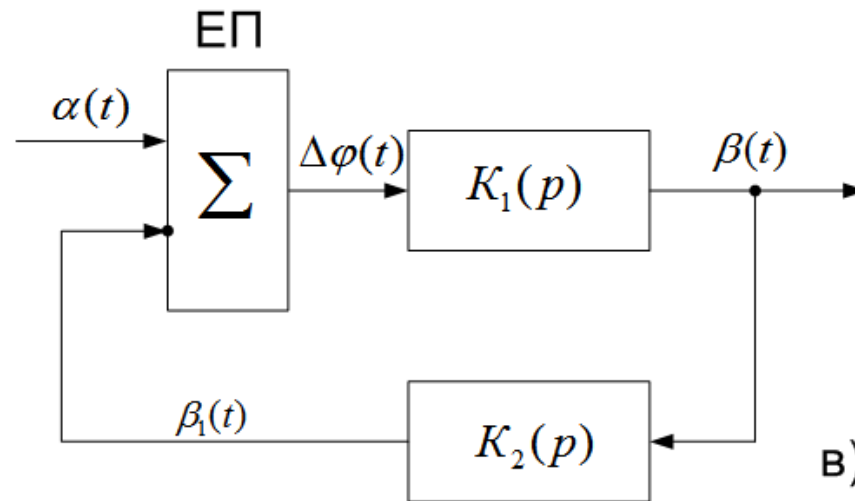
- Аналогічно розмірковуючи, впевнимся у тому, що реалізацією похідних від керованої величини за допомогою реальних масштабуючих диференціюючих пристроїв можна підвищити порядок астатизму СФД теоретично до нескінченності. ¶
- Аналогічних результатів можна досягти за допомогою МКП, увімкненого в коло задавального діяння  $\alpha(t)$ . Структурна схема СФД з МКП в колі  $\alpha(t)$  зображена на рис. 2.2, б.



# Способи підвищення точності функціонування СФД

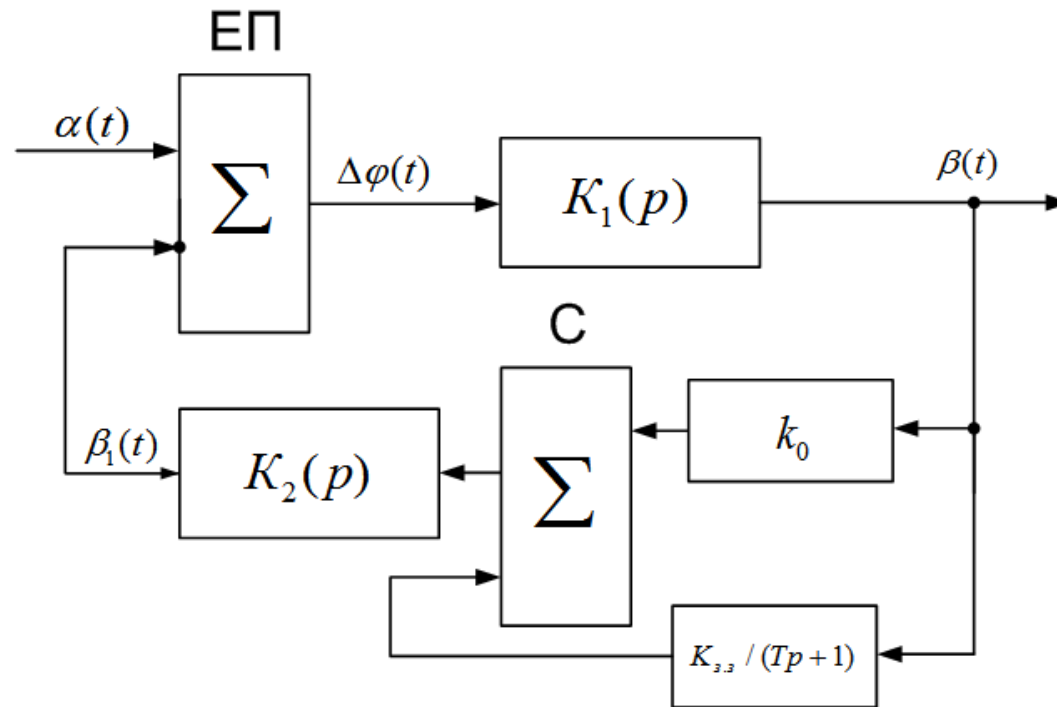
Отже, увімкнення МКП як у коло керованої величини, так і в коло задавального діяння дає змогу вирішити задачу підвищення точності СФД в усталених (синхронних) режимах порівняно простими технічними засобами.

Для підвищення точності СФД в синхронному режимі пропонується в замкнений контур системи фазової автопідстройки ввести інтегровальну ланку, яка утворює прямий зворотній зв'язок. Будемо використовувати для побудови СФД спосіб керування по відхиленню. Структурна схема такого СФД наведена на рис. 2.



# Способи підвищення точності функціонування СФД

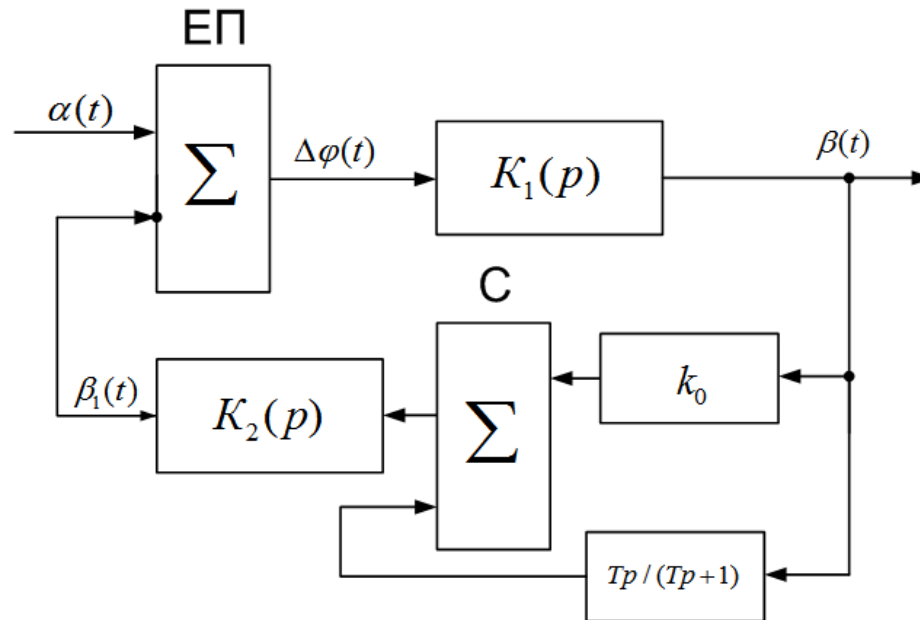
Другий спосіб отримання еквівалентної ізодромної ланки ґрунтується на застосуванні критичного позитивного зворотного зв'язку, який охоплює один із каскадів підсилювального пристрою. Структурну схему СФД, в якій реалізується цей спосіб, зображено на рис. 2.3.



# Способи підвищення точності функціонування СФД

Розглянутим методом можна підвищити порядок астатизму тільки на одиницю, бо у разі подальшого підвищення порядку астатизму дуже ускладнюються умови забезпечення потрібних запасів стійкості замкненого контуру СФД.

Третій спосіб підвищення порядку астатизму СФД полягає в тому, що у замкнений контур вводиться підсилювач з дуже високим коефіцієнтом підсилення, охоплений коригуючим негативним зворотним зв'язком,

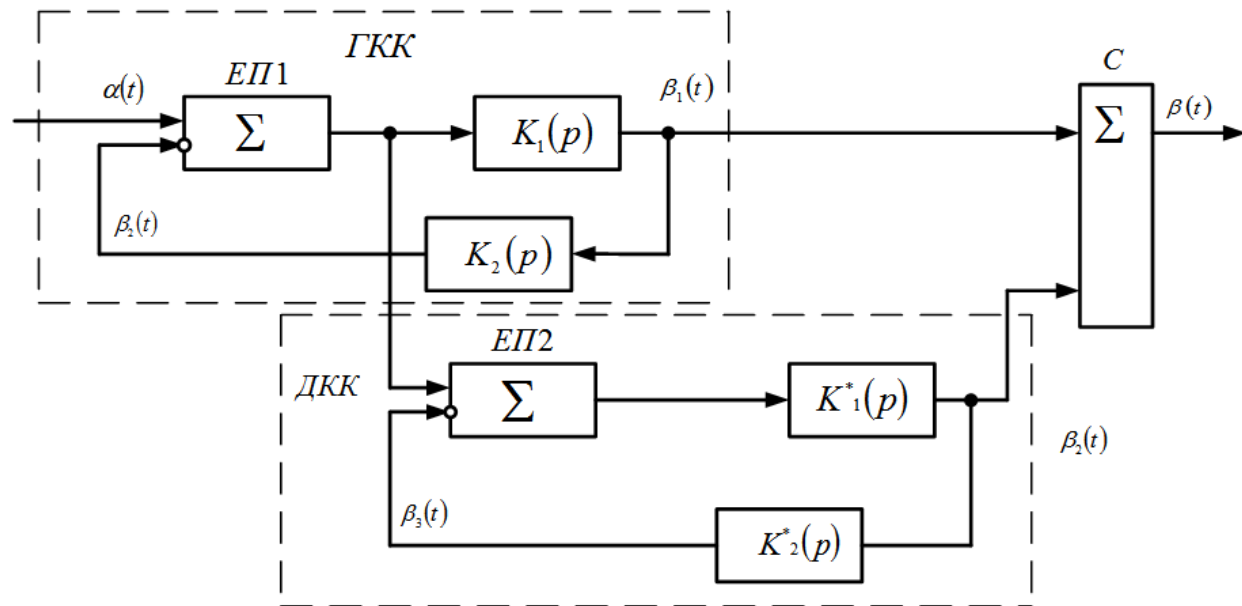




# Способи підвищення точності функціонування СФД

З метою підвищення точності в ustalених режимах автоматичні системи будують за принципом ітераційних структур. Ітераційними системами називають такі системи, що вимірюють задавальну дію методом послідовних наближень. Тому доцільно розглянути можливість побудови синхронно-фазових демодуляторів у класі ітераційних систем.

Структурна схема ітераційного синхронно-фазового демодулятора з двома контурами керування наведена на рисунку 3.1. Тут використовується головний контур керування (ГКК) та додатковий контур керування (ДКК).



# Способи підвищення точності функціонування СФД

Розглянемо випадок, коли завада діє на головний контур керування  
структурна схема демодулятора для цього випадку приймає вигляд (рис. 3.2)

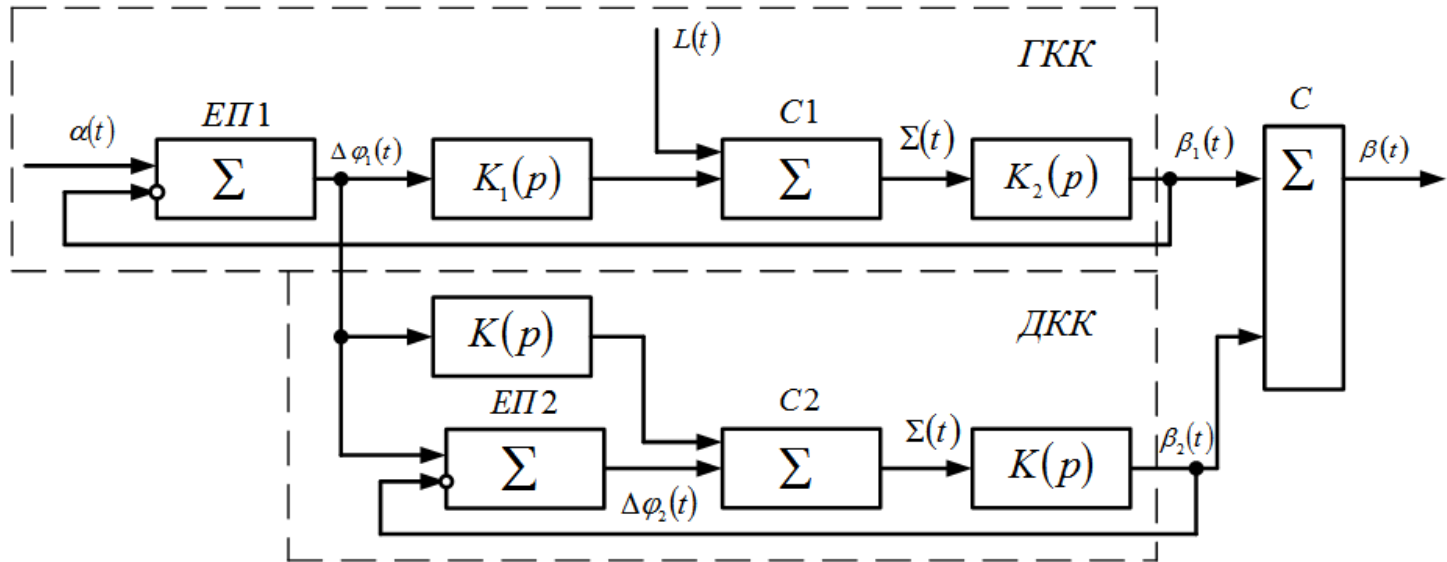


Рисунок 3.2 – Узагальнена структура двоконтурного ітераційного СФД з розімкненим зв'язком у додатковому контурі керування та впливу завади на ГКК

# Практична реалізація аналогових та цифрових СФД в ТКС

варіант схеми комбінованого СФД зображений на рисунку 4.2,

який може використовуватися також для отримання сигналу з малими фазовими похибками (з високим ступенем когерентності) в умовах великих апріорних невизначеностей частоти прийнятого сигналу.

Демодулятор працює наступним чином. Вхідний сигнал за допомогою змішувача переноситься в діапазон більш низьких частот, який перекривається гребінчастим смуговим фільтром. Детектор максимального сигналу з певною ймовірністю появи аномальної похибки пропускає вхідний відфільтрований сигнал через обмежувач на ФД. Цей сигнал використовується у фазовому

дискримінаторі в якості еталонного. На сигнальний вхід ФД з виходу змішувача надходить суміш сигналу і шуму. Вихідний сигнал ФД через ФНЧ надходить на керований по частоті ЧМГ. Якщо частота вхідного сигналу точно відповідає резонансній частоті одного з фільтрів (передбачається, що фільтр послідовний і забезпечує фазовий зсув на  $\pi/2$ ), то напруга на виході ФД буде дорівнює нулю. Якщо є різниця між значеннями вказаних частот, то фаза на виході смугового фільтра буде відрізнятись від  $\pi/2$  і на виході ФД з'явиться сигнал помилки, який через ФНЧ та ЧМГ, керує частотою коливань генератора. Вихідний демодульований сигнал може зніматися з виходу ФНЧ, а сигнал когерентний вхідному — з виходу ЧМГ.

# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

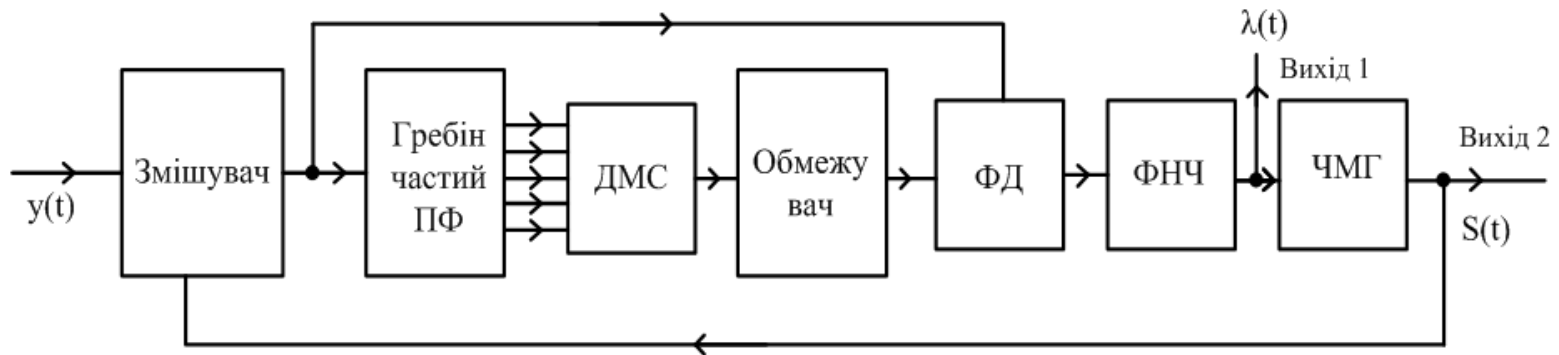
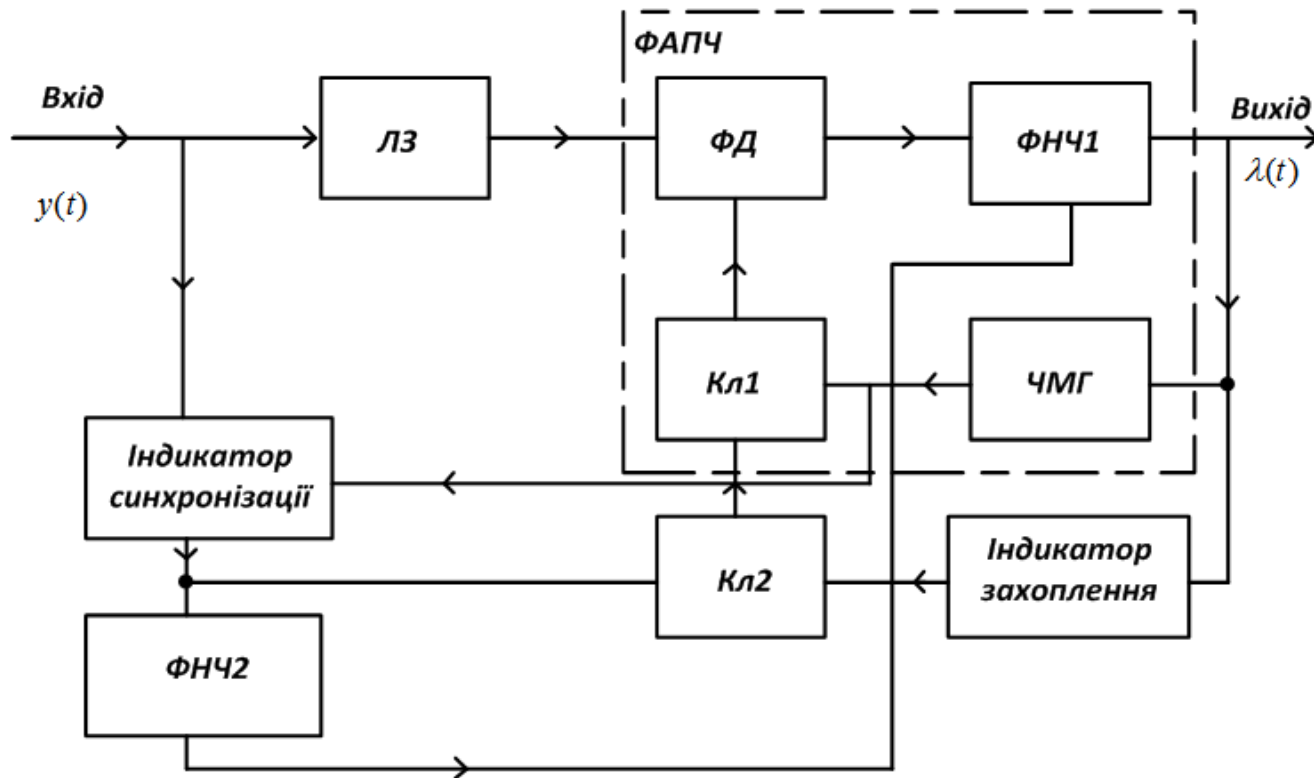


Рисунок 4.2 – Структурна схема комбінованого СФД із зворотнім зв'язком

Найбільший вплив флуктуаційних та імпульсних перешкод на сигнал з КМ створює поява в ньому аномальних перескоків фази на  $2\pi n$  рад, інтенсивність яких у більшості випадків визначає граничні флуктуаційні характеристики будь-яких частотних і фазових демодуляторів та вимірювачів, в тому числі і синхронно-фазових. Для підвищення завадостійкості демодуляторів сигналів з КМ використовуються пристрої відбракування або перескоків фази або ж аномальних викидів на виході демодулятора.

# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

На рисунку 4.3 наведено варіант функціональної схеми СФД з пристроєм відбракування перескоків фази [9].



# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

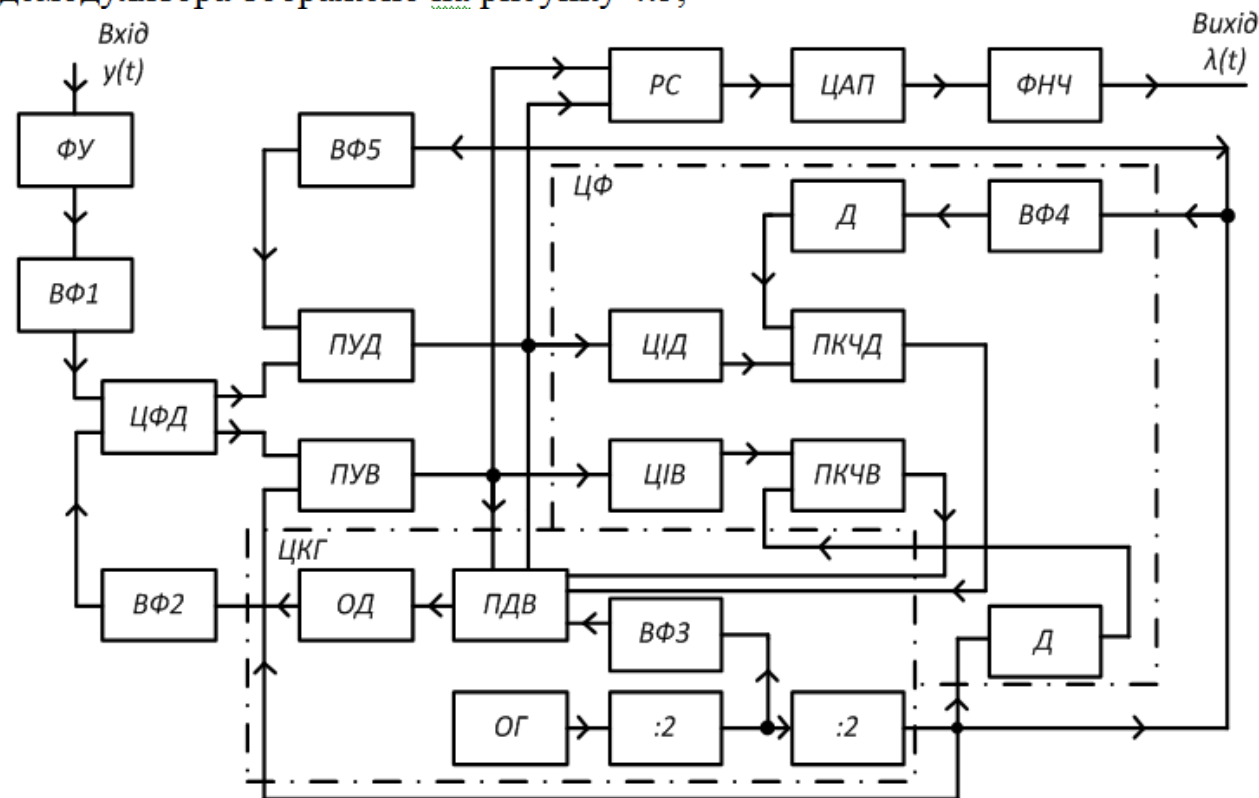
Виявлені стрибки фази використовуються для розмикання петлі СФД при їх появі з допомогою ключового пристрою Кл<sub>1</sub>. Враховуючи характерні для СФД інерційні та прогнозуючі властивості, він зможе відслідковувати зміни ПЧ під дією корисного повідомлення під час перескоку фази.

Змінами фази внаслідок корисної модуляції можна знехтувати, так як вимірювання частоти (фази) проводиться відносно опорного сигналу, одержаного на виході ЧМГ, Це дозволяє різко підвищити надійність виявлення перескоків фази та зменшити ймовірність помилкового виявлення. Лінія затримки забезпечує випереджальну роботу індикатора синхронізму по відношенню до СФД. Час затримки залежить від широкосмуговості повідомлення та ППЧ, а також від запізнювання в СФД і може становити від одного до декількох десятків періодів ПЧ. Отже, демодулятор КМ-сигналів має більш високу завадостійкість в порівнянні з демодуляторами без пристроїв відбраковування аномалій.

# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

Серед великої кількості відомих методів побудови та схем цифрових синхронно-фазових демодуляторів і вимірювачів, завдяки простоті технічної реалізації і досить високій завадостійкості при гаусівських перешкодах, широке використання отримала схема ЦФД з пристроєм додавання і віднімання, яка працює по критерію перетину нулів вхідного сигналу.

Функціональну схему такого демодулятора зображено на рисунку 4.5,



# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

Структурна схема ЦСФД на основі МПК USIII показана на рисунку 4.8. ЦСФД є спеціалізованою мікро ЕОМ. Обробка сигналів ведеться центральним 32-розрядним процесорним елементом (ЦПЕ), виконаним за схемою з неповним прискореним переносом.

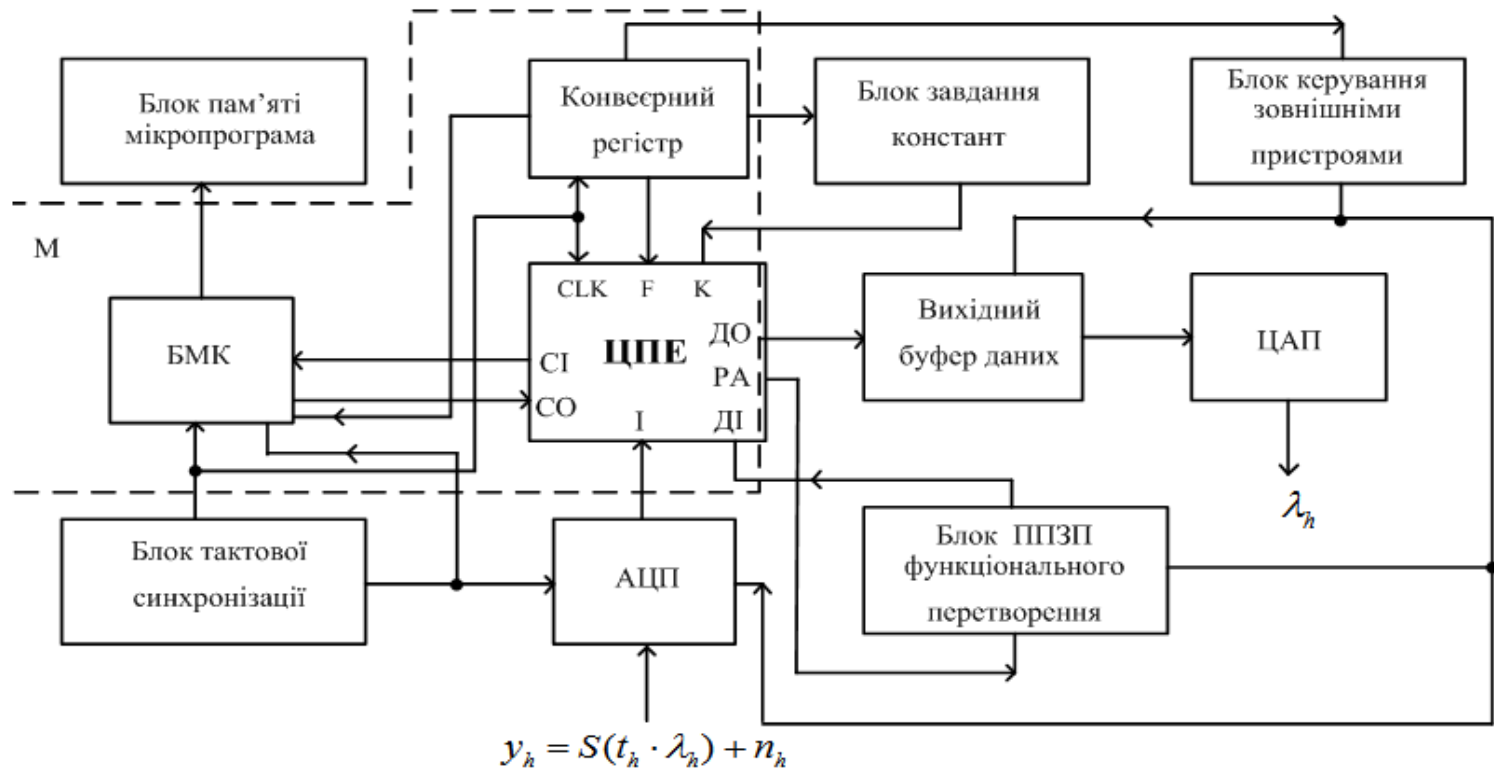


Рисунок 4.8 – Структурна схема ЦСФД на основі МПК UltraSPARCIISun



# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

Алгоритм програми ЦСФД на МПК USIIS наведені у додатку А. В подальшому для позначення мікро команд виконуваних МП, будемо застосовувати мнемонічні позначення,

У загальному випадку стежувальний СФВ (СФД) може адаптуватися як до постійно змінюваних характеристик повідомлення, сигналів та завад, так і до зміни власних параметрів СФВ (СФД).

В якості контрольованих параметрів повідомлень, сигналів та завад можуть використовуватись закони їх розподілу або окремі числові характеристики цих законів (часові відліки різних порядків, спектральні щільності потужності і т.д.). Самоналаштування вимірювача проводиться шляхом автоматичної зміни його структури або окремих параметрів: амплітудних характеристик блоків нелінійного перетворення (наприклад, завад), коефіцієнта підсилення петлі зворотнього зв'язку, постійних часу корегуючих ФНЧ та інші.

# Методи підвищення завадостійкості СФД в ТКС

При цьому одночасно може контролюватись якість роботи СФВ, а система може мати спеціальний оптимізатор, який робить налаштування параметрів вимірювача оптимальними, знаходячи екстремум якості по заданим критеріям. Все це може проводитись для покращення ефективності радіолінії, наприклад, збільшення кількості переданої інформації при заданій енергетичній ефективності.

Виходячи із аналізу завадостійкості СФВ, для забезпечення їх роботи при зменшенні порогу співвідношення сигнал/шум на вході, необхідно оптимізувати не тільки параметри демодулятора, а також індекс модуляції. Тому для побудови повністю адаптивних систем необхідно мати зворотній канал (двосторонній зв'язок), по якому відповідно до даних вимірювача могло б забезпечуватися керування зміною індексу модуляції. Цілком очевидно, що при зміні зовнішніх умов (наприклад, дальності), а можливості забезпечення заданої якості роботи демодулятора при первинній швидкості передачі інформації в системі і рівні вхідного сигналу, зворотний канал може використовуватися також для зміни швидкості передачі інформації (максимальній частоті в спектрі модулюючого сигналу), наприклад, за рахунок зміни швидкості відтворення з ЗП. Таким чином, до замкнутого контуру самоналаштування може входити зворотній канал.

# Висновки та результати дослідження що проведені в МКР

1. Удосконалений метод підвищення точності функціонування СФД на основі коригування по зовнішній задавальній дії;
2. Удосконалений метод підвищення точності функціонування СФД за рахунок введення додаткового розімкненого каналу керування з неодичним зворотнім зв'язком;
3. Структурна схема модифікованого СФД, яка характеризується підвищеною завадостійкістю за критерієм відношення сигнал/шум на виході у 1,2 рази;
4. Структурна схема модифікованого ЦСФД яка характеризується підвищеним значенням астатизму на один порядок у порівнянні з аналогами;
5. Структурна схема апаратно-програмної реалізації ЦСФД.
6. Алгоритм функціонування апаратно-програмного ЦСФД підвищеної точності.