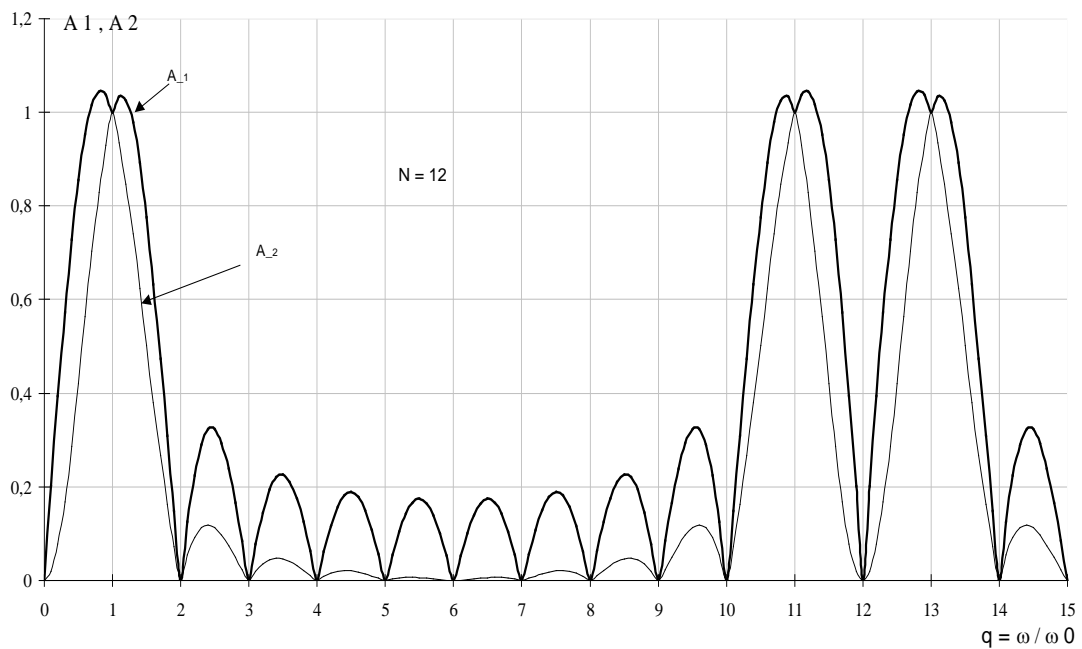


О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко

**Математичне моделювання систем та процесів.  
Математичне забезпечення мікропроцесорних  
пристроїв релейного захисту і автоматики  
електроенергетичних систем**



**Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний університет України  
“Київський політехнічний інститут”**

**О.С. Яндутьський, О.О. Дмитренко**

**Математичне моделювання систем та процесів.  
Математичне забезпечення мікропроцесорних  
пристроїв релейного захисту і автоматики  
електроенергетичних систем**

Під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндутьського

**Київ  
НТУУ «КПІ»  
2016**

УДК 621.311

*Гриф надано Вченою радою НТУУ "КПІ"  
(Протокол № 5 від 11.04.2016 р.)*

Рецензенти:

М.Ф. Сопель, д-р техн. наук, заступник директора-головний спеціаліст МПП «АНІГЕР»

А.В. Гінайло, директор ТОВ «НВП «Укренергоналадкавимірювання»

Відповідальний редактор  
Хоменко О.В., канд. техн. наук, доц.,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

### **Навчальне електронне видання**

**Яндутьський О.С., Дмитренко О.О.**

Математичне моделювання систем та процесів. Математичне забезпечення мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб. / О.С. Яндутьський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндутьського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 59 с. – Бібліогр.; с. 56 – 59. – електронне видання.

Розглянуто широке коло питань, присвячених різним концепціям побудови математичного забезпечення мікропроцесорних систем релейного захисту і автоматики, їх перевагам і недолікам. Приведено основні математичні моделі цифрових вимірювальних органів для пристроїв захисту розподільних електричних мереж. Докладно розглянуто способи побудови та наведені блок-схеми алгоритмів математичного забезпечення однопроцесорного пристрою релейного захисту і автоматики.

Призначений для магістрів спеціальності «141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації "Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії".

**УДК 621.311**

О.С. Яндутьський  
О.О. Дмитренко, 2016

## ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник " Математичне моделювання систем і процесів. Математичне забезпечення мікропроцесорних пристроїв релейного захисту і автоматики електроенергетичних систем" може бути використаний для вивчення дисципліни "Математичне моделювання систем і процесів". Посібник призначений для магістрів спеціальності «141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації "Системи управління виробництвом та розподілом електроенергії".

Матеріал посібника узагальнює різні концепції побудови математичного забезпечення мікропроцесорних систем релейного захисту і автоматики, їх перевагам і недолікам. Приведено основні математичні моделі цифрових вимірювальних органів для пристроїв захисту розподільних електричних мереж. Докладно розглянуто способи побудови та наведені блок-схеми алгоритмів математичного забезпечення однопроцесорного пристрою РЗА.

Матеріал посібника буде корисним при виконанні магістерських робіт та окремих розділів дипломних робіт. Посібник буде корисним і для студентів та аспірантів інших електроенергетичних спеціальностей.

Ваші побажання щодо обсягу та змісту навчального посібника будуть з вдячністю сприйняті укладачами та використані в подальшій роботі.

## Перелік скорочень та умовних позначень

АПВ - автоматичне повторне включення

АСУ ТП - автоматизована система управління технологічними процесами

АЧХ - амплітудно-частотна характеристика

АЦП - аналого-цифровий перетворювач

ЕЕМ - електроенергетичні мережі

ЕО - електроенергетичний об'єкт

ІЕД НАН України - інститут електродинаміки національної академії наук України

КЗ - коротке замикання

ЛП - лінійний перетворювач

МЕК - міжнародна комісія (англ. ІЕС - International Electrotechnical Commission)

МП РЗА - мікропроцесорні пристрої релейного захисту та автоматики

НТУУ «КПІ» - національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут"

ОЗП - оперативний запам'ятовуючий пристрій

РЗА - релейний захист та автоматика

ЦВО - цифровий вимірювальний орган

ЦР - цифрове реле

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ОРГАНИ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИБОРІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ.....	9
1.1. Загальні характеристики алгоритмів, що використовують властивості похідних, двох вибірок та фільтру Фур'є .....	12
1.1.1. Загальні характеристики алгоритму, що використовує властивості похідних.....	12
1.1.2. Загальні характеристики алгоритму двох вибірок.....	13
1.1.3. Загальні характеристики алгоритму цифрового вимірювального органу на основі фільтра Фур'є.....	14
1.2. Критерії для вибору оптимального алгоритму цифрової фільтрації пристрою релейного захисту та автоматики 6-35 кВ .....	16
1.3. Аналіз придатності алгоритму, що використовує властивості похідних .....	19
1.3.1. Аналіз точності перетворення вхідного сигналу .....	21
1.3.2. Аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових .....	21
1.3.3. Аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричній мережі із коливаннями частоти .....	22
1.3.4. Робота алгоритму, що використовує властивості похідних, у перехідному режимі .....	24
1.4. Аналіз придатності алгоритму двох вибірок .....	25
1.4.1. Аналіз точності перетворення вхідного сигналу залежно від числа вибірок .....	26
1.4.2. Аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових .....	26
1.4.3. Аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричних мережах із коливаннями частоти.....	27
1.4.4. Робота алгоритму двох вибірок у перехідному режимі .....	29
1.5. Аналіз придатності фільтра Фур'є .....	29
1.5.1. Аналіз точності перетворення вхідного сигналу залежно від числа вибірок N .....	30
1.5.2. Аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових .....	30
1.5.3. Аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричних мережах із коливаннями частоти.....	31
1.5.4. Робота фільтра Фур'є в перехідному режимі .....	33
1.6. Вибір оптимального цифрового вимірювального органу .....	34
2. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПРИБОРІВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ.....	37

2.1. Загальна структура та функції найпростішого однопроцесорного цифрового реле .....	37
2.2. Загальна структура математичного забезпечення однопроцесорних цифрових реле .....	39
2.3. Призначення та блок-схеми алгоритмів підпрограм, які входять у програму переривання по таймеру .....	41
2.3.1. Призначення програми переривання по таймеру .....	41
2.3.2. Блок-схема алгоритму процедури аналого-цифрового перетворення .....	42
2.3.3. Задачі та блок-схеми алгоритму підпрограм цифрової фільтрації та перевірки умов пуску захистів .....	44
2.3.4. Задачі та блок-схема алгоритму захисту за струмом оберненої послідовності .....	48
2.4. Блок-схема алгоритму підпрограми автоматичного повторного включення .....	52
Список літератури .....	56

## ВСТУП

В даний час більшість використовуваних в Україні пристроїв РЗА ЕЕМ відносяться до покоління електромеханічних і мікроелектронних реле і не відповідають сучасним науково-технічним вимогам. Один з напрямків удосконалювання - використання мікропроцесорів для виконання функцій релейного захисту й автоматики. Цифрові пристрої мають ряд переваг у порівнянні із системами, виконаними на традиційній елементній базі, у тому числі більш широкі експлуатаційні показники і можливість інтеграції їх у системи керування електроенергетичними об'єктами.

ЦР використовуються в системах РЗА вже більше десяти років. За цей час досягнуті високі показники надійності роботи, розроблені програмні пакети, що дозволяють інтегрувати ЦР в АСУ ТП.

При розробці ЦР слід враховувати особливості методів опрацювання вхідної аналогової інформації, створювати алгоритми захистів і автоматики, адаптовані до умов роботи вітчизняних ЕЕМ.

Значний внесок у розвиток математичного забезпечення МП систем РЗА внесли: ІЕД НАН України (м. Київ) - Стогній Б.С., Кириленко О.В., Сопель М.Ф.; ВНДІР (м. Чебоксари) - Шнеєрсон Е.М., Нудельман Г.С., Бірг А.Н.. Досить вагомі результати були отримані в Київському, Львівському, Мінському, Новочеркаському і Ризькому політехнічних інститутах.

Даний посібник призначений для вивчення основних принципів побудови математичного забезпечення МП РЗА, які знадобляться студентам при розробці вітчизняних МП РЗА. Знання особливостей функціонування цифрових фільтрів, уміння аналізувати їх переваги і недоліки допоможе студентам у майбутній практичній діяльності найбільш оптимально сформулювати систему релейного захисту ЕО і тим самим



підвищити надійність процесів виробництва і розподілу електроенергії. Враховуючи, що студенти отримали в попередніх курсах достатню підготовку з питань обчислювальної техніки та алгоритмізації, промислової електроніки та мікропроцесорної техніки, а також основ релейного захисту та автоматизації електроенергетичних систем, ми будемо зупинятись тільки на загальних питаннях побудови цифрових фільтрів та на особливостях функціонування математичного апарату МП РЗА.

# 1. ЦИФРОВІ ВИМІРЮВАЛЬНІ ОРГАНИ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ

В аналогових пристроях РЗА різних принципів виконання здійснюється вимір параметрів контрольованих синусоїдальних величин електроустановки (амплітуд струмів і напруг, зсувів фаз) шляхом впливу безперервних аналогових сигналів, що залежать від вхідних струмів і напруг, на фізичну систему (індукційну, електромагнітну, напівпровідникову і т.д.). За результатом цього впливу оцінюється знаходження контрольованих параметрів в заданій області.

Вимірювальні органи МП РЗА є цифровими, у яких вихідними сигналами ЛП є дискретні послідовності  $X_i(nT)$ , що однозначно відповідають вхідним аналоговим сигналам  $x_i(t)$ . Використання цифрової обробки аналогових сигналів і відповідних методів їх перетворення обумовлює нові властивості ЦВО, відсутні в електромеханічних і мікроелектронних реле, і вимагає їх врахування при проектуванні.

Розглядаючи аналогові сигнали й цифрові послідовності, прийmemo:  
 $x(t)$  – узагальнений аналоговий сигнал;

$X(nT)$  – послідовність чисел, результат аналого-цифрового перетворення з дискретністю  $T$ ;  $(-\infty < n < +\infty)$ , де  $n$  - ціле число;

$T$  – період дискретизації (час між двома сусідніми вибірками);

$f_0$  – основна (промислова) частота синусоїдального сигналу;

$\omega_0 = 2\pi f_0$  – кутова основна частота;

$T_0 = 2\pi/\omega_0$  - період основної частоти;

$N=T_0/T$  – число вибірок за період основної частоти.

В даному розділі розглянемо цифрові вимірювальні органи, які можуть використовуватися в релейному захисті й оберемо ЦВО для спрощеного однопроцесорного ЦР, призначеного для захисту ліній 6 – 35 кВ, враховуючи оптимальну швидкодію й простоту програмування.

Для виконання цих завдань необхідно підібрати ЦВО, що задовольняє наступним умовам:

- швидкодія ЦВО не повинна бути гіршою 20-30 мс;
- мати на виході ЦВО величини, що дозволяють визначити амплітуду й фазу вимірюваної величини;
- забезпечувати необхідну точність у нормальному й аварійному режимах роботи електроенергетичного об'єкту (пропускати тільки синусоїдальний сигнал промислової частоти й відфільтровувати аперіодичну, постійну і вищі гармонійні складові);
- забезпечувати необхідну точність при коливаннях частоти енергосистеми;
- витрати часу на обробку повинні бути невисокими.

В пристроях РЗА застосовується велика кількість різних алгоритмів ЦВО. Найбільш швидкодіючими є алгоритми, що використовують миттєві значення вхідного сигналу [1, 2]. Однак фільтруючими властивостями дані алгоритми не мають, і одержати на виході взаємно ортогональні функції неможливо. Також високу швидкодію мають алгоритми ЦВО, що використовують властивості похідних [4]. Наступними по швидкодії є алгоритми ЦВО по двом [2] і трьом [1, 2] вибіркам. Але найчастіше в пристроях РЗА 6-35 кВ використовуються ЦВО, побудовані на основі фільтра Фур'є [1-3, 5-7]. Даний фільтр дозволяє виділити взаємно ортогональні функції вхідного сигналу. Інколи використовується ЦВО, що використовує метод найменших квадратів [5,

б)]. У даному ЦВО спочатку визначається регресійна модель вхідного аналогового сигналу, у яку включаються різні гармонійні складові, включаючи аперіодичну. Потім відбувається адаптація реального сигналу під отриману модель. Похибки перетворення по амплітуді при наявності у вхідному сигналі аперіодичної складової не перевищують 2.5 %, що є дуже високим показником якості фільтрації. Однак, невисока швидкодія (не менше 30 мс) і значна складність при реалізації не сприяють широкому застосуванню алгоритму найменших квадратів. В деяких мікропроцесорних пристроях РЗА розподільних мереж використовується фільтр Калмана, де застосовується лінійна рекурсивна фільтрація. Для ефективного використання даного фільтру необхідні попередні відомості про імовірнісні характеристики сигналів завад, які повинні представлятися випадковими гауссовськими послідовностями. Однак вільні складові завад у вхідних ланцюгах при КЗ не мають у загальному випадку таких характеристик, а їх рівні й спектральний склад суттєво різняться залежно від конфігурацій і режимів роботи електроенергетичного об'єкту. Тобто, область використання даного фільтру обмежена і витрати машинного часу досить суттєві.

Тому надалі будемо розглядати ЦВО, на виході яких можливо одержати амплітуду й фазу вимірюваної величини, які характеризуються швидкодією не гірше одного періоду основної частоти (20 мс) й не потребуючі значних витрат машинного часу:

- алгоритм, що використовує властивості похідних;
- алгоритм двох вибірок;
- алгоритми ЦВО на базі фільтра Фур'є.

Нижче розглядаються загальні характеристики наведених ЦВО.

## 1.1. Загальні характеристики алгоритмів, що використовують властивості похідних, двох вибірок та фільтру Фур'є

### 1.1.1. Загальні характеристики алгоритму, що використовує властивості похідних

В основу розглянутого алгоритму покладена можливість визначення амплітуди  $X$  и фази  $\varphi$  синусоїдального сигналу  $x(t) = X \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi)$  частоти  $\omega_0$  по відомих у довільний момент часу значенням сигналу  $x(t)$  і його похідній:

$$x'(t) = \omega_0 \cdot X \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \varphi).$$

Запропоновано [45, 71] наступний алгоритм визначення  $X$  та  $\varphi$ , математичний вираз для яких наведено нижче:

$$\begin{cases} X = \sqrt{x^2(t) + \left(\frac{x'(t)}{\omega_0}\right)^2} \\ \omega_0 t + \varphi = \arctg \frac{\omega_0 x(t)}{x'(t)} \end{cases} \quad (1.1)$$

Виразу (1.1) відповідає векторне співвідношення:

$$\vec{X}(t) = X \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j\omega_0 t} = \vec{X} \cdot e^{j\omega_0 t} = \frac{x'(t)}{\omega_0} + j \cdot x(t). \quad (1.2)$$

Використовуючи  $n$ -у вибірку можна прийняти:

$$x(t) = x(nt); \quad x'(t) \approx \frac{1}{T} [x(nT) - x(nT - T)].$$

Звідки, з урахуванням (1.2) і співвідношень  $\omega_0 \cdot T = \omega_0 \frac{T_0}{N} = \frac{2\pi}{N}$  маємо алгоритм обчислення вектора  $\vec{X}(nT)$  на основі двох поточних значень цифрових вибірок  $x(nt)$  і  $x(nt-T)$  :

$$X(nT) = \left( \frac{N}{2\pi} + j \right) \cdot x(nT) - \frac{N}{2\pi} \cdot x(nT - T). \quad (1.3)$$

#### 4.1.2. Загальні характеристики алгоритму двох вибірок

Алгоритм, що забезпечує зміну обертового вектора вхідної величини  $\vec{X}(t) = X e^{j(\omega_0 t + \varphi)}$  на основі двох вибірок  $x(nT)$  і  $x(nT - mT)$  синусоїдального сигналу відомої частоти  $\omega_0$ , узятих через час  $mT$  визначається спільним розв'язком двох рівнянь, складеним для цих вибірок:

$$\begin{cases} x(nT - mT) = X \cdot \sin(\omega_0 nT + \varphi - \omega_0 mT) \\ x(nT) = X \cdot \sin(\omega_0 nT + \varphi) \end{cases}. \quad (1.4)$$

З (1.4) одержимо формулу ЦВО:

$$\begin{aligned} \vec{X}(nT) &= \frac{(x(nT) \cdot \cos(\omega_0 mT) - x(nT - mT))}{\sin(\omega_0 nT)} + j \cdot x(nT) = \\ &= \frac{1}{\sin(\omega_0 nT)} \times [x(nT) \cdot e^{j\omega_0 mT} - x(nT - mT)] \end{aligned} \quad (1.5)$$

З (1.5) одержимо формули для ортогональних складових:

$$\begin{cases} X_a = \frac{x(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) - x(nT - mT)}{\sin(\omega_0 nT)} \\ X_r = x(nT) \end{cases}. \quad (1.6)$$

З (1.5) одержимо також формули, по яких можна визначити амплітуду й фазу вхідного сигналу:

$$\begin{cases} X = \frac{1}{|\sin \omega_0 mT|} \cdot \sqrt{([x(nT - mT)]^2 - 2 \cdot x(nT - mT) \cdot x(nT) \cdot \cos(\omega_0 mT) + [x(nT)]^2)} \\ d\varphi = \arctg\left(\frac{x(nT) \cdot \sin(\omega_0 nT)}{x(nT) \cdot \cos(\omega_0 nT) - x(nT - mT)}\right) \end{cases} \quad (1.7)$$

### 1.1.3. Загальні характеристики алгоритму цифрового вимірювального органу на основі фільтра Фур'є

Фільтр Фур'є базується на виділенні коефіцієнтів  $a$  і  $b$  першої гармонійної складової ряду Фур'є  $x_0(t) = a \cdot \cos \omega_0 \cdot t + b \cdot \sin \omega_0 \cdot t$  функції  $x(t)$ :

$$\begin{aligned} a &= \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T_0}^t x(t) \cdot \cos \omega_0 t dt; & b &= \frac{2}{T} \cdot \int_{t-T_0}^t x(t) \cdot \sin \omega_0 t dt; \\ X(t) &= a - jb = \frac{2j}{T_0} \cdot \int_{t-T_0}^t x(t) \cdot e^{-j\omega_0 t} dt. \end{aligned} \quad (1.8)$$

Вираз (1.8) характеризує алгоритм Фур'є для ідеального випадку «гладкої» функції  $x(t)$  ( $N=\infty$ ) [1, 2]. Але, практичний інтерес представляє алгоритм, реалізований на основі елементів цифрової обробки сигналів, при кінцевому числі вибірок  $N$ .

$$\bar{X}(nT) = \frac{2j}{N} \cdot \sum_{n=N+1}^n \left( x(nT) \cdot e^{-j\omega_0 nT} \right). \quad (1.9)$$

З виразу (1.9) одержимо вираз для ортогональних складових  $k$ -ї гармоніки:

$$X_a = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left( x(t) \cdot \cos\left(2\pi \frac{kn}{N}\right) \right); \quad X_r = \frac{2}{N} \cdot \sum_{n=0}^{N-1} \left( x(t) \cdot \sin\left(2\pi \frac{kn}{N}\right) \right). \quad (1.10)$$

За значеннями ортогональних складових обчислюються амплітуда й фаза вхідного аналогового сигналу:

$$X_m = \sqrt{X_a^2 + X_r^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{X_r}{X_a}\right).$$

У роботах [6-10] розглянуті фільтри, що базуються на алгоритмі Фур'є, але з використанням не гармонійних коефіцієнтів, а прямокутних або трапеціодальних.

Фільтр Уолша використовує прямокутні функції Уолша, в іншому алгоритм аналогічний фільтру Фур'є:

$$W_1 = \frac{1}{T_0} \cdot \int_{t-T_0}^t x(t) \cdot wal(1,t) dt; \quad W_2 = \frac{1}{T_0} \cdot \int_{t-T_0}^t x(t) \cdot wal(2,t) dt, \quad (1.11)$$

де: wal(1,t), wal(2,t) – ортогональні одиничні функції Уолша періоду  $T_0$ . Амплітуда й фаза вхідного аналогового сигналу першої гармоніки обчислюються з певними похибками за формулами:

$$X_m = \frac{1}{0.9} \cdot \sqrt{W_1^2 + W_2^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{W_1}{W_2}\right).$$

Співвідношення (1.11) дають прийнятний результат лише при невеликій кількості вищих гармонік у вхідному сигналі. При цьому постійна складова й парні гармоніки повністю усуваються. Аналогічним чином працюють фільтри з використанням трапеціодальних складових.

Ці фільтри працюють аналогічно фільтру Фур'є й розроблені з метою спрощення обчислень. Однак спрощення привело до погіршення точності перетворення й погіршенню фільтраційних властивостей. Тому надалі із цієї групи фільтрів розглядається тільки фільтр Фур'є.



## 1.2. Критерії для вибору оптимального алгоритму цифрової фільтрації пристрою релейного захисту та автоматики 6-35 кВ

Як відомо, вхідними інформаційними сигналами для пристроїв РЗА є струми й напруги в різних точках енергосистеми. У загальному випадку вони являють собою функції часу довільної з фізичної точки зору форми. Для подальшого дослідження й розв'язку різних практичних завдань необхідно вибрати з урахуванням конкретних умов роботи релейного захисту досить загальні, точні й у теж час прості й зручні математичні моделі вхідних сигналів.

Відомо [6, 7, 11], що миттєві значення струму й прикладеної напруги кожної фази при трифазному КЗ у найпростішому електричному колі зв'язані таким способом:

$$u_1 = i \cdot r_1 + L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}. \quad (1.12)$$

Розв'язком рівняння (1.12) є вираз:

$$i_1 = I_{1ав} \cdot \sin(\omega \cdot t + \alpha - \varphi_j) + [I_{1доав} \cdot \sin(\alpha - \varphi) - I_{1ав} \cdot \sin(\alpha - \varphi_j)] \cdot e^{-t/T_1}, \quad (1.13)$$

де:  $I_{1ав}$  - амплітуда періодичної складової струму короткого замикання;

$\omega$  - кутова частота;

$\alpha$  - фаза включення;

$\varphi_j$  - кут між напругою й струмом в аварійному режимі;

$I_{1доав}$  - амплітуда доаварійного струму;

$\varphi$  - кут між напругою й струмом у доаварійному режимі роботи електроенергетичного об'єкту;

$T_1$  - постійна часу затухання аперіодичної складовій.

Первинний струм КЗ електричної мережі до 35 кВ описується виразом [87, 88]:

$$i_1 = \sum_{k=1}^{\infty} [I_{1ae,k} \cdot \sin(\omega_k \cdot t - \varphi_k)] + I_{1a} \cdot e^{-t/T_1}, \quad (1.14)$$

де:  $I_{1ae,k}$  - амплітуда k-й гармоніки періодичної складової первинного струму КЗ;

$I_{1a}$  - амплітуда аперіодичної складової первинного струму КЗ.

Аперіодична складова може бути присутньою у вхідному сигналі внаслідок виникнення перехідного процесу, викликаного КЗ на тій ділянці, що захищається, або на суміжних ділянках енергосистеми, включенням або відключенням комутаційного обладнання, силового устаткування. Для розподільних мереж напругою до 35 кВ включно постійна часу затухання аперіодичної складової змінюється в межах:  $0.005 \leq T_1 \leq 0.1$  [7, 11].

Низькочастотні гармонійні складові з'являються у вхідному сигналі при віддалених КЗ, високочастотні - викликаються різними причинами, у тому числі при включенні або відключенні комутаційного обладнання, силового устаткування, випрямного або освітлювального навантаження [89].

Пристрій РЗА повинен точно вимірювати вхідні аналогові сигнали як у нормальному, так і в аварійному режимах роботи електричної мережі, для чого слід правильно вибрати ЦВО. При розробці мікропроцесорних пристроїв РЗА часто використовується традиційний метод усунення впливу високочастотних складових на якість виміру шляхом застосування аналогових фільтрів низьких частот. Однак використання такого фільтра приводить до збільшення вартості апаратного забезпечення обладнання. Окрім ємнісні елементи аналогового фільтра викликають зміну фази й приводять до тимчасової затримки при передачі вхідного сигналу. Оскільки проєктований пристрій призначено для роботи в електричних мережах 6-35 кВ, де вартість – істотний фактор, то від використання аналогових фільтрів вирішено відмовитися й завдання відбудування від

високочастотних складових повинно вирішуватись тільки програмним шляхом.

На етапі проектування пристрою РЗА необхідно виконати аналіз працездатності різних алгоритмів виміру й цифрової обробки вхідних аналогових сигналів і вибрати оптимальний шляхом розв'язку наступних завдань:

- Виконати аналіз точності перетворення вхідного сигналу в нормальному режимі роботи електричної мережі. Вхідний сигнал для аналізу:

$$x(t) = X_m \sin(\omega_0 t + \varphi). \quad (1.15)$$

- Виконати аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових. Вхідний сигнал для аналізу:

$$x(t) = \sum_{k=1}^{\infty} X_k \cdot \sin(\omega_k \cdot t + \varphi_k). \quad (1.16)$$

- Виконати аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричній мережі із коливаннями частоти в межах:  $f = 50 \pm 1.5$  Гц.
- Виконати аналіз точності перетворення в аварійному режимі роботи електричної мережі при наявності у вхідному сигналі аперіодичної складової. Вхідний сигнал для аналізу:

$$x(t) = X_a \cdot e^{-t/T_1} + X_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (1.17)$$

де  $X_a$  – амплітуда аперіодичної складової.

Для проведення аналізу необхідно розглянути основні характеристики ЦВО - частотні характеристики  $\underline{H}(\omega), \underline{H}(-\omega)$ .

При зміні числа точок дискретизації ЦВО вихідний комплексний сигнал відповідає кінцю вектора  $\vec{H}(\omega)$ , що рухається по еліпсу (див. рис.

1.1), поверненому відносно осі абсцис на кут  $d\varphi$ , причому більша  $A_1(\omega)$  і мала  $A_2(\omega)$  напівосі еліпсу рівні:

$$\begin{aligned} A_1(\omega) &= \frac{1}{2} \cdot [H(\omega) + H(-\omega)] \\ A_2(\omega) &= \frac{1}{2} \cdot |H(\omega) - H(-\omega)| \\ d\varphi &= \arg[\overline{H}(\omega)] \end{aligned} \quad (1.18)$$

Таким чином, відповідно до залежності, наведеної на рис. 1.1, кінець вектора при вхідному одиничному за амплітудою синусоїдальному сигналі описує не окружність, а еліпс, тому амплітуда вимірюваного вектора змінюється в часі в межах від  $A_1(\omega)$  до  $A_2(\omega)$ .

При відмінності частоти енергосистеми від значення частоти, що використовується у ЦВО ( $\omega_0 \neq \omega$ ), вимірюваний вектор рухається по еліпсу, а сам еліпс здійснює обертовий рух відносно початку координат. Таким чином, кінець результуючого вектора може бути розташований в окремі моменти часу в області, що обмежена кільцем (див. рис. 1.2) із зовнішнім радіусом  $A_1(\omega)$  і внутрішнім радіусом  $A_2(\omega)$ .

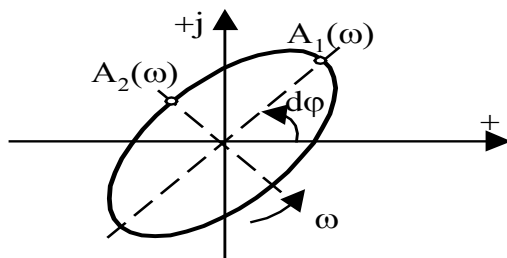


Рис. 1.1 Рух результуючого вектору при  $\omega_0 = \omega$ .

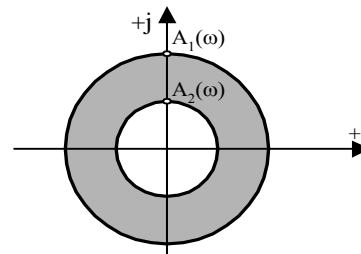


Рис. 1.2 Кільце, що обмежує рух результуючого вектору при  $\omega_0 \neq \omega$ .

### 1.3. Аналіз придатності алгоритму, що використовує властивості похідних

Вираз, що описує алгоритм:

$$X(nT) = \left( \frac{N}{2\pi} + j \right) \cdot x(nT) - \frac{N}{2\pi} \cdot x(nT - T). \quad (1.19)$$

Після ряду перетворень із виразу (1.19) одержимо значення модуля й аргументу частотної характеристики  $H(\omega)$ :

$$\begin{aligned} |\overline{H}(\omega)| &= \sqrt{\frac{N^2}{2\pi^2} \cdot (1 - \cos \omega T) + \frac{N}{\pi} \cdot \sin \omega T + 1} \\ \arg[\overline{H}(\omega)] &= \arctg \left( \frac{\pi}{N} \cdot \text{ctg}^2 \frac{\omega T}{2} + \text{ctg} \frac{\omega T}{2} + \frac{\pi}{N} \right). \end{aligned} \quad (1.20)$$

Аналогічні перетворення виконуються для одержання значень модуля й аргументу частотної характеристики  $H(-\omega)$ :

$$\begin{aligned} |\overline{H}(-\omega)| &= \sqrt{\frac{N^2}{2\pi^2} \cdot (1 - \cos \omega T) - \frac{N}{\pi} \cdot \sin \omega T + 1} \\ \arg[\overline{H}(-\omega)] &= \arctg \left( \frac{\pi}{N} \cdot \text{ctg}^2 \frac{\omega T}{2} - \text{ctg} \frac{\omega T}{2} + \frac{\pi}{N} \right). \end{aligned} \quad (1.21)$$

Відповідно до виразу (1.18) визначимо значення великий і малої напівосей еліпсу, а також кут повороту вектору із врахуванням того, що  $T = 2\pi/\omega_0 N$  й за умови нерівності частот дискретизації ЦВО й енергосистеми  $q = \omega/\omega_0 \neq 1$ :

$$\begin{aligned} A_{1,2}(q, N) &= \frac{\sqrt{\frac{N^2}{2\pi^2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{N} q \right) + \frac{N}{\pi} \sin \frac{2\pi}{N} q + 1} \pm \sqrt{\frac{N^2}{2\pi^2} \left( 1 - \cos \frac{2\pi}{N} q \right) - \frac{N}{\pi} \sin \frac{2\pi}{N} q + 1}}{2}. \quad (1.22) \\ d\varphi &= \left( \arctg \left( \frac{\pi}{N} \cdot \text{ctg}^2 \frac{\pi}{N} q + \text{ctg} \frac{\pi}{N} q + \frac{\pi}{N} \right) \right) \end{aligned}$$

Виконаємо аналіз придатності даного алгоритму відповідно до умов, зазначених вище.

### 1.3.1. Аналіз точності перетворення вхідного сигналу

Залежно від числа вибірок миттєвих значень за період промислової частоти  $N$  при нормальному режимі роботи електричної системи ( $q = 1$ ). Відповідно до виразу (1.22) будемо графік залежності верхньої й нижньої меж зміни амплітуди  $A_1$  і  $A_2$  від числа  $N$ . Залежність наведена на рис. 1.3.

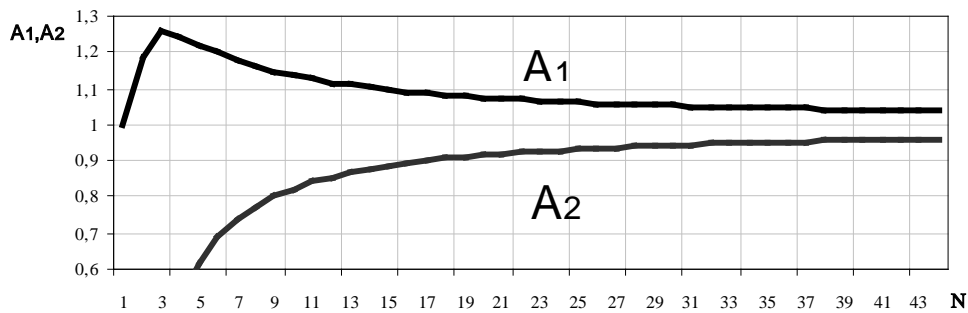


Рис. 1.3. Залежність точності виміру амплітуди вхідного сигналу від числа вибірок за період при  $f = 50$  Гц

Аналізуючи залежність, наведену на рис. 1.3, можна зробити висновок, що алгоритм має значні пульсації вимірів, які стають менш 5 % лише при  $N > 40$ , що вимагає для одержання необхідної точності (1-2 %) значно більш швидкодіючих, а отже, і більш дорогих обчислювальних засобів.

### 1.3.2. Аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових

Графік АЧХ, наведений на рис. 1.4, будувався відповідно до виразу (1.22) для трьох значень кількості вибірок  $N$  при змінному значенні параметру  $q$ .

Можна зробити висновок, що з ростом числа вибірок  $N$  диференціюючі властивості алгоритму збільшуються. Крім того, при використанні даного алгоритму постійна складова зовсім не пригнічується.

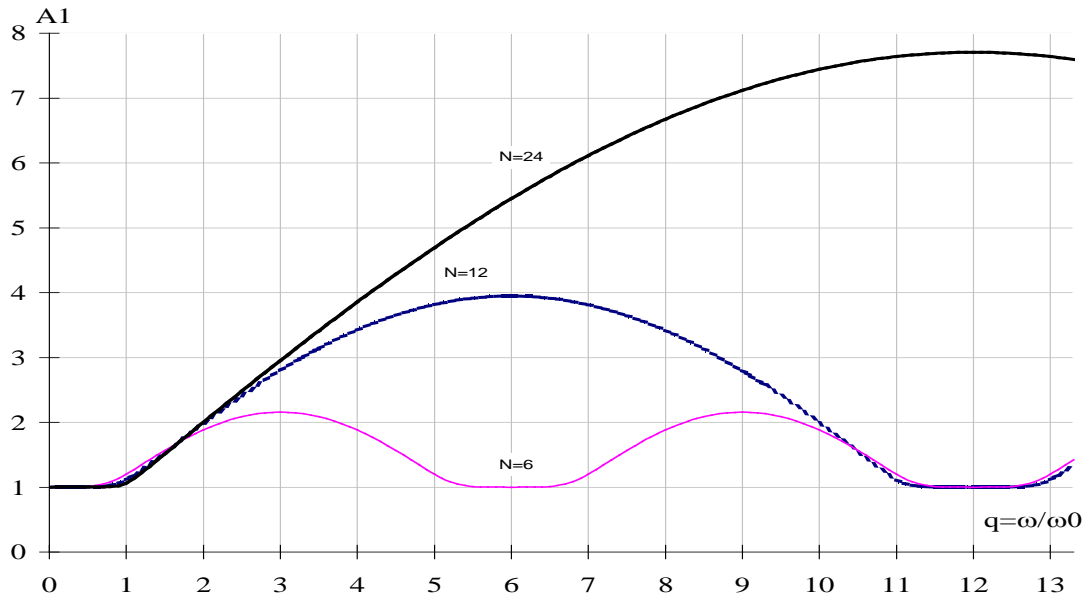


Рис. 1.4. Амплітудно-частотні характеристики алгоритму при різних числах вибірок при  $f = \text{var}$

### 1.3.3. Аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричній мережі із коливаннями частоти

Дослідження похибок роботи алгоритму проводиться для діапазону зміни частот  $f = f_0 \pm 1.5$  Гц, де  $f_0 = 50$  Гц, з урахуванням того, що

$q = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}$  при  $N = 12$ . Залежність похибок по амплітуді від частоти  $f$

наведена на рис. 1.5. Відносна похибка перетворення по амплітуді визначається по формулі:

$$\varepsilon_{1,2} = \left( \frac{A_{1,2}(f)}{A_{1,2}(f_0)} - 1 \right) \cdot 100, \% \quad (1.23)$$

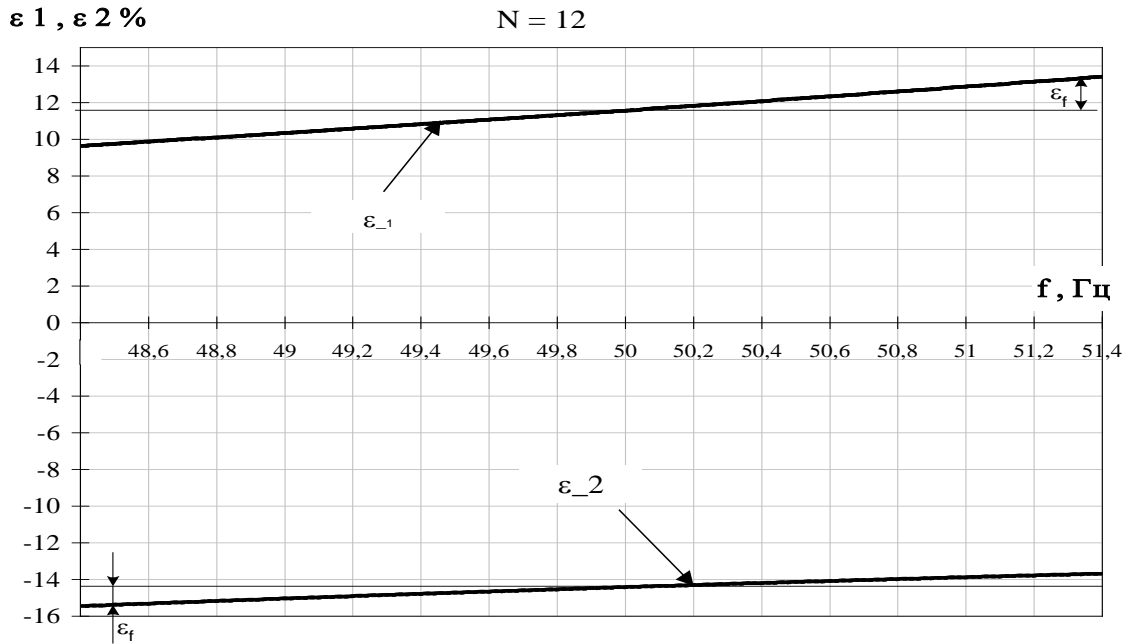


Рис. 1.5 Відносна похибка виміру по амплітуді сигналу першої гармоніки при коливаннях частоти

При відхиленні реальної частоти вхідного сигналу в заданому діапазоні від частоти вимірювального органу  $f_0$ , у будь-який момент часу вихідний сигнал буде відповідати вхідному з відносною похибкою  $-15.5\% \leq \varepsilon(f) \leq 12.5\%$ . При відсутності коливань частоти похибка виміру по амплітуді перебуває в діапазоні:  $-14.41\% \leq \varepsilon_{50} \leq 11.57\%$ . Похибка, викликана відхиленням частоти, рівна  $\varepsilon_f = \varepsilon - \varepsilon_{50}$  й перебуває в діапазоні  $-1.1\% \leq \varepsilon_f \leq 0.93\%$ .

Для визначення похибки виміру по фазі необхідно визначити кут повороту еліпсу  $d\varphi$  у будь-який момент часу при знаходженні вхідного вектора в діапазоні частот, заданому вище. З урахуванням виразу (1.22) визначається абсолютний зсув при числі дискретизації  $N = 12$ :

$$\Delta\psi_f = d\varphi - d\varphi_0, \quad (1.24)$$

де:  $d\varphi$  - кут повороту еліпса при частоті вхідного сигналу, рівної  $f$ ;



$d\varphi_0$  - кут повороту еліпса при частоті вхідного сигналу, рівної  $f_0 = 50$  Гц.

Графік залежності абсолютної похибки по фазі від частоти вхідного сигналу наведений на рис. 1.6. При аналізі залежностей, наведених на рис. 1.6, можна зробити висновок, що абсолютна похибка виміру по фазі лінійно залежить від частоти вхідного сигналу й у заданому діапазоні зміни частот буде перебувати в межах  $|\Delta\psi_f| \leq 0.35^\circ$ .

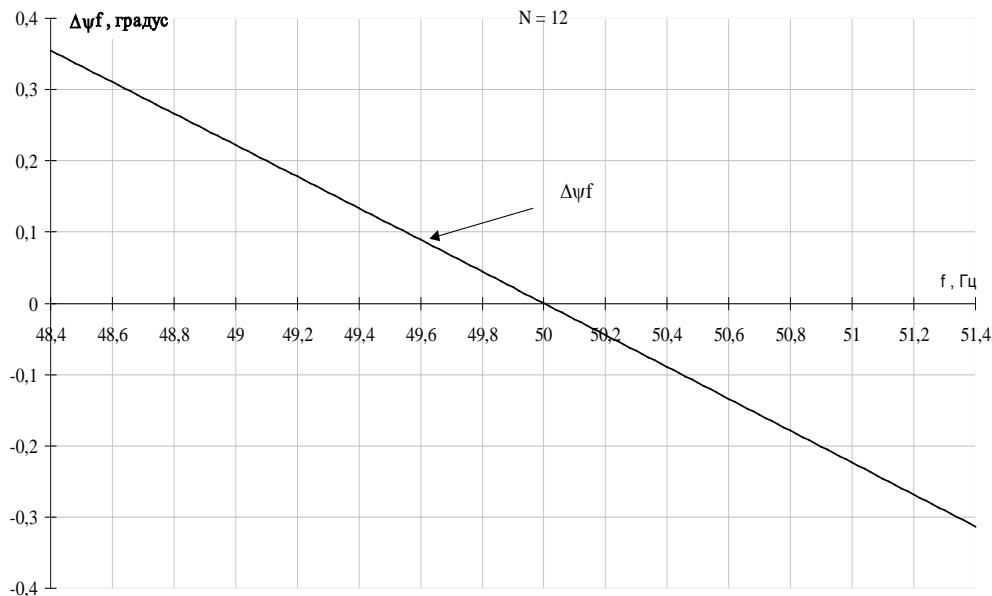


Рис. 1.6. Залежність абсолютної похибки по фазі від частоти вхідного сигналу

### 1.3.4. Робота алгоритму, що використовує властивості похідних, у перехідному режимі

Для перевірки роботи алгоритму використовувалося вираз (1.17). Виконувалось моделювання доаварійного і аварійного режимів роботи електричної мережі. Періодична й аперіодична складові аварійного режиму зв'язані з гармонійним сигналом доаварійного режиму відповідно до виразу (1.13). Перевірка роботи ЦВО проводилася для чотирьох значень постійної часу затухання  $T_1 = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$  для різних фаз включення  $\alpha = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ . За результатами моделювання

встановлено, що похибка за амплітудою, викликана наявністю у перехідному режимі аперіодичної складової, перебуває в діапазоні  $-13.0\% < \varepsilon_e \leq 0\%$ . Похибка по фазі перебуває в межах:  $-49^\circ \leq \Delta \psi_e \leq 0^\circ$ . Причому починаючи із третього періоду вплив аперіодичних складових з постійними часу  $T_1 = 0.005$  з,  $0.01$  незначний.

#### 1.4. Аналіз придатності алгоритму двох вибірок

Вираз, що описує алгоритм:

$$\bar{X}(nT) = \frac{1}{\sin(\omega_0 nT)} \cdot [x(nT) \cdot e^{j\omega_0 mT} - x(nT - mT)]. \quad (1.25)$$

Позначимо:  $\beta = \omega_0 mT$ . Після ряду перетворень із виразу (1.25) одержимо значення модулю й аргументу частотної характеристики  $H(\omega)$ :

$$\begin{aligned} |\bar{H}(\omega)| &= \frac{2}{\sin \beta} \cdot \left| \sin \frac{\beta + \omega mT}{2} \right| \\ \arg[\bar{H}(\omega)] &= \frac{\pi + mT\omega_0(1 - q)}{2}. \end{aligned} \quad (1.26)$$

Аналогічні перетворення виконуються для одержання значень модулю й аргументу частотної характеристики  $H(-\omega)$ :

$$|\bar{H}(-\omega)| = \frac{2}{\sin \beta} \cdot \left| \sin \frac{\beta - \omega mT}{2} \right|; \quad \arg[\bar{H}(-\omega)] = \frac{3\pi - \omega_0 mT(1 + q)}{2}. \quad (1.27)$$

Відповідно до виразу (1.18) визначимо за виразами (1.26, 1.27) значення великої і малої напівосей еліпсу, а також кут повороту вектору з урахуванням того, що  $T = 2\pi/\omega_0 N$  й за умови невідповідності частот дискретизації ЦВО й енергосистеми  $q = \omega/\omega_0 \neq 1$ :

$$A_{1,2}(q, N) = \frac{1}{\sin \frac{2\pi m}{N}} \cdot \left\| \sin \frac{\pi m \cdot (1+q)}{N} \right\| \pm \left\| \sin \frac{\pi m \cdot (1-q)}{N} \right\|; \quad d\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{m\pi \cdot (1-q)}{N}. \quad (1.28)$$

#### **1.4.1. Аналіз точності перетворення вхідного сигналу залежно від числа вибірок**

При нормальному режимі роботи електричної мережі ( $q = 1$ ) . У цьому випадку  $A_1(q) = 1$  і  $A_2(q) = 1$ , що відповідає відсутності відхилень виміру складових основної частоти алгоритмом двох вибірок, тобто для будь-яких значень  $N$  і  $m$  похибки у вимірі сигналу першої гармоніки при  $\omega_0 = \omega$  не існує:  $\varepsilon_{50} = 0$  %,  $\Delta\psi_{50} = 0^0$ .

#### **1.4.2. Аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових**

Графік амплітудно-частотної характеристики, наведений на рис. 1.7, будувався відповідно до виразу (1.28) для двох значень кількості вибірок  $N$  і двох значень  $m$ .

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 1.7, можна відзначити наявність диференціюючих властивостей алгоритму двох вибірок (посилення сигналів високих частот), які посилюються при збільшенні  $N$  і зменшенні  $m$ . При малих  $N$  і більших  $m$  посилення сигналів високих частот відбувається меншою мірою, але підсилюються сигнали низьких частот. Крім того, при використанні даного алгоритму постійна складова не пригнічується, а підсилюється.

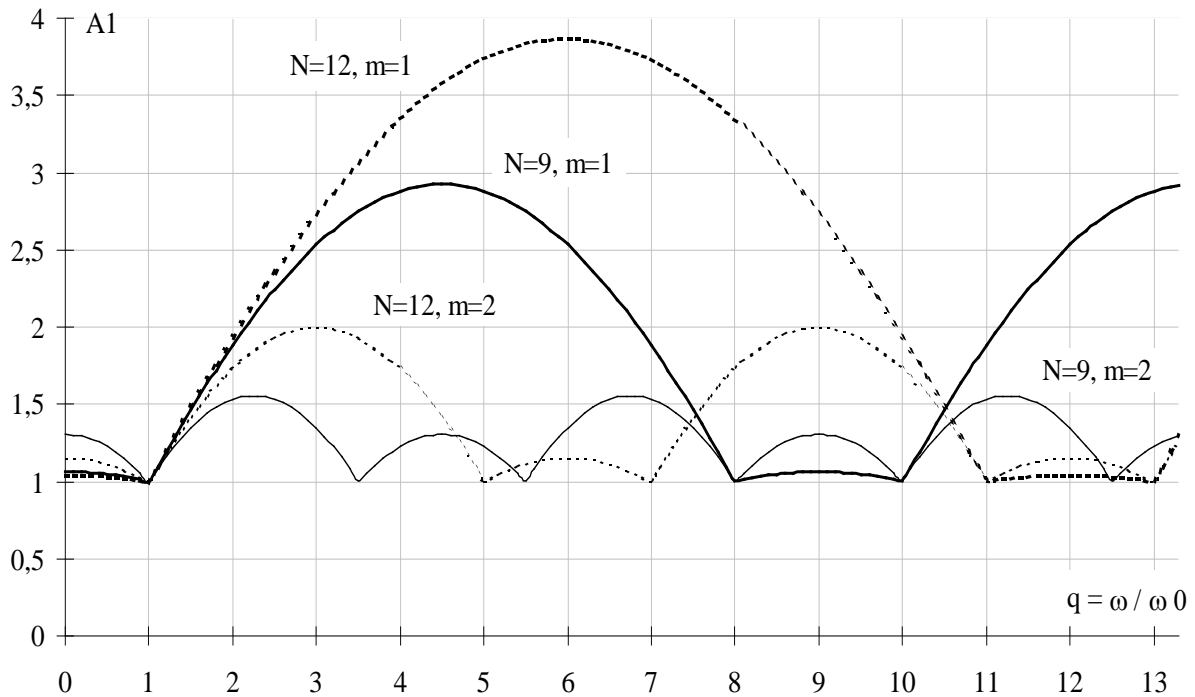


Рис. 1.7 Амплітудно-частотні характеристики алгоритму двох вибірок

### 1.4.3. Аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричних мережах із коливаннями частоти

Відносна похибка перетворення ЦВО по амплітуді  $\varepsilon_{f1,2}$  визначається за виразом (1.23) при числі дискретизації  $N = 12$  і  $m = 2$ . Графік залежності похибок по амплітуді від частоти  $f$  наведений на рис. 1.8. Аналіз залежностей, наведених на рис. 1.8, показує, що при відхиленні реальної частоти вхідного сигналу в заданому діапазоні від частоти ЦВО  $f_0$ , у будь-який момент часу вихідний сигнал буде відповідати вхідному з відносною похибкою  $|\varepsilon_f| \leq 2.75 \%$ .

З урахуванням виразу (1.28) визначається абсолютна похибка виміру по фазі при роботі електричних мереж із коливаннями частоти при числі дискретизації  $N = 12$  і  $m=2$ :

$$d\psi = d\varphi - d\varphi_0 = \frac{m\pi}{N} \cdot \left(1 - \frac{f}{f_0}\right). \quad (1.29)$$

Графік залежності абсолютної похибки по фазі від частоти вхідного сигналу наведений на рис. 1.9. Аналіз залежності, наведеної на рис. 1.9, показує, що абсолютна похибка виміру по куту лінійно залежить від частоти вхідного сигналу, і в заданому діапазоні зміни частот буде перебувати в межах  $|\Delta\psi_f| \leq 1.0^\circ$ .

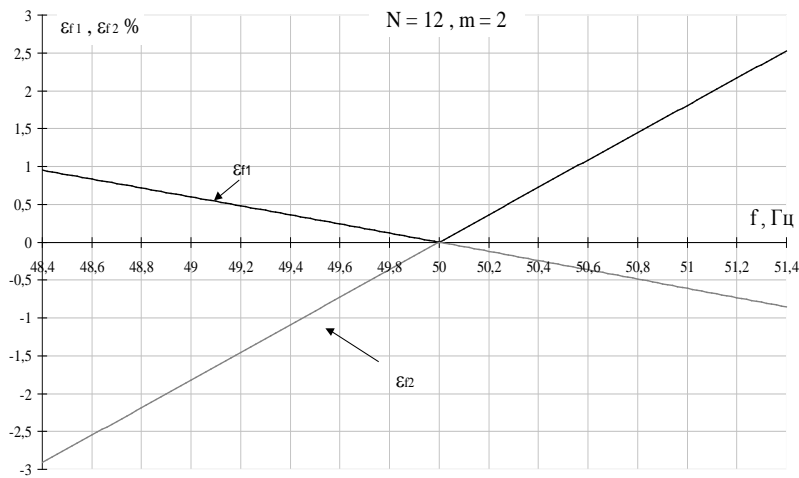


Рис. 1.8 Відносна похибка виміру по амплітуді сигналу першої гармоніки при коливаннях частоти електричних мереж для алгоритму двох вибірок.

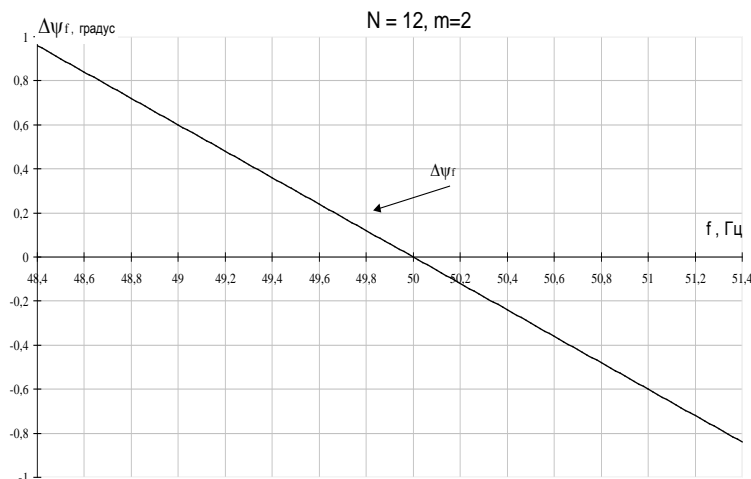


Рис. 1.9 Залежність абсолютної похибки по фазі від частоти вхідного сигналу для алгоритму двох вибірок

#### 1.4.4. Робота алгоритму двох вибірок у перехідному режимі

Для перевірки роботи алгоритму використовувалося вираз (1.17). Виконувалось моделювання доаварійного і аварійного режимів роботи електричної мережі. Періодична й аперіодична складові аварійного режиму зв'язані з гармонійним сигналом доаварійного режиму відповідно до виразу (1.13). Перевірка роботи ЦВО проводилася для чотирьох значень постійної часу затухання  $T_1 = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$  для різних фаз включення  $\alpha = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ . За результатами моделювання встановлено, що похибка за амплітудою, викликана наявністю у перехідному режимі аперіодичної складової, перебуває в діапазоні  $0\% \leq \varepsilon_e \leq 63\%$ . Абсолютна похибка по фазі перебуває в межах:  $0^\circ \leq \Delta\psi_e \leq 26.2^\circ$ .

#### 1.5. Аналіз придатності фільтра Фур'є

Вираз, що описує алгоритм:

$$\bar{X}(nT) = \frac{2j}{N} \cdot \sum_{n=N+1}^n (x(nT) \cdot e^{-j\omega_0 nT}). \quad (1.30)$$

Після ряду перетворень із виразу (1.30) одержимо значення модулю й аргументу частотної характеристики  $H(\omega)$ :

$$|\bar{H}(\omega)| = \frac{2}{N} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\omega NT}{2}}{\sin \frac{(\omega_0 - \omega)T}{2}} \right|; \quad \arg[\bar{H}(\omega)] = - \left( \frac{\pi}{2} + \frac{N\omega T}{2} + \frac{(\omega_0 - \omega) \cdot T}{2} + \alpha \right). \quad (1.31)$$

Аналогічні перетворення виконуються для одержання значень модулю й аргументу частотної характеристики  $H(-\omega)$ :

$$|\overline{H}(-\omega)| = \frac{2}{N} \cdot \left| \frac{\sin \frac{\omega NT}{2}}{(\omega_0 + \omega)T} \right|; \quad \arg[\overline{H}(-\omega)] = -\left( \frac{\pi}{2} + \frac{N\omega T}{2} + \frac{(\omega_0 + \omega) \cdot T}{2} - \alpha \right). \quad (1.32)$$

Відповідно до (1.18, 1.31, 1.32) визначимо значення великої і малої напівосей еліпсу й кут повороту вектору з урахуванням того, що  $T = 2\pi/\omega_0 N$  й за умови нерівності частот дискретизації й електричної мережі  $q = \omega/\omega_0 \neq 1$ :

$$A_{1,2}(q, N) = \frac{|\sin(\pi \cdot q)|}{N} \cdot \left\| \frac{1}{\sin \frac{\pi \cdot (1-q)}{N}} \right\| \pm \left\| \frac{1}{\sin \frac{\pi \cdot (1+q)}{N}} \right\|; \quad d\varphi = -\left( \pi \cdot \left( \frac{1}{2} + q + \frac{(1-q)}{N} \right) + \alpha \right). \quad (1.33)$$

### 1.5.1. Аналіз точності перетворення вхідного сигналу залежно від числа вибірок N

При нормальному режимі роботи електричних мереж ( $q = 1$ ). У цьому випадку  $A_1(q) = 1$  і  $A_2(q) = 1$ , що відповідає відсутності відхилень виміру складових основної частоти алгоритмом фільтра Фур'є, тобто для будь-яких значень числа вибірок похибки у вимірі сигналу першої гармоніки при  $\omega_0 = \omega$  не існує:  $\varepsilon_{50} = 0 \%$ ,  $\Delta\psi_{50} = 0^\circ$ .

### 1.5.2. Аналіз точності перетворення при наявності у вхідному сигналі вищих гармонійних складових

Графік амплітудно-частотної характеристики (рис. 1.10) будувався відповідно до виразу (1.33) для числа вибірок  $N = 12$ .

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 4.10, слід зазначити, що фільтр Фур'є повністю пригнічує постійну складову й вищі гармонійні складові із частотами, кратними  $\omega_0$ , крім гармонік із частотами  $\omega_i = \omega_0 \cdot (l \cdot N \pm 1)$ , де  $l \rightarrow \infty$ . При  $N=12$  – це сигнали із частотами, рівними

$11 \cdot \omega_0$  й  $13 \cdot \omega_0$ . Посилення сигналів якої-небудь частоти не відбувається, а складові із частотами, не кратними  $\omega_0$  пригнічуються частково, не менш 70%.

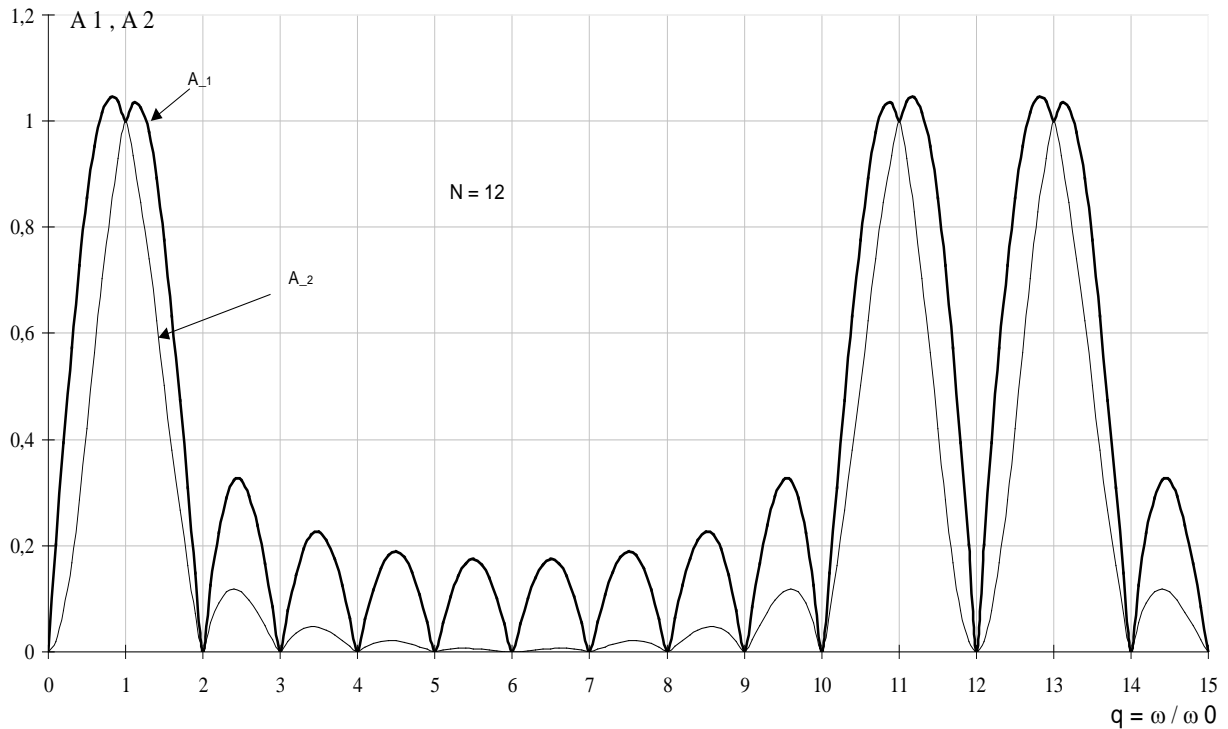


Рис. 1.10 Амплітудно-частотні характеристики фільтра Фур'є при числі дискретизації  $N=12$

### 1.5.3. Аналіз точності перетворення при роботі обладнання в електричних мережах із коливаннями частоти

Відносна похибка перетворення фільтру по амплітуді  $\varepsilon_{f1,2}$  визначається за виразом (1.23) при числі дискретизації  $N = 12$ . Графік залежності похибок по амплітуді від частоти  $f$  наведений на рис. 1.11. Аналіз залежностей, наведених на рис. 1.11, показує, що при відхиленні реальної частоти вхідного сигналу в заданому діапазоні від частоти



фільтра  $\omega_0$ , у будь-який момент часу вихідний сигнал буде відповідати вхідному з відносною похибкою  $-1.7\% \leq \varepsilon_f \leq 1.4\%$ .

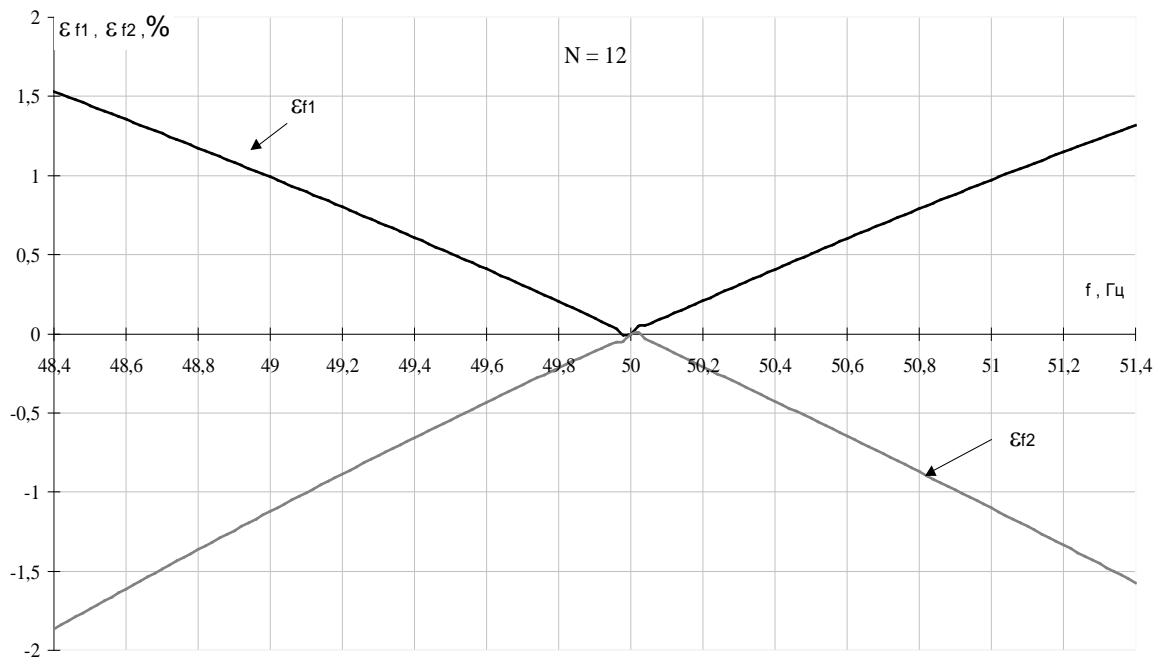


Рис. 1.11 Похибка виміру амплітуди сигналу першої гармоніки в електричних мережах із коливаннями частоти для фільтра Фур'є

З урахуванням (1.33) визначається абсолютна похибка виміру по фазі при роботі електричних мереж із коливаннями частоти при числі дискретизації  $N = 12$ :

$$\Delta\psi_f = d\varphi - d\varphi_0 = \pi \left(1 - \frac{f}{f_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{1}{N}\right). \quad (1.34)$$

Графік залежності абсолютної похибки по фазі від частоти вхідного сигналу наведений на рис. 1.12. Аналіз залежності, наведеної на рис. 1.12, показує, що абсолютна похибка виміру по куту лінійно залежить від частоти вхідного сигналу, і в заданому діапазоні зміни частот буде перебувати в межах  $|\Delta\psi_f| \leq 5.5^\circ$ .

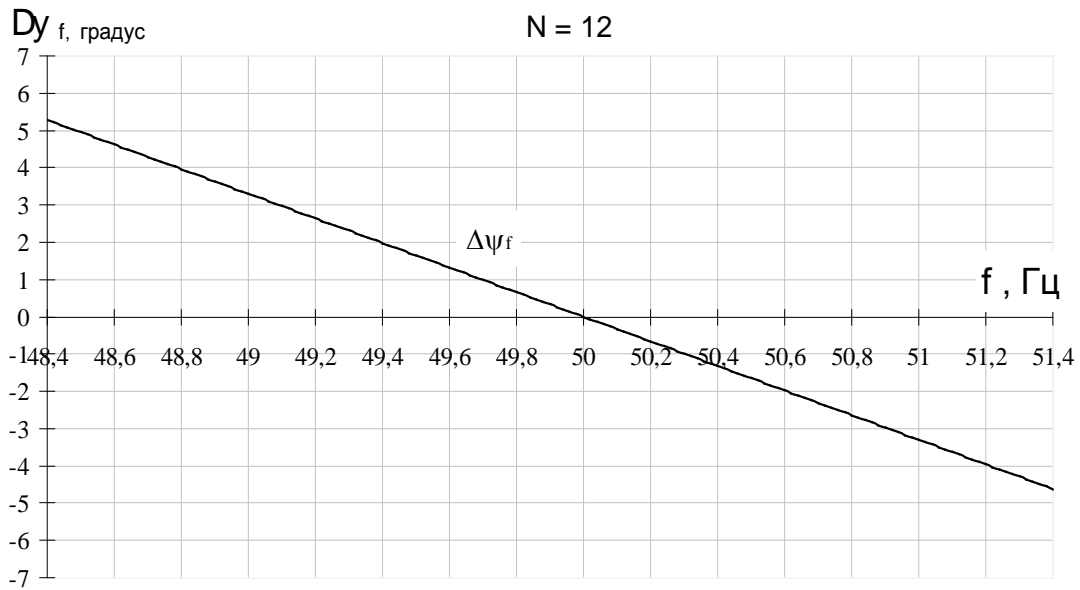


Рис. 1.12 Залежність абсолютної похибки по фазі від частоти вхідного сигналу при роботі фільтра Фур'є

#### 1.5.4. Робота фільтра Фур'є в перехідному режимі

Для перевірки роботи алгоритму використовувалося вираз (1.17). Виконувалось моделювання доаварійного і аварійного режимів роботи електричної мережі. Періодична й аперіодична складові аварійного режиму зв'язані з гармонійним сигналом доаварійного режиму відповідно до виразу (1.13). Перевірка роботи ЦВО проводилася для чотирьох значень постійної часу затухання  $T_1 = 0.005, 0.01, 0.05, 0.1$  для різних фаз включення  $\alpha = 10^\circ, 30^\circ, 50^\circ, 70^\circ, 90^\circ$ . За результатами моделювання встановлено, що похибка за амплітудою, викликана наявністю у перехідному режимі аперіодичної складової, перебуває в діапазоні  $-27\% < \varepsilon_e \leq 0\%$ . Абсолютна похибка по фазі, викликана присутністю у вхідному сигналі аперіодичної складової, перебуває в межах:  $-3^\circ \leq \Delta\psi_e \leq 16^\circ$ .

На рис. 1.13 і рис. 1.14 наведені залежності максимальних похибок фільтрації по амплітуді й по фазі, відповідно, від постійної часу затухання при наявності у вхідному сигналі аперіодичної складової.

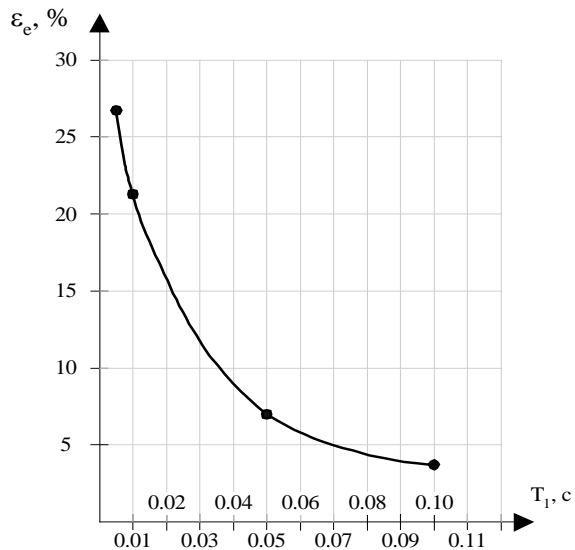


Рис. 1.13 Залежність похибки по амплітуді від постійної часу

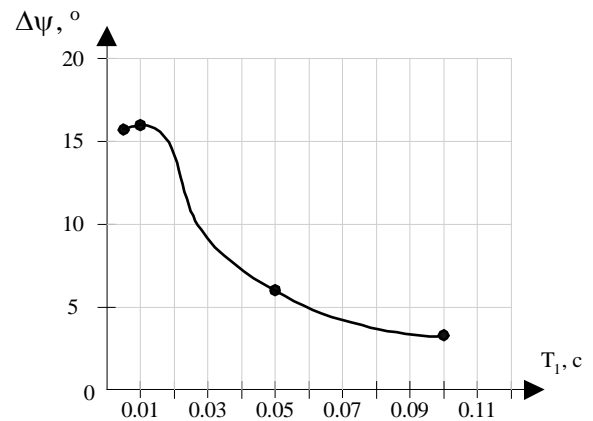


Рис. 1.14 Залежність похибки по фазі від постійної часу

### 1.6. Вибір оптимального цифрового вимірювального органа

Аналізуючи результати дослідження придатності ЦВО можна відзначити, що найбільш швидкодіючим є алгоритм із використанням властивостей похідних. Однак, цей алгоритм має значні похибки виміру навіть при відсутності коливань частоти в електричній мережі, що обумовлено неточністю обчислення похідних при дискретизації вхідних величин. Алгоритм не пригнічує постійну складову, а складові вищих частот підсилює. Спостерігаються високі значення похибок по амплітуді й фазі при роботі алгоритму в перехідному режимі. Причому, при наявності у вхідному сигналі аперіодичної складової з великою постійною часу похибки залишаються високими до закінчення перехідного процесу. Тому, незважаючи на високу швидкодію й найбільш точну передачу фази

вимірюваного сигналу, у цілому, алгоритм непридатний для цілей релейного захисту.

Алгоритм двох вибірок також має високу швидкодію й невеликі зсуви по фазі при перетворенні. Відносна похибка при коливаннях частоти значно нижча, чим в ЦВО з використанням властивостей похідних, але вища, чим у фільтра Фур'є. Однак, в умовах наявності завад даний алгоритм підсилює постійну й високочастотні складові, тобто не має фільтруючих властивостей. При його використанні необхідне відбудування від вищих гармонійних складових за допомогою попередньої аналогової фільтрації. Застосування аналогового фільтра приводить до збільшення вартості обладнання, що для розподільних мереж небажано. Спостерігаються високі значення похибок по амплітуді й фазі при роботі алгоритму в перехідному режимі, які вищі, ніж для інших розглянутих алгоритмів. Тому алгоритм двох вибірок також слід визнати непридатним для даного проектного пристрою.

Фільтр Фур'є має невисоку, але для розподільних мереж достатню, швидкодію (20 мс) і має значну (до  $5^\circ$ ) похибку при передачі фази вхідного сигналу. Але даний фільтр не має похибки при передачі амплітуди вхідного сигналу основної частоти й має прийнятні фільтруючі властивості при наявності у вхідному сигналі постійної й вищих гармонійних складових, тобто попередньої аналогової фільтрації не потрібно, а спостережувані високі значення похибок по амплітуді й фазі при роботі алгоритму в перехідному режимі, більш низькі, чим в алгоритму двох вибірок. Враховуючи вищевикладене, даний фільтр приймається за базовий у якості ЦВО для проектного обладнання.

### Контрольні запитання.

1. Навіщо потрібна цифрова фільтрація в мікропроцесорних пристроях РЗА?
2. Які основні вимоги до цифрових вимірювальних органів пристроїв РЗА розподільних електричних мереж?
3. Як впливає збільшення точок дискретизації на точність перетворення ЦВО з використанням властивостей похідних, двох вибірок, фільтру Фур'є?
4. Як впливає наявність постійної складової у вхідному сигналі на точність перетворення ЦВО з використанням властивостей похідних, двох вибірок, фільтру Фур'є?
5. Як впливає наявність вищих гармонійних складових у вхідному сигналі на точність перетворення ЦВО з використанням властивостей похідних, двох вибірок, фільтру Фур'є?
6. Як впливають коливання частоти електричної мережі на точність перетворення ЦВО з використанням властивостей похідних, двох вибірок, фільтру Фур'є?
7. Як впливає наявність аперіодичної складової у вхідному сигналі на точність перетворення ЦВО з використанням властивостей похідних, двох вибірок, фільтру Фур'є?

## **2. МАТЕМАТИЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ПРИСТРОЮ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ**

### **2.1. Загальна структура та функції найпростішого однопроцесорного цифрового реле**

Структуру математичного забезпечення МП пристрою РЗА розглянемо на прикладі спрощеного однопроцесорного ЦР, призначеного для захисту ліній 6 – 35 кВ [12, 13].

Функції захисту:

1. Максимальний захист за струмом;
2. Відсічка за струмом з блокуванням;
3. Захист від замикання на землю;
4. Захист за струмом оберненої послідовності.

Функції автоматики:

1. Однократне АПВ.

Окрім функцій захисту та автоматики в реле повинні бути передбачені додаткові функції:

1. Введення за допомогою кнопок на передній панелі і зберігання в енергонезалежній пам'яті значень вставок;
2. Зберігання в енергонезалежній пам'яті інформації про коротке замикання (вид, тривалість КЗ, амплітуди аварійних струмів, захист, від якого сталось відключення, захисти, у яких відбувся пуск, робота АПВ);
3. Виведення на індикатор значень вставок, струмів нормального і аварійного режимів.

Загальна структура цифрового реле наведена на рис. 2.1.

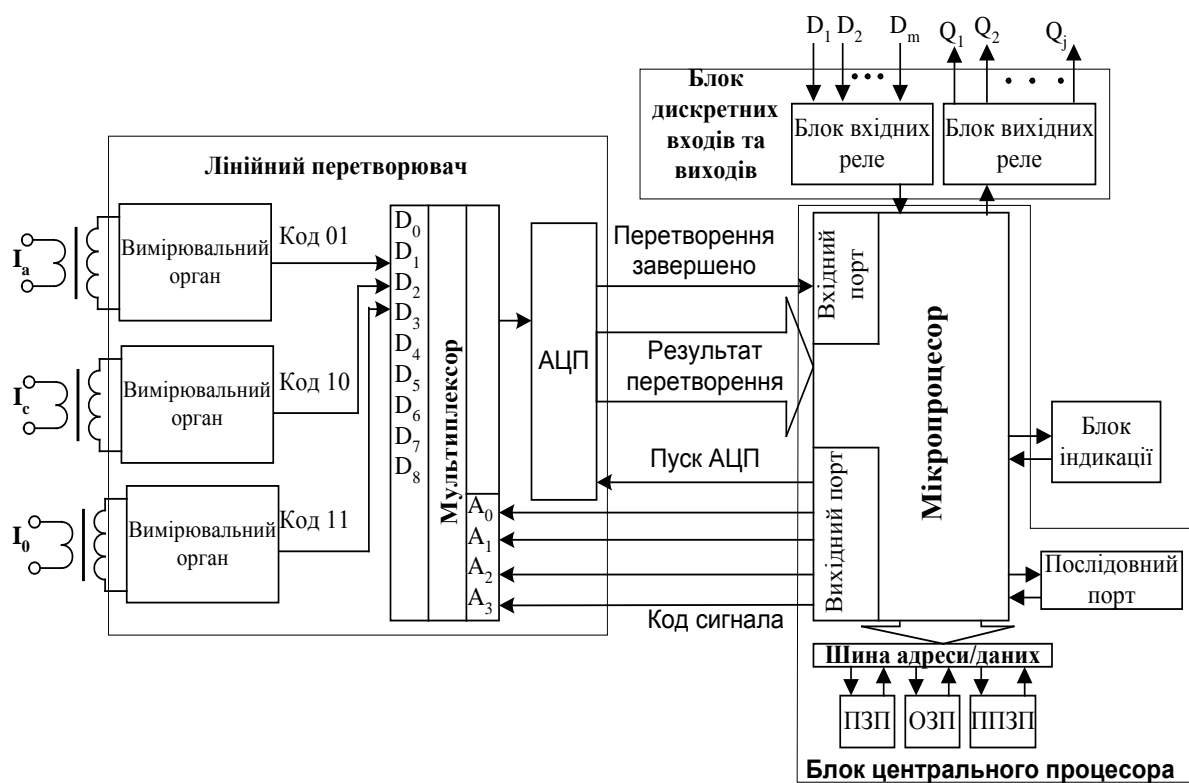


Рис. 2.1. Загальна структура однопроцесорного цифрового реле

Для правильної роботи максимально захисту за струмом та відсічки за струмом в мережах з ізольованою нейтраллю достатньо вводити струми двох фаз, наприклад А і С, із включенням трансформаторів струму по схемі неповної зірки. Для роботи захисту від замикань на землю вводиться струм  $I_0$  від трансформатора струму нульової послідовності [14-17].

Аналого-цифрове перетворення починається подачею з мікропроцесора коду вхідного струму і команди «Пуск АЦП». Про закінчення перетворення сигналізує надходження на мікропроцесор з АЦП сигналу «Перетворення завершено», після чого відбувається зчитування результату перетворення. Для аналого-цифрового перетворення вибирається 14-розрядне АЦП зі швидкістю перетворення 1.5 – 3.0 мкс.

Таке АЦП дозволить довести точність виміру до 2-3 %, що для релейного захисту цілком достатньо.

Блок дискретних входів та виходів використовується для прийому із зовнішніх схем сигналів Dі: «Положення вимикача Вимкнуто», «Положення вимикача Ввімкнено», «Робота нижніх захистів» та ін., а також для видачі в зовнішні схеми сигналів Qі: «Ввімкнути», «Вимкнути» та ін.

Блок індикації застосовується для показу на рідкокристалічному індикаторі наступних параметрів:

- Струмів нормального та аварійного режимів;
- Вставок цифрового реле;
- Різноманітних системних параметрів енергомережі.

## **2.2. Загальна структура математичного забезпечення однопроцесорних цифрових реле**

Математичне забезпечення однопроцесорних цифрових реле можливо поділити на три типи – основну програму, програму переривання по таймеру і програму зв'язку. На рис. 2.2 наведена загальна структура програмного забезпечення. Розглянемо докладно структуру і алгоритми деяких підпрограм, що входять в програму переривання по таймеру.

Основна програма складається з:

- Процедури ініціалізації;
- Процедури зчитування вставок;
- Процедури ручного ввімкнення;
- Процедури-диспетчер.

Відразу ж після вмикання пристрою відбувається передача управління підпрограмі ініціалізації. Задача підпрограми:



- очищення всього обсягу оперативної пам'яті;
- адресація портів для введення зовнішніх і виведення вихідних сигналів;
- організація переривання по таймеру для виміру вхідних аналогових сигналів і запис у таймер інтервалу часу дискретизації;
- організація переривань для забезпечення роботи приймача і переривання.

Після виходу з підпрограми ініціалізації забороняються всі переривання, і управління передається підпрограмі читання вставок. Значення вставок зберігаються в енергонезалежної пам'яті. Процес читання з такої пам'яті займає досить багато часу, і тому при роботі пристрою користуються вставками, записаними в ОЗП. Перезаписом значень уставок з енергонезалежної пам'яті і займається дана підпрограма.

У наступній підпрограмі аналізуються умови, що дозволяють ручне включення вимикача, що відбувається при натисканні кнопки «Включити» на місцевому пульті управління або при надходженні однойменного сигналу на дискретний вхід або по локальній мережі.

Далі відбувається передача управління підпрограмі-диспетчер, функції котрої наступні:

- введення і зміна значень уставок захистів і автоматики через місцевий пульт управління;
- індикація на індикаторі чисельних значень уставок захистів і автоматики, вимірюваних струмів доаварійного й аварійного режимів, результатів самодіагностики.

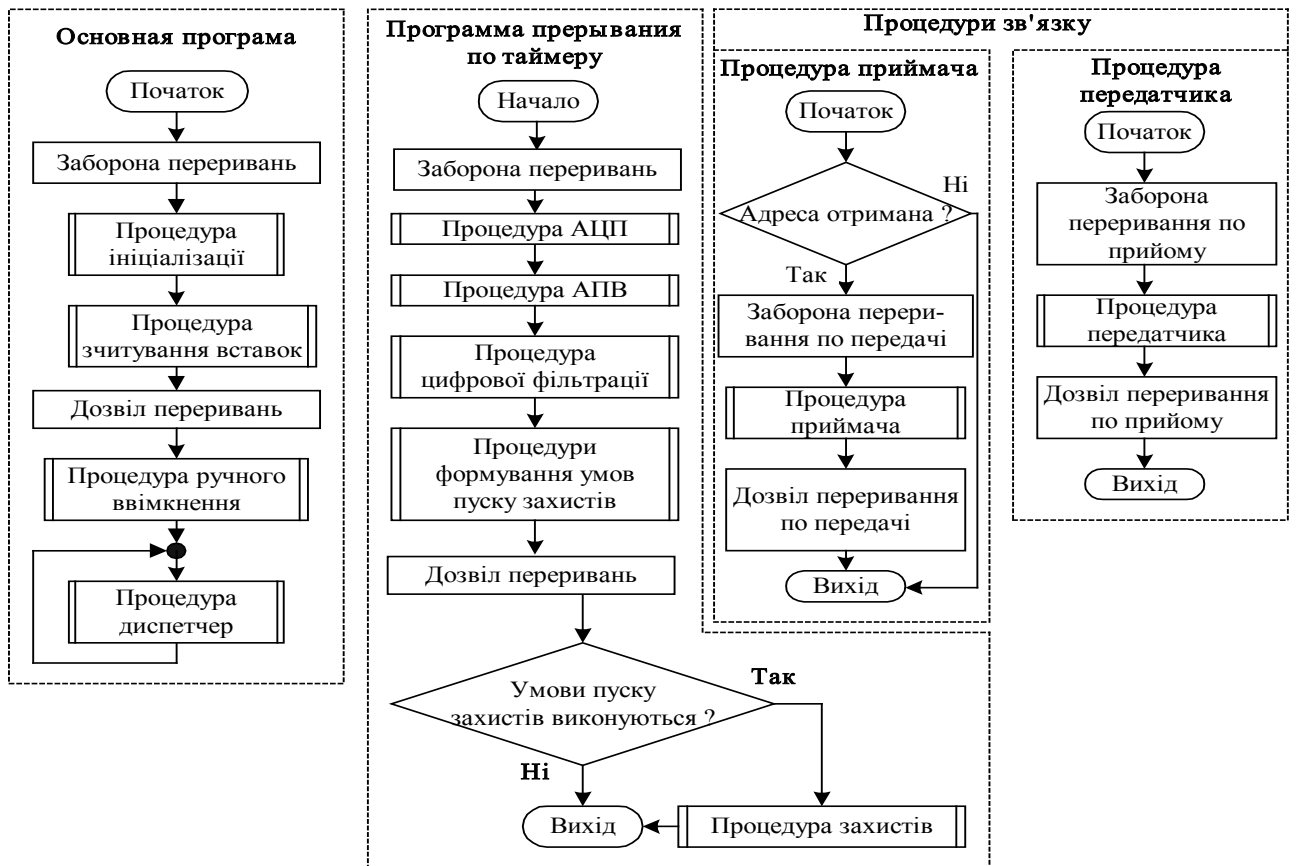


Рис. 2.2 Загальна структура програмного забезпечення однопроцесорного цифрового реле

### 2.3. Призначення та блок-схеми алгоритмів підпрограм, які входять у програму переривання по таймеру

#### 2.3.1. Призначення програми переривання по таймеру

Призначення програми переривання по таймеру:

- Вимір миттєвих значень вхідних аналогових сигналів;
- Проведення цифрової фільтрації;
- Перевірка умов пуску захистів;
- Реалізація алгоритмів захистів;
- Реалізація алгоритмів автоматики.

Нерівність кроків дискретизації між сусідніми вибірками, тобто ,  
 приводить до  $T_1 \neq T_2 \neq \dots \neq T_N$  виміру вхідного аналогового сигналу з  
 похибками. Для усунення впливу невідповідності часів дискретизації  
 необхідно виконати синхронізацію початкових моментів виміру для  
 різноманітних вибірок. Дану задачу легше усього виконати за допомогою  
 переривання по таймеру з числом  $k$ , записаним у лічильник таймера, і  
 пропорційним часу дискретизації переривання  $T'$ , рівному:

$$T' = T - t_{\text{ком}},$$

де:  $T$  - крок дискретизації;

$t_{\text{ком}}$  - час, витрачений на передачу управління в програму переривання, на  
 запис у стек адреси останньої виконаної команди і вмісту акумуляторів.

Так як дотримання рівності кроків дискретизації є необхідною  
 умовою точної роботи всього пристрою, то переривання по таймеру має  
 більш високий пріоритет у порівнянні з перериваннями приймача і  
 передавача, які забороняються відразу ж перед викликом підпрограми  
 АЦП. Звідси випливає, що в однопроцесорному пристрої РЗА в певні  
 моменти часу деякі функції недоступні. Функції виміру, захисту й  
 автоматики, тобто підпрограми переривання по таймеру, мають самий  
 високий пріоритет і на час їх роботи всі інші функції (зв'язку, індикації,  
 ручного керування) блокуються. Програмами зв'язку блокуються усі  
 функції основної програми.

### **2.3.2. Блок-схема алгоритму процедури аналого-цифрового перетворення**

Алгоритм процедури АЦП наведений на рис. 5.3. Процедура виконує  
 наступні дії:

- Безпосереднє аналого-цифрове перетворення кожного вхідного аналогового сигналу;
- Нормалізація отриманих значень;
- Формування масивів миттєвих значень для цифрової фільтрації та для реєстрації.

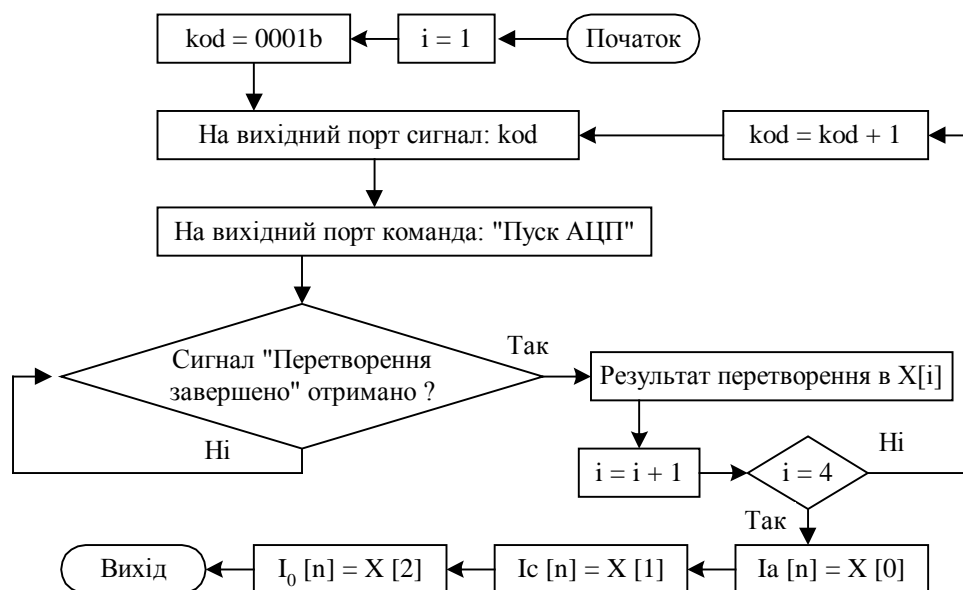


Рис. 2.3 Алгоритм процедури АЦП

В процедурі АЦП відбувається послідовний вимір миттєвих значень струмів фаз А, С та струму нульової послідовності. Отримані значення зберігаються в масивах  $I_a [n]$ ,  $I_c [n]$ ,  $I_0 [n]$ , де  $n$  - номер переривання в періоді. По закінченню роботи процедури АЦП в оперативній пам'яті реле формуються два масива даних – миттєвих значень для цифрової фільтрації (для кожного із вхідних аналогових сигналів) з розмірністю  $N$  (число вибірок за період). Другий масив використовується реєстратором. В ОЗП пристрою запам'ятовуються і постійно поновлюються миттєві значення за період часу реєстрації. У випадку виникнення короткого замикання

залишаються дані доаварийного періоду, його тривалість може вибиратися вставкою, інші оновлюються по мірі розвитку короткого замикання. Після вимкнення вимикача всі ці миттєві значення записуються в енергонезалежну пам'ять.

### 2.3.3. Задачі та блок-схеми алгоритму підпрограм цифрової фільтрації та перевірки умов пуску захистів

Задачами процедури фільтрації в пристрої РЗА для розподільчих мереж є:

- Виконання цифрової фільтрації для кожного вхідного аналогового сигналу та формування масивів ортогональних складових.
- Формування масиву амплітудних значень вхідних величин.

В розподільчих мережах, де не вимагається спрацювання захистів з витримкою часу  $< 20$  мс, найчастіше використовується цифровий фільтр Фур'є. Вирази для визначення ортогональних складових  $k$ -ї гармоніки:

$$X_a = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left( X(n) \cdot \cos\left(2\pi \frac{kn}{N}\right) \right); X_r = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left( X(n) \cdot \sin\left(2\pi \frac{kn}{N}\right) \right), \quad (2.1)$$

де:  $N$  – число вибірок за період промислової частоти;

$X(n)$  – миттєве значення.

По значенням ортогональних складових обчислюються амплітуда і фаза вхідного аналогового сигналу:

$$X = \sqrt{X_a^2 + X_r^2}; \varphi = \arctg\left(\frac{X_r}{X_a}\right) \quad (2.2)$$

На рис. 2.4 наведена блок-схема алгоритму закінчення переривання по таймеру. По отриманим амплітудним значенням перевіряються умови пуску захистів в процедурах PRE\_MTZ, PRE\_TO, PRE\_I2, PRE\_Z0. Для захисту від замикання на землю перевіряється факт перевищення вхідним

струмом нульової послідовності, а для захистів від міжфазних замикань – перевищення максимальним з фазних струмів вставок спрацювання. Для перевірки умови пуску захисту по струму оберненої послідовності в процедурі PRE\_I2 проводиться розрахунок значення струму  $I_2$  і порівняння його зі вставкою.

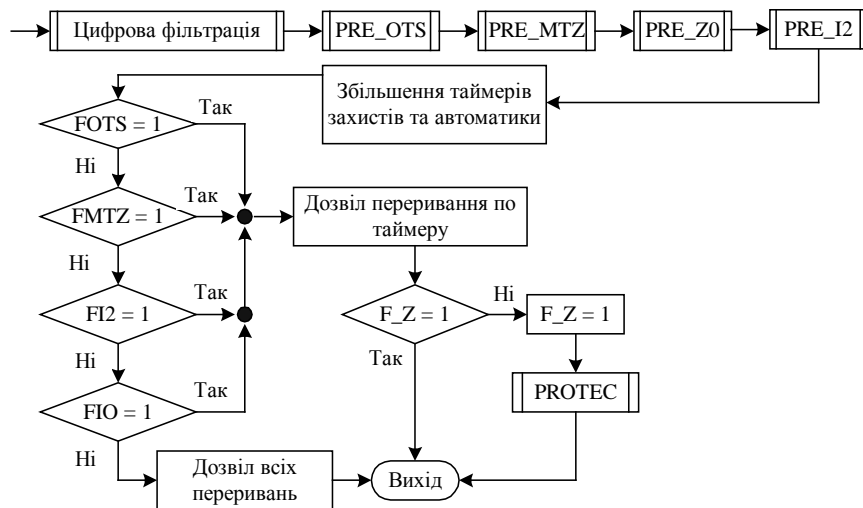


Рис. 2.4 Блок-схема алгоритму закінчення програми переривання

Якщо умова пуску не виконується або який-небудь захист виведений, то відповідний показник пуску не встановлюється. У випадку виконання умови пуску хоча б одного із захистів цей показник встановлюється в одиницю. Якщо пуск відсутній, то дозволяються всі переривання і відбувається вихід з програми, інакше встановлюється загальний показник пуску  $F_Z$ , дозволяються тільки переривання по таймеру, і відбувається передача управління процедурі захистів PROTEC, де відбувається розрахунок витримок часу спрацювання, які значно перевищують проміжок часу між двома перериваннями. Тому, починаючи з цього місця програми, нові переривання накладаються на перше, в якому відбулося визначення факту пуску. Показник  $F_Z$  не допускає багаторазовий виклик процедури PROTEC в подальших перериваннях. Алгоритм процедури захистів PROTEC наведений на рис. 2.5.

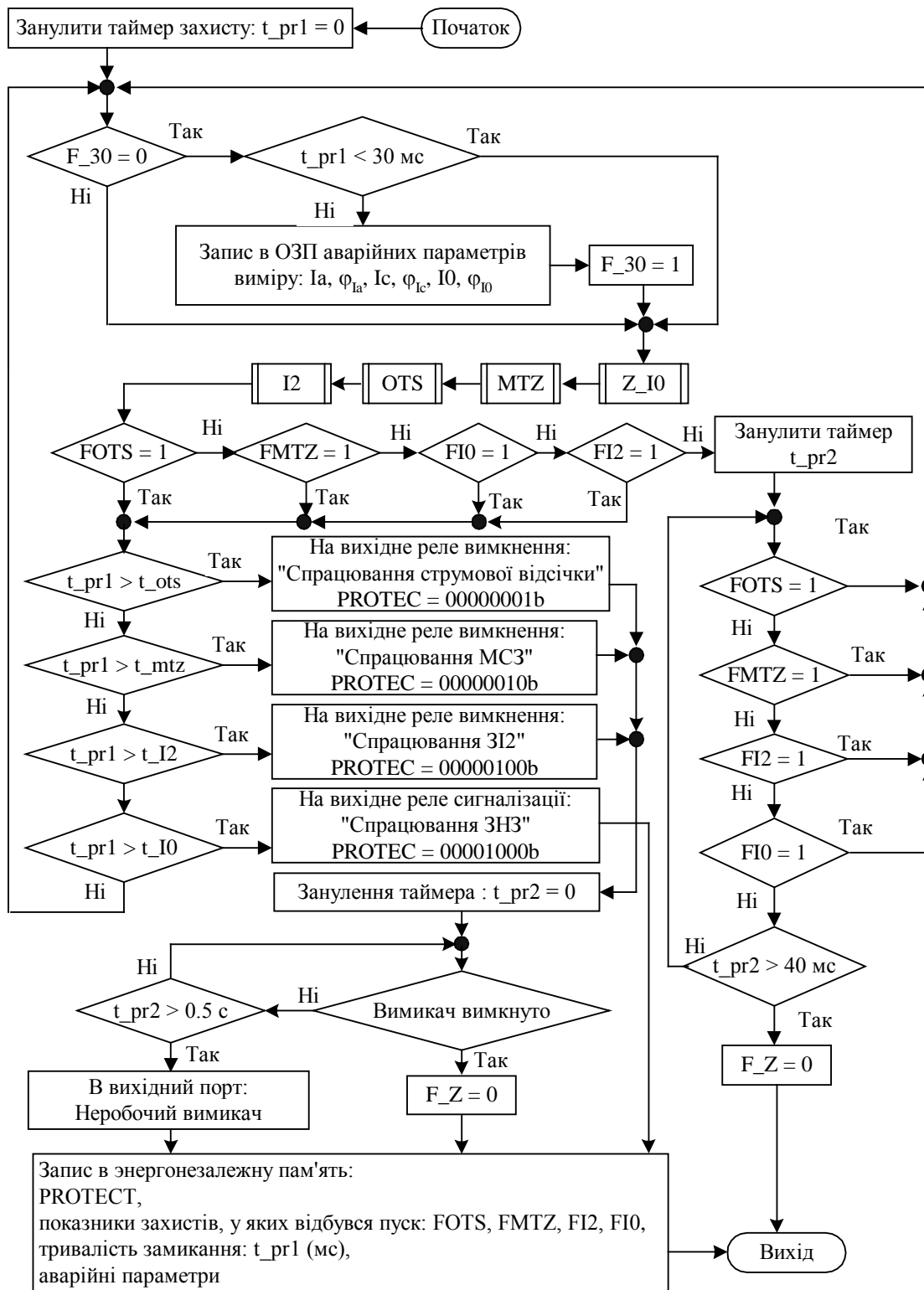


Рис. 2.5 Блок-схема алгоритму процедури захистів PROTЭС

Призначення процедури PROTЭС:

- Відлік витримок часу спрацювання захистів;

- Формування імпульсів сигналізації і вимкнення вимикача;
- Збереження в енергонезалежній пам'яті інформації про замикання.

Відразу ж після виклику процедури PROTEC зануляється програмний таймер захистів. Саме з цього моменту, тобто моменту визначення факту замикання, і починається відлік витримок часу спрацювання.

Часто струм короткого замикання містить в собі аперіодичну складову, тому в перший період після моменту визначення КЗ цифровий фільтр буде працювати з великими похибками. Тому в якості аварійних струмів, що зберігаються в енергонезалежній пам'яті, використовуються струми, виміряні через 1.5 періоду, коли аперіодичну складову можливо вважати затухлою.

В процедурі відбувається постійна перевірка умов пуску захистів і корекція витримок часу спрацювання. Така перевірка необхідна, тому що замикання може самоліквідуватися, і умови пуску зникнути до видачі сигналу вимкнення. З іншого боку, замикання може розвиватися, наприклад однофазне замикання на землю переходити в двохфазне, двохфазне в трьохфазне. Ці процеси можуть призвести до зміни амплітуди струму замикання, що вимагає перерахунку витримок часу спрацювання, або викликати пуск іншого захисту.

Витримки часу спрацювання обчислюються в процедурах окремих захистів: MTZ, OTS, I2, IO. Якщо захист виведений або умови його пуску не виконуються, те витримка часу спрацювання рівний максимально можливому для даного мікропроцесора позитивному числу. При досягненні таймером захисту мінімальної з розрахованих витримок часу на вихідне реле вимкнення подається сигнал вимкнення вимикача при спрацюванні відсічки за струмом, максимально захисту за струмом або захисту за струмом оберненої послідовності, при спрацюванні захисту від



замикань на землю надходить сигнал на вихідне реле сигналізації. Тут же в змінну ПРОТЕСТ записується код спрацьованого захисту.

#### 2.3.4. Задачі та блок-схема алгоритму захисту за струмом оберненої послідовності

Захист за струмом оберненої послідовності застосовується для захисту від несиметричних режимів. Також з залежною характеристикою спрацьовання може використовуватися для захисту електродвигунів. Відомо, що струм оберненої послідовності визначається по виразу:

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_a + \bar{a} \cdot \bar{I}_b + \bar{a}^2 \cdot \bar{I}_c, \quad (2.3)$$

де:  $\bar{I}_a, \bar{I}_b, \bar{I}_c$  - вектори фазних струмів;

$\bar{a}$  - оператор повороту, який рівний:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \cdot \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2.4)$$

Оскільки реле проектується для роботи в мережах з ізольованою нейтраллю із з'єднанням трансформаторів струму по схемі неповної зірки, то струм фази В в реле безпосередньо не вводиться. Вектор струму фази В можливо визначити за виразом:

$$\bar{I}_b = -(\bar{I}_a + \bar{I}_c) \quad (2.5)$$

Підставимо вираз (2.5) в (2.3) і отримаємо:

$$\bar{I}_2 = (1 - \bar{a}) \cdot \bar{I}_a + (\bar{a}^2 - \bar{a}) \cdot \bar{I}_c \quad (2.6)$$

Підставимо в вираз (2.6) значення оператора повороту (2.4) і запишемо вектори струмів фаз А та С у вигляді ортогональних складових:

$$\bar{I}_2 = I_{2a} + j \cdot I_{2r} = \left( \frac{3}{2} I_{a_a} + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{a_r} + \sqrt{3} I_{c_r} \right) + j \cdot \left( \frac{3}{2} I_{a_r} - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{a_a} - \sqrt{3} I_{c_a} \right) \quad (2.7)$$

Тоді амплітудне значення струму оберненої послідовності  $I_2$  дорівнює:

$$I_2 = \sqrt{I_{2a}^2 + I_{2r}^2} \quad (2.8)$$

Умовою пуску захисту по струму оберненої послідовності буде виконання нерівності:  $I_2 \geq I_{2c3}$ .

Визначення ортогональних складових, амплітудного значення струму оберненої послідовності та перевірка умови пуску захисту відбувається в процедурі PRE\_I2, алгоритм якої наведено на рис. 2.6.



Рис. 2.6 Алгоритм перевірки умов пуску захисту по струму оберненої послідовності PRE\_I2

В процедурі захисту по струму оберненої послідовності  $I_2$ , що працює в тілі процедури PROTEC, виконується обчислення витримки часу спрацювання захисту  $t_{I2}$ . Характеристика спрацювання визначається вставкою  $N_{I2}$ . При  $N_{I2}=0$  захист по струму оберненої послідовності виведений. При  $N_{I2}=1$  – характеристика спрацювання незалежна і витримка часу спрацювання визначається вставкою  $t_{I2c3}$ . При  $N_{I2}=2$  – характеристика спрацювання залежна, відповідна стандартам МЭК. В діапазоні кратностей струму оберненої послідовності від 1 до 20

характеристика криволінійна і час спрацювання в секундах визначається за виразом:

$$t_{I2} = \frac{13.5 \cdot TMS}{\frac{I2}{I2_{cs}} - 1} + 0.02 \quad (2.9)$$

В діапазоні кратностей струму оберненої послідовності  $> 20$  витримка часу горизонтальної ділянки характеристики спрацювання визначається по формулі:

$$t_{I2} = \frac{13 \cdot TMS}{19} + 0.02 \quad (2.10)$$

На рис. 2.7. наведені залежна характеристика спрацювання захисту для коефіцієнта  $TMS=1$  і незалежна характеристика, алгоритм процедури  $I2$  наведено на рис. 2.8.

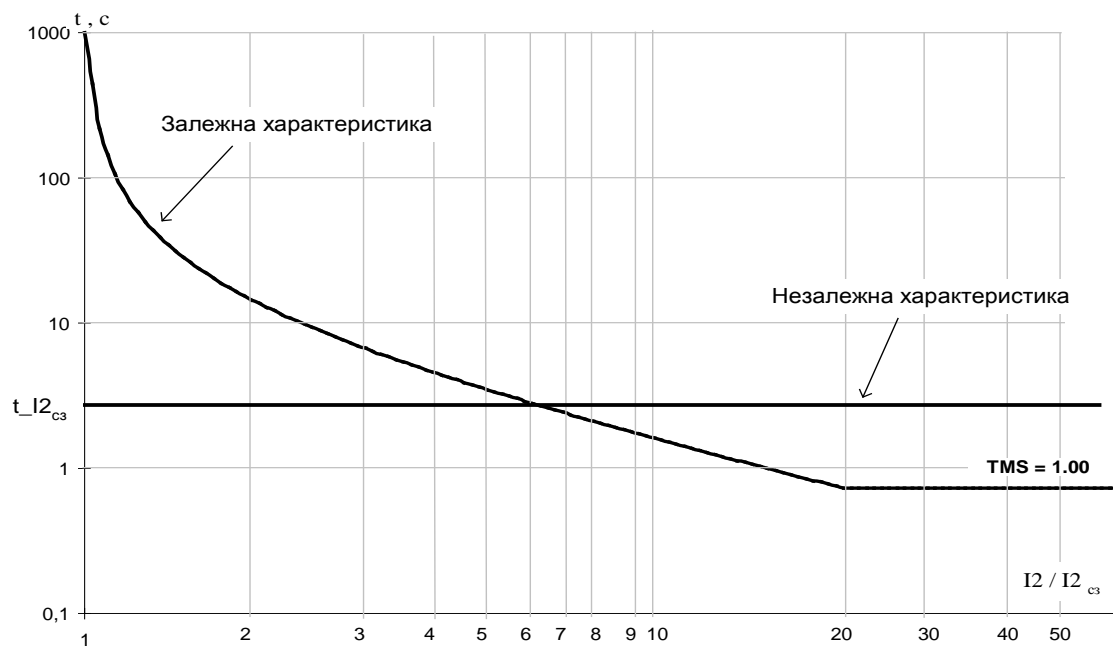


Рис. 2.7 Характеристики спрацювання захисту за струмом оберненої послідовності

Структури алгоритмів відсічки за струмом, максимально захисту за струмом і захисту від замикань на землю майже аналогічні алгоритму

захисту за струмом оберненої послідовності і в даній роботі не приводяться.

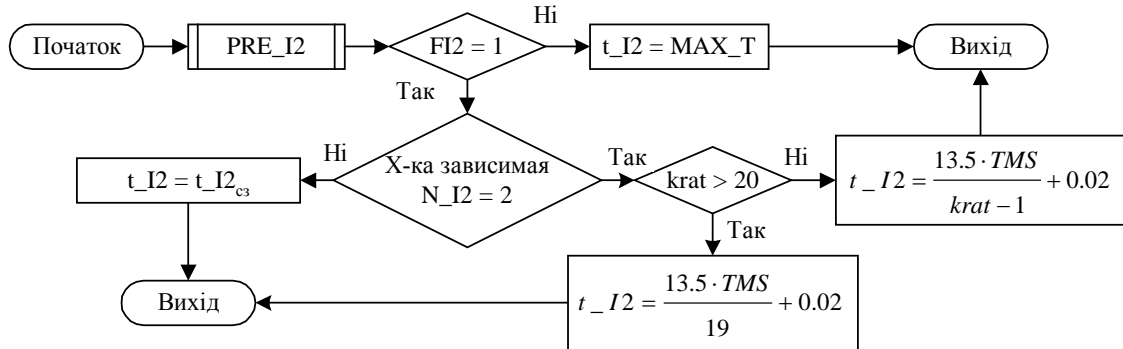


Рис. 2.8 Алгоритм процедури захисту за струмом оберненої послідовності I2

Після видачі команди вимкнення реле очікує підтвердження факту вимкнення вимикача на протязі 0.5 с. Якщо по закінченні цього часу положення вимикача не змінилося, на вихідне реле видається сигнал «Несправність вимикача». Положення вимикача контролюється по двом вхідним реле, на які підключаються блок контакти вимикача або контакти зовнішніх реле положення вимикача «Ввімкнено» і «Вимкнено». Далі в енергонезалежну пам'ять записується інформація про аварійний режим, скидається загальний показник пуску захистів і слідує вихід з процедури захистів. Якщо замикання самоліквідувалося до видачі команди "Вимкнути", тобто зникли умови пуску всіх захистів, відбувається перехід на іншу гілку підпрограми. В цій гілці виконується контроль умов пуску всіх захистів на протязі 40 мс (двох періодів). Якщо замикання є мінливим, тобто умови пуску то пропадають, то з'являються знову до закінчення 40 мс, то відлік витримки часу спрацювання триває. Якщо ж факт виконання умов пуску не підтверджується, то скидається загальний показник пуску захисту і слідує вихід з процедури захистів.

## 2.4. Блок-схема алгоритму підпрограми автоматичного повторного включення

На рис. 2.9. приведена блок-схема алгоритму підпрограми АПВ [18]. У розглянутому пристрої виконаний пуск АПВ від невідповідності положення вимикача "Відключено" і попередньої оперативної команди "Включити". Цей засіб універсальний, оскільки забезпечується робота АПВ при будь-якому відключенні вимикача крім оперативного [19-27]. Повторне включення не повинне здійснюватися при будь-якому відключенні вимикача, а повинно мати виборчий орган. Для визначення умов пуску АПВ використовуються наступні вхідні дискретні сигнали:

- від реле положення вимикача "Відключено" (в алгоритмі "Відкл. ");
- від реле фіксації команди "Включити" (в алгоритмі "Вкл. ");
- блокування АПВ.

Крім перерахованих вище зовнішніх сигналів аналізується також значення прапора внутрішнього блокування АПВ BLOCK\_APV. Оскільки розглянутий алгоритм є складовою частиною загального програмного забезпечення цифрового реле, то частина вихідних даних формується в інших програмах. Зокрема, це прапор внутрішнього блокування АПВ BLOCK\_Z, який встановлюється у випадку заборони АПВ при відключенні від якийсь захисту, у програмі відповідного захисту.

У випадку виконання умов пуску АПВ запускається таймер відліку часу АПВ. По досягненні їм значення вставки  $t_{APV_{уст}}$  на вихідне реле подається команда "Включити". Якщо через 0.5 с вимикач усе ще не включився, то на вихідне реле подається сигнал "Несправність вимикача".

Якщо ж вимикач включився, то виконується перехід на другу гілку алгоритму, у якій визначається успішне або неуспішне включення. АПВ можна ввести або вивести. При установці вставки  $N_{APV}$  у нуль функція

АПВ виводиться установкою внутрішнього блокування. По факту включення вимикача запускається таймер відліку часу повернення АПВ, що задається вставкою  $t_{reset}$ . Якщо з'явилися умови пуску захистів, і відбулося відключення вимикача до закінчення відліку часу повернення, тобто замикання стійке, а АПВ неуспішне, то встановлюється внутрішнє блокування, що може бути скинуто тільки при виконанні оперативного включення вручну або по каналах телемеханіки.

Використання мікропроцесорної техніки в пристроях релейного захисту та автоматики дозволило об'єднати окремі реле в загальну систему контролю та управління. Застосування такої системи піднімає релейний захист на якісно більш високий рівень контролю, управління і автоматики.

Окремі цифрові реле є пристроями першого, нижнього рівня. По локальній мережі перший ієрархічний рівень зв'язаний з центральним підстанційним комп'ютером, що є пристроєм другого рівня. Пристрій другого рівня може вести обмін інформацією з будь-яким цифровим реле, підключеним до локальної мережі, здійснюючи функції контролю, управління, збору і зберігання інформації. До функцій управління відносяться наступні задачі:

- Дистанційна зміна значень вставок захистів та автоматики цифрового реле;
- Дистанційне ввімкнення і вимкнення вимикача.

Функціями контролю є:

- Зчитування і обробка результатів самодіагностики цифрового реле;
- Контроль положення вимикача.

Пристроєм другого рівня зчитуються з елементів нижнього рівня наступні дані:

- Результати поточних вимірів аналогових сигналів, які відповідають нормальному режиму роботи енергомережі;
- Значення вставок захистів та автоматики;
- Стан вхідних і вихідних реле.

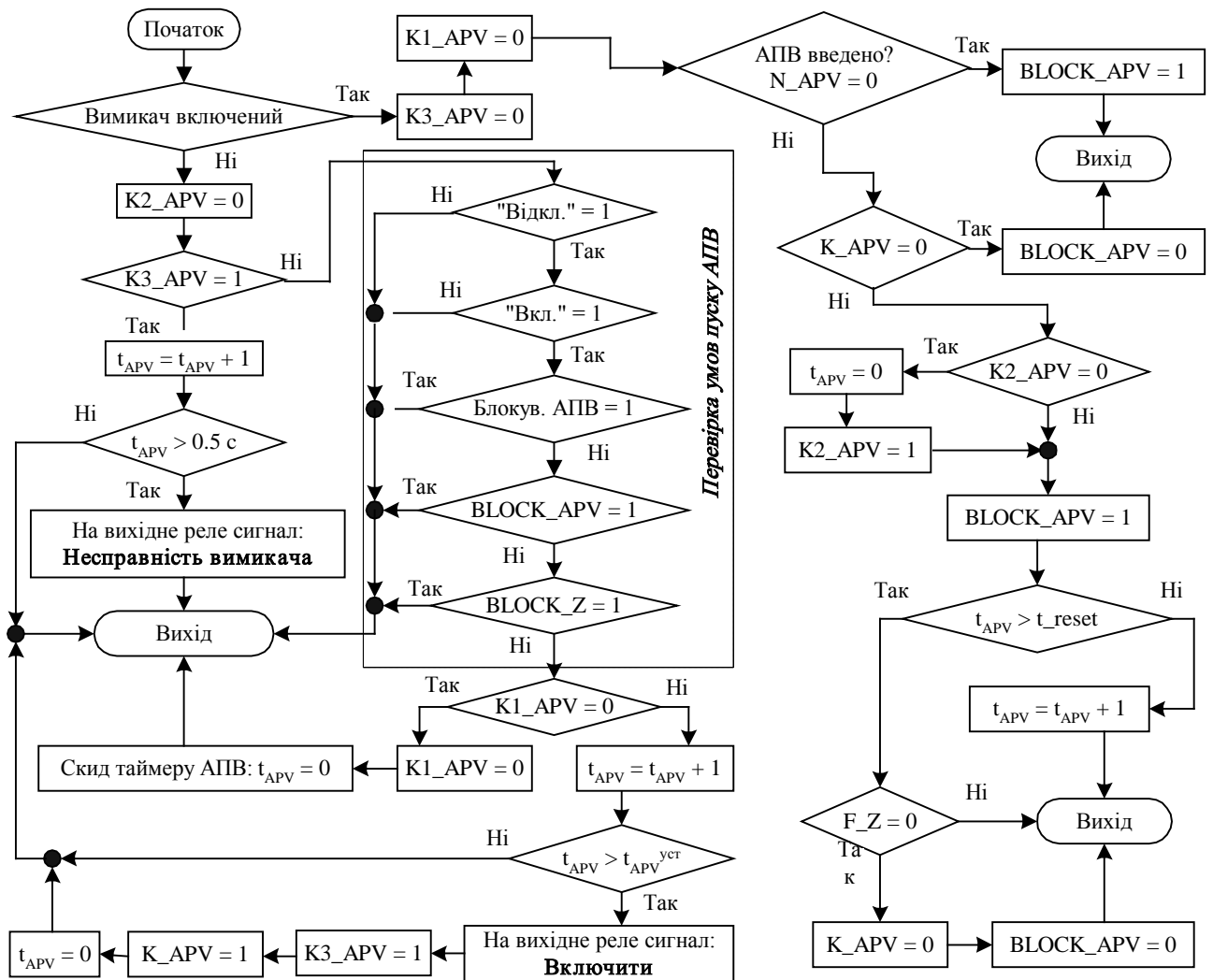


Рис. 2.9. Блок-схема алгоритма підпрограми АПВ

У випадку виникнення аварійного режиму на другий рівень передаються і зберігаються на жорсткому диску комп'ютера наступні дані:

- Результати вимірів аналогових сигналів, які відповідають аварійному режиму роботи енергомережі;
- Параметри аварійного режиму (захисти, в яких відбувся пуск, захист від якої відбулося вимкнення, тривалість КЗ і т.д.);
- Осцилограма аварійного режиму по всім аналоговим сигналам.

Програма зв'язку організована таким чином, що при отриманні посилки із другого рівня здійснюється передача управління по перериванню в процедуру приймача. В даній процедурі розшифровується отримане повідомлення і, у випадку необхідності, виконується підготовка даних для посилки на другий рівень. Після цього дозволяється переривання по передачі і здійснюється передача управління по перериванню в процедуру передавача, в якій відбувається передача даних на другий рівень.

#### Контрольні запитання

1. Які функції та структура найпростішого однопроцесорного цифрового реле?
2. Яка загальна структура математичного забезпечення однопроцесорних цифрових реле?
3. Яке призначення програми переривання по таймеру?
4. Які особливості алгоритму процедури аналого-цифрового перетворення?
5. Які особливості алгоритму підпрограм цифрової фільтрації та перевірки умов пуску захистів?
6. Які задачі та особливості алгоритму підпрограми PROTEC?
7. Які задачі та особливості алгоритму захисту за струмом оберненої послідовності?
8. Які задачі та особливості алгоритму підпрограми АПВ?



## Список літератури

1. Э.М. Шнеерсон. Цифровая релейная защита / Э.М. Шнеерсон. – М.: Энергоатомиздат, 2007. - 549 с: ил. – Библиогр.: с. 540-541. – Предм. указ.: с. 6. – 1000 экз. - ISBN 978-5-283-03256-6
2. Э.М. Шнеерсон. Дистанционные защиты. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. Учебное пособие для студентов вузов / А.Ф. Дьяков, Н.И. Овчаренко. – М.: Издательство МЭИ, 2000. - 199 с: ил. – Библиогр.: с. 194-196. –500 экз. - ISBN 5-7046-0575-3
4. Гельфанд Я.С. Релейная защита высоковольтных линий с использованием управляющих вычислительных машин / Я.С. Гельфанд, Л.С. Зисман // Автоматическое управление электроэнергетическими системами в аварийных режимах с применением цифровых вычислительных машин. – Сыктывкар: Коми филиал АН СССР. – 1976. - С.8-18.
5. Б.С. Стогний. Микропроцессорные системы в электроэнергетике / Б.С. Стогний, В.В. Рогоза, А.В. Кириленко и др.- К.: Наукова думка, 1988. – 232 с., ил. 81 – Библиогр.: с. 217-222. – Предм. указ.: с. 223 – 228. – 3100 экз. – ISBN 5-12-000414-8.
6. Стогний Б.С. Теоретические вопросы построения микропроцессорных систем в электроэнергетике / Б.С. Стогний, А.В. Кириленко, Д. Проске и др.- К.: Наукова думка, 1992. – 319 с. ил. - Библиогр.: с. 306-317. – 1000 экз. – ISBN 5-12-000414-8.
7. Стогний Б.С. Теория высоковольтных измерительных преобразователей переменного тока и напряжения. – К.: Наук. Думка, 1984. - 272 с.

8. Зисман Л.С. Алгоритмы и программы измерительных органов дистанционной защиты / Л.С. Зисман // Электричество. - 1981. - №2. - С.15-21.
9. Зисман Л.С. Программируемая ступенчатая токовая направленная защита нулевой последовательности ВЛ 500 – 750 кВ / Л.С. Зисман, Н.Н. Митрофанов // Тезисы докладов II научно-технической конференции “Программируемые устройства релейной защиты и автоматики энергосистемы”. – Рига: РПИ, 1988. – С.45 - 47.
10. Horton A. The use of Walsh function for high-speed digital relaying // IEEE Power Eng. Soc. Conf. Pap. Summer Meet.- New York.- 1975.- A75.- P.582 – 587.
11. Трансформаторы тока / В.В. Афанасьев, Н.М. Адоньев, В.М. Кибель и др.- Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1989. – 416 с.
12. Дмитренко О.О. Застосування мікропроцесорних пристроїв релейного захисту та автоматики на електричних підстанціях агропромислового комплексу / О.О. Дмитренко, І.М. Сметанська // Науковий вісник Національного аграрного університету: Збірник наукових праць.-2000.- Випуск 29.-С.188-194.
13. Яндульский А.С. Структура математического обеспечения однопроцессорных цифровых реле. / А.С. Яндульский, Г.П. Касьянов, А.А. Дмитренко, В.А. Гинайло // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність.- 2000. – Ч. 2.- С.79-84.
14. Федосеев А.М. Релейная защита электроэнергетических систем. Релейная защита сетей: Учеб. пособие для вузов / А.М. Федосеев - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 520 с., ил. – Библиогр.: с. 505-508. – Предм. указ.: с. 5. –31000 экз.

15. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем. Учебное пособие для техникумов / Н.В. Чернобровов, В.А. Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1998. - 800 с: ил. – Библиогр.: с. 791-793. –3000 экз. - ISBN 5-283-010031-7
16. Правила устройств электроустановок.-М.:Энергоатомиздат, 1986.- 648с.
17. Сирота И.М. Режимы нейтрали электрических сетей / И.М. Сирота, С.Н. Кисленко, А.М. Михайлов – К.: Наук. думка, 1985. – 264 с.
18. Дмитренко А.А. Алгоритм работы цифрового двукратного АПВ / А.А. Дмитренко, А.С. Яндульский, Г.П. Касьянов // Збірник наукових праць Донецького державного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”.- Донецьк: ДонДТУ.- 2000.- Випуск 21.- С.127-129.
19. Барзам А.Б. Системная автоматика / А.Б. Барзам - М.: Энергоатомиздат, 1989.- 446 с.: ил. - Библиогр.: с. 441-443. - ISBN 5-283-01024-4
20. А.Д. Дроздов. Автоматизация энергетических систем. Учеб. Пособие для студентов электроэнергетических специальностей вузов / А.Д. Дроздов, А.С. Засыпкин, А.А. Аллилуев и др. - М.: Энергия, 1977.- 440с.
21. Heydt G.T. Electric Power Quality: A tutorial introduction // IEEE Computer Application in Power.- 1998. – Vol.11, № 1.- P. 15 – 19.
22. Шабад М.А. Автоматизация распределительных электрических сетей с использованием цифровых реле / М.А. Шабад М.: НТФ "Энергопрогресс", 2003. – 68 с.: Ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 1(49)) Библиогр.: с. 66. – 1200 экз. – ISSN 0013-7278.
23. Овчаренко Н.И. Аналоговые элементы микропроцессорных комплексов релейной защиты и автоматики / Н.И. Овчаренко. М.: НТФ

- "Энергопрогресс", 2001. – 80 с.: Ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 9(33)) Библиогр.: с. 78. – 600 экз. – ISSN 0013-7278.
24. Овчаренко Н.И. Цифровые аппаратные и программные элементы микропроцессорной релейной защиты и автоматики энергосистем / Н.И. Овчаренко. М.: НТФ "Энергопрогресс", 2006. – 120 с.: Ил. (Библиотечка электротехника, приложение к журналу «Энергетик»; Вып. 5-6(89-90)) Библиогр.: с. 118. – 1200 экз. – ISSN 0013-7278.
25. М.А. Шабад. Расчеты релейной защиты и автоматики распределительных сетей. – СПб.: ПЭИПК, 2003.
26. В.Н. Копьев. Релейная защита основного оборудования электростанций и подстанций. – Томск.: ЭЛТИ ТПУ, 2005.
27. В.Г. Гловацкий, И.В. Пономарев. Современные средства релейной защиты. – Киев.: Энергомашвин, 2006.