

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ У РАЗІ ВИКОРИСТАННЯ ФІКСОВАНОЇ ЧАСТОТИ ДИСКРЕТИЗАЦІЇ СИГНАЛІВ

О.Л. Карасінський\*, канд. техн. наук, Ю.Ф. Тесик\*\*, докт. техн. наук  
Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Берестейський, 56, Київ, 03057, Україна. E-mail: [pribor@ied.org.ua](mailto:pribor@ied.org.ua).

*Виконано дослідження можливостей вимірювання діючих значень струмів та напруг, кутів зсуву фази та інших параметрів електричних мереж, які використовують ці дані, під час дискретизації з частотою не кратною частоті мережі. В запропонованих алгоритмах використовується проміжна лінійна апроксимація для розрахунку миттєвих значень інтерпольованих сигналів у рівновіддалених моментах часу на періоді основної частоти мережі. Розглянуто випадки, коли така дискретизація виконується на одному приладі за послідовного або одночасного кодування вхідних сигналів та варіант, коли у кожному вимірювальному каналі частоти дискретизації не збігаються. Проведено дослідження використання цих методів з застосуванням розробленої комп'ютерної моделі та макету розподіленої вимірювальної системи. Бібл. 32, рис. 19.*

**Ключові слова:** прилади, електричні мережі, аналого-цифрове перетворення, дискретизація, лінійна апроксимація та інтерполяція.

**Вступ.** В сучасних вимірювальних приладах для вимірювання параметрів електричних сигналів широко використовується дискретизація цих сигналів і подальша цифрова обробка з метою одержання необхідного параметру або параметрів. Зокрема для електричних мереж це вимірювання показників якості електроенергії (ПЯЕ) [1–3], спектр гармонік [4], активної та реактивної потужностей в лічильниках електроенергії (ЛЕЕ) [5] та інші. По відношенню до вибору частоти дискретизації вхідних сигналів існують два основних типи цифрових приладів – з частотою дискретизації, яка кратна частоті мережі (для цього застосовуються помножувачі частоти (ПЧ)) [6, 7], та прилади з фіксованою частотою дискретизації, в основному для вимірювання діючих значень напруг та струмів та/або активної потужності та енергії [8–12]. Перший тип приладів з частотою дискретизації, яка підлаштовується до основної частоти мережі, підходить для вимірювання тих параметрів, які суттєво залежать від кутів зсуву фази (КЗФ) між сигналами (це ПЯЕ, активна та реактивна потужність), та вимірювання значень окремих гармонік з частотою, кратною частоті мережі. Другий тип приладів з фіксованою частотою дискретизації майже неможливо використовувати для вимірювання параметрів, які залежать від КЗФ, а у разі вимірювання окремих гармонік виникає ефект «розтікання» спектру [13]. В деяких випадках існує необхідність суміщення обох типів дискретизації. Наприклад, в приладах вимірювання ПЯЕ треба вимірювати симетричні складові напруги. Для цього потрібна частота дискретизації кратна частоті мережі [14], а для вимірювання гармонійного спектра за допомогою швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) – фіксована частота дискретизації [4]. Останнім часом за кордоном з'явився новий тип приладів, так звані «цифрові трансформатори». В таких приладах разом з вимірювальним трансформатором напруги чи струму монтується вимірювальний перетворювач (ВП), який з певною частотою дискретизації передає миттєві значення сигналів в концентратор (обчислювальний пристрій), за допомогою якого можна обчислити деякі параметри сигналу [15–18]. Усе це показує актуальність розробки спеціального алгоритму, за допомогою якого можливо із сукупності миттєвих значень сигналів, отриманих від окремих ВП з фіксованою частотою дискретизації, визначити параметри, які залежать від КЗФ. На жаль, подробиці реалізації цих вимірювальних засобів практично відсутні.

**Метою роботи** є розробка та дослідження алгоритмів, які на підставі сукупності миттєвих значень сигналів дають можливість обчислити основні параметри електричної мережі: частота основної гармоніки, діючі величини та КЗФ гармонік напруг та струмів, за якими надалі можливо обчислити інші параметри.

© Карасінський О.Л., Тесик Ю.Ф., 2024

ORCID: \* <https://orcid.org/0000-0002-5323-8106> ; \*\* <https://orcid.org/0000-0001-6567-1436>

© Видавець Інститут електродинаміки НАН України, 2024



Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

**Основні матеріали дослідження.** На рис. 1–3 наведено узагальнені структурні схеми ВП, до складу яких входить комутатор (Км), один або декілька аналого-цифрових перетворювачів (АЦП) та мікроконтролер (МК) або якийсь інший обчислювальний пристрій. На цих рисунках не показано вхідні кола, за які можуть використовуватися дільники напруги та/або перетворювачі струму в напругу. За одночасного (рис. 1) або послідовного (рис. 2) кодування вхідних сигналів застосовується одна і та ж сама частота дискретизації  $F_d$ . Відмінність між ними полягає в наступному: в першому випадку (рис. 1) використовується декілька або один багатоканальний АЦП [19],  $m$  – кількість каналів; у другому – Км, через який вхідні сигнали  $u_1 \dots u_m$  послідовно потрапляють на вхід АЦП. Ці схеми орієнтовані на застосування в одному пристрої, який сам виробляє моменти дискретизації вхідних сигналів з частотою  $F_d$ . Схема на рис. 3 відповідає розподіленій вимірювальній системі. В цьому випадку кожний із АЦП<sub>1</sub>...АЦП<sub>m</sub> (зовнішній ВП) має свою частоту дискретизації  $F_{d1} \dots F_{dm}$ , а данні передаються в МК через канали зв'язку. Авторами запропоновано три алгоритми, які відповідають структурам ВП, представленим на рис. 1–3.

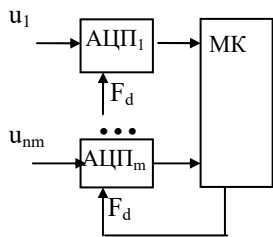


Рис. 1

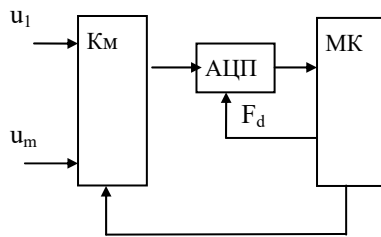


Рис. 2

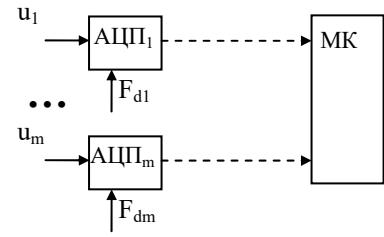


Рис. 3

Основою запропонованих авторами алгоритмів являється те, що кожний відлік миттєвих значень вхідних сигналів супроводжується кодом моменту часу, якому відповідає цей відлік. В МК по цих даних виконується лінійна апроксимація вхідних сигналів, визначаються моменти перетину нульового рівня в зростаючому напрямку одного із сигналів або деякої суми сигналів, по яким визначається період  $T_x$  основної (першої) гармоніки сигналу та розраховуються моменти часу, для яких виконується інтерполяція в точках

$$t_n = T_1 + n \cdot T_x / N, \quad (1)$$

де  $T_1$  – останній момент переходу через нуль;  $N$  – кількість відліків на періоді  $T_x$ ;  $n$  – номер відліку. Моменти  $t_n$  розраховуються в блоці синхронізації з емулятором помножувача частоти (ЕПЧ), який буде описаний нижче. Отримані таким чином відліки сигналів використовуються для розрахунку параметрів електричної мережі, наприклад, так, як це запропоновано в [14].

На рис. 4 представлено розроблений авторами алгоритм, за яким функціонує ВП (рис. 1) з одночасним кодуванням вхідних сигналів.

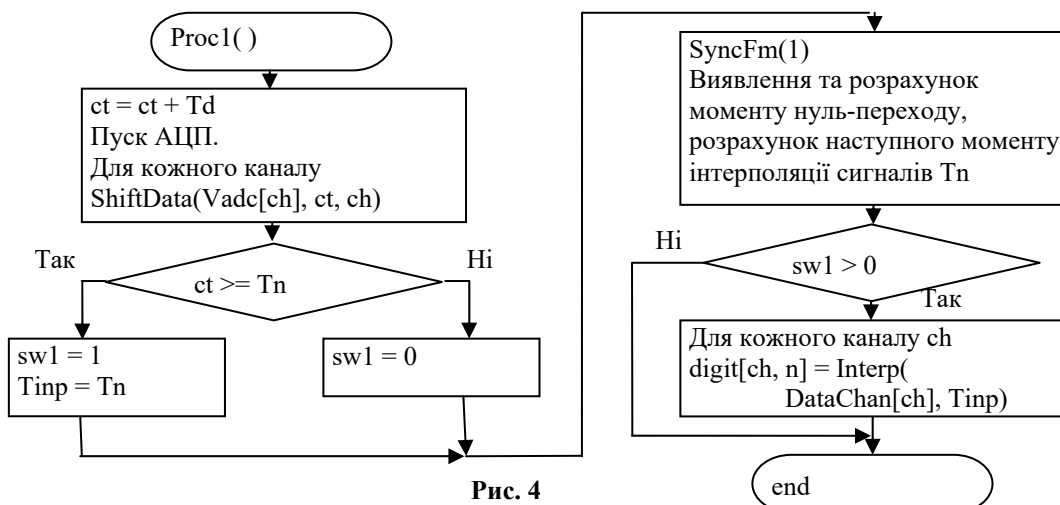


Рис. 4

Процес дискретизації вхідних сигналів виконується в обробнику переривання  $Proc1()$ , який генерується таймером МК із періодом  $T_d = 1/F_d$ . Одночасно запускаються усі АЦП або один багатоканальний АЦП. При цьому також фіксується нове значення поточного часу  $ct = CurrentTime$

як сума його попереднього значення та  $Td$ . Це відповідає моменту часу, в який було отримано поточні вибірки. Після закінчення процесу кодування вхідних сигналів в АЦП ці данні в процедурі  $ShiftData(v, t, ch)$  модифікують масив структур  $DataCh[Nch]$ , де для кожного каналу  $ch$  зберігаються попередні ( $v1, t1$ ) та поточні ( $v2, t2$ ) відліки вхідних сигналів  $v1, v2$  та відповідні їм відліки часу  $t1, t2$ . В процедурі  $ShiftData()$  дані для кожного каналу  $ch$  зсуваються відповідно з наступними формулами:

$$\begin{aligned} DataCh[ch].v1 &= DataCh[ch].v2; & DataCh[ch].v2 &= v; \\ DataCh[ch].t1 &= DataCh[ch].t2; & DataCh[ch].t2 &= t. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином у структурі  $DataCh[ch]$  завжди присутні попередні та поточні данні каналу  $ch$ .

Далі перевіряється, чи перевищив параметр  $ct$  очікуваний момент часу  $Tn$ , для якого будуть розраховуватися інтерпольовані відліки сигналів. Якщо так, то змінна-перемикач  $sw1$  приймає значення 1, у протилежному випадку – 0. В наступному блоці реалізується процедура  $SyncFm(1)$  (у даному випадку з параметром  $sw2 = 1$ ), в якій виконується синхронізація на підставі даних в масиві структур  $DataCh[ ]$  – виявляється та розраховується момент нуль-перетину  $tc = TimeCrossing$  та розрахунок наступного моменту інтерполяції сигналів  $tn$ .

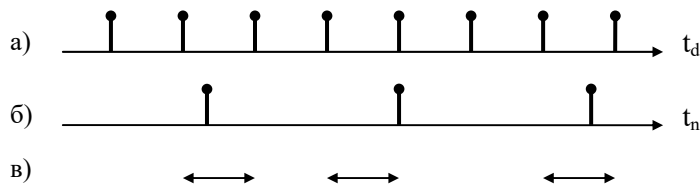


Рис. 5

структури  $DataCh[ch]$

$$v = v_1 + \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \cdot (Tinp - t_1). \quad (3)$$

Отримане значення  $v$  заноситься в масив вибірок  $digit[Nch, N]$ :  $digit[ch, n] = v$ , де  $n$  – номер вибірки сигналу в каналі  $ch$ .

На рис. 5 показано розташування вибірок, які отримано в АЦП в моменти часу  $t_d$  (рис. 5, а), інтерпольованих вибірок в моменти часу  $t_n$  (рис. 5, б) та інтервали лінійної апроксимації, в яких розраховуються інтерпольовані вибірки (рис. 5, в).

**Блок синхронізації** реалізовано у процедурі  $SyncFm(sw2)$ , блок-схему якої наведено на рис. 6. На рис. 7 та рис. 8 наведено відповідно блок-схеми процедур  $EmullrqTx(tc)$  та  $EmullrqFm()$ , які викликаються із  $SyncFm()$ , і за допомогою яких емулюється помножувач частот.

Високий рівень вищих гармонік може спричинити помилкові відліки нуль-переходів. Щоб запобігти цьому та усунути можливу похибку під час визначення періоду основної гармоніки сигналів, використовується цифровий фільтр низьких частот (ЦФНЧ) другого порядку з частотою зрізу 50 Гц. До цього ЦФНЧ висувається єдина вимога – забезпечити придушення вищих гармонік. Як вхідний сигнал ЦФНЧ можна використати один або деяку суму сигналів, значення яких можна брати із структур  $DataCh[ch].v2$ . Для трифазної мережі доцільно використовувати суму  $Us = Ua + Uc - Ub$ , тому що в переважній більшості випадків амплітуда такого сигналу приблизно в два рази більша амплітуди кожного із сигналів, які утворюють  $Us$ . Це забезпечує стабільну синхронізацію. Параметр  $sw2$  використовується для модифікації

Далі, якщо було встановлено  $sw1 > 0$ , тобто поточний час  $tc$  перевищив очікуваний момент часу  $Tinp = Tn$ , для якого потрібно обчислити інтерпольовані значення сигналів, то для кожного каналу  $ch$  в процедурі  $Interp(datach, Tinp)$  проводиться обчислення такого значення за формулою (використовуються елементи

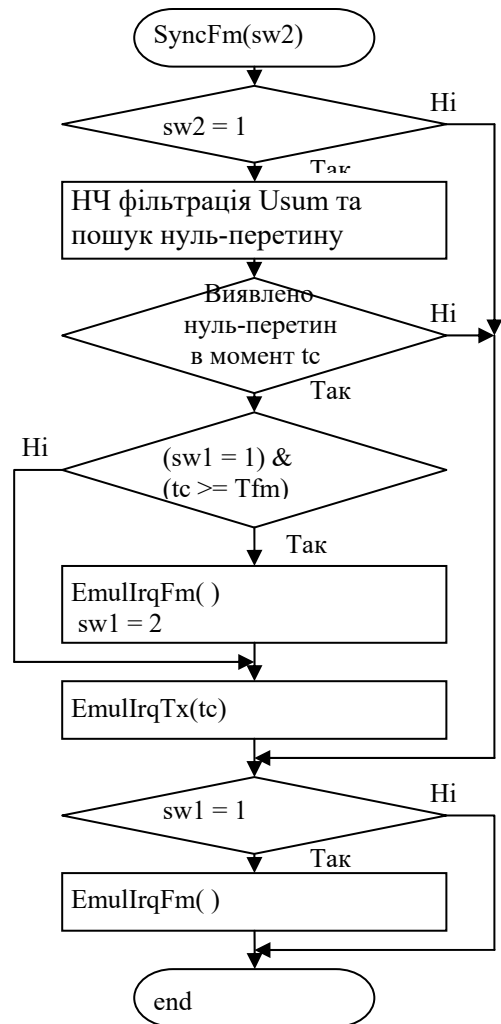


Рис. 6

процедури. Коли  $sw2 = 1$ , то реалізується цикл цифрової фільтрації та робиться спроба виявити нуль-

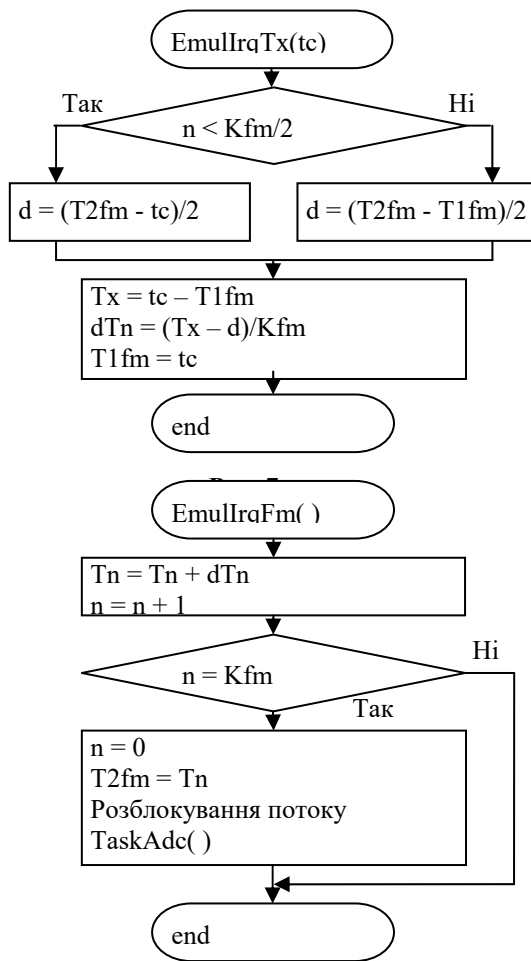


Рис. 8

Алгоритм функціонування ЕПЧ пояснюється блок-схемами  $EmullrqTx(tc)$  на рис. 7 та  $EmullrqFm()$  на рис. 8. Слід відзначити, що цей алгоритм тотожний програмно-апаратній реалізації помножувача частоти [21]. Алгоритм використовує наступні змінні:  $Kfm$  – коефіцієнт множення частоти, рівний кількості інтерпольованих вибірок для кожного сигналу на періоді основної гармоніки;  $n$  – лічильник циклів  $EmullrqFm()$ ;  $Tn$  – момент часу чергової інтерполяції сигналів;  $dTn$  – період вихідних сигналів ЕПЧ;  $T1fm$  – попереднє значення  $tc$ ;  $T2fm$  – очікуваний момент часу останнього циклу ЕПЧ;  $Tx$  – виміряний за допомогою ЕПЧ період основної гармоніки сигналів.

Процедура  $EmullrqTx(tc)$  (рис. 7) виконується тільки в тому випадку, коли в черговому циклі виконання  $Proc1()$  було виявлено нуль-перетин в момент часу  $tc$ . Внаслідок можливих коливань частоти та/або фази сигналів момент часу  $tc$  може трохи відставати або випереджати момент  $T2fm$ , який відповідає моменту останнього циклу ПЧ на періоді сигналів. Якщо поточний номер циклу ЕПЧ  $n < Kfm/2$ , то це свідчить, що момент  $tc$  наступив раніше  $T2fm$  і тому похибка ЕПЧ

$$d = (T2fm - tc) / 2. \quad (5)$$

Якщо  $n \geq Kfm/2$ , то нове значення  $T2fm$  ще не отримано, і для обчислення похибки ЕПЧ ми використовуємо попередні значення  $T1fm$  та  $T2fm$

$$d = (T2fm - T1fm) / 2. \quad (6)$$

Далі визначаються період основної гармоніки сигналів

$$Tx = tc - T1fm, \quad (7)$$

та нове значення періоду вихідних сигналів ЕПЧ з урахуванням похибки  $d$

$$dTn = (Tx - d / 2) / Kfm. \quad (8)$$

На останок фіксується нове значення  $T1fm = tc$ .

цикл цифрової фільтрації та робиться спроба виявити нуль-перехід, а якщо  $sw2 = 0$ , то виконується тільки останній блок. Вихідні відліки ЦФНЧ також зберігаються у структурі  $DataDF$ , аналогічній  $DataCh$ . Для кожного нового відліку здійснюється перевірка умов того, що відбувся нуль-перетин: вибірки  $v1$  та  $v2$  мають різні знаки та  $v1 < v2$ . Якщо ці умови виконано, то виконується розрахунок моменту нуль-перетину  $tc = TimeCrossing$  за формулою (використовуються елементи структури  $DataDF$  для ЦФНЧ, яка аналогічна наведеній вище структурі  $DataCh$ )

$$t_c = \frac{t_1 \cdot v_2 - t_2 \cdot v_1}{v_2 - v_1}. \quad (4)$$

Ця формула відповідає формулі аналітичної геометрії для розрахунку точки перетину осі абсцис лінійною функцією, яка задана координатами двох точок [20]. Аналогічний метод виявлення нуль-переходів застосовано також в [7, 12].

Якщо був виявлений нуль-перетин, то необхідно синхронізувати ЕПЧ. Тут можливі декілька варіантів. Якщо  $tc$  більше  $Tn$ , тобто  $Tn$  відбувається раніше  $tc$ , то спочатку виконується черговий цикл ЕПЧ  $EmullrqFm()$ . При цьому змінна  $sw1=2$  – відзнака того, що цей цикл виконано. Далі виконується  $EmullrqTx(tc)$  – синхронізація ЕПЧ з основною частотою сигналів. Якщо було виконано умову  $ct \geq Tfm$ , за якої встановлено  $sw1=1$ , то виконується  $EmullrqFm()$ .

Якщо нуль-перетин не був виявленим, то за умови  $sw1=1$  виконується тільки  $EmullrqFm()$ , а якщо  $sw1 = 0$ , то всі гілки виконання  $EmullrqFm()$  та  $EmullrqTx()$  оминаються.

Розрахований за формулою (8) період вихідних сигналів ЕПЧ  $dTn$  застосовується в процедурі  $EmullrqFm()$  (рис. 8). В кожному циклі цієї процедури змінні  $Tn$  та  $n$  збільшуються відповідно на величини  $dTn$  та 1. В останньому на періоді  $Tx$  циклі, коли  $n$  досягає значення  $Kfm$ , виконується перехід до наступного періоду  $Tx$ , при цьому  $n = 0$ ,  $T2fm = Tn$  – останнє значення на закінченому періоді, яке в  $EmullrqTx()$  порівнюється з  $tc$ , також розблоковується потік (*thread*)  $TaskAdc()$  основної програми (рис. 9).

Кожний цикл в  $TaskAdc()$  починається з очікування події (*event*) розблокування потоку. Якщо певний час не було цієї події, то процедура  $WaitEvent()$  повертає код таймауту  $EV\_TMO$ , після чого вихідні параметри ВП скидаються в нульові значення. Якщо все нормально, то виконується процедура  $CountParams()$ , в якій по вибіркам з масиву  $digit[]$  розраховуються параметри сигналів електричної мережі, наприклад, за формулами, наведеними в [14].

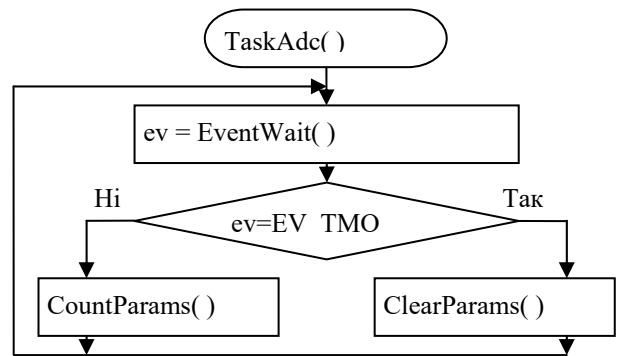


Рис. 9

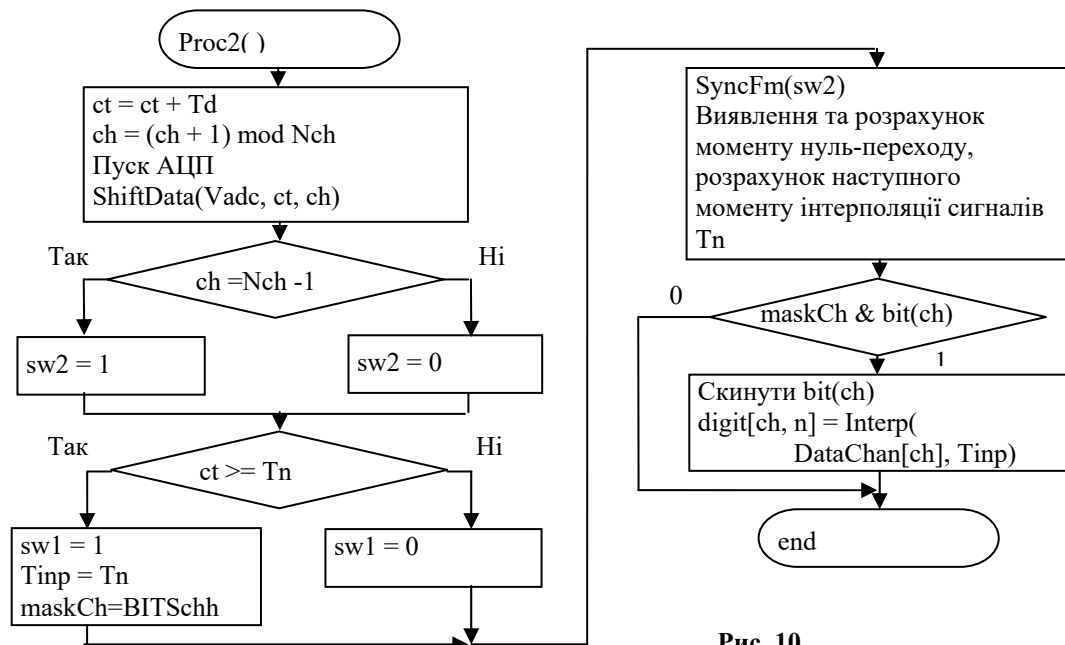


Рис. 10

Описаний алгоритм доцільно використовувати в дорогих засобах вимірювальної техніки: еталонах, мірах, калібраторах, де ціна і габарити не є визначальними. Для робочих вимірювальних засобів, в яких ціна і габарити виходять на перше місце, більш доцільно використовувати алгоритм з **послідовним кодуванням**. Запропонований авторами алгоритм обробки вибірок вхідних сигналів в ВП з **послідовним кодуванням** наведено на рис. 10. Цей алгоритм дещо відрізняється від алгоритму на рис. 4. По-перше, обробник переривання  $Proc2()$  генерується таймером МК із періодом  $Td=1/(Nch \cdot Fd)$ . При цьому кодується вибірка лише в одному черговому каналі і тільки дані цього каналу в процедурі  $ShiftData()$  заносяться в структуру  $DataChan[ch]$ . Тобто частоти вибірок для каналів залишаються рівними  $Fd$ . По-друге, коли починається цикл обробки каналу з останнім номером  $ch = Nch - 1$ , то змінна-перемикач  $sw2=1$ . За інших значеннях  $ch$  маємо  $sw2=0$ . Тому в процедурі  $SyncFm()$  перший блок, в якому реалізовано низькочастотну фільтрацію та пошук нуль-перетину, виконується за умови що  $sw2 = 1$ , тобто тоді, коли всі структури в масиві  $DataChan[]$  оновилися. По-третє, тому що заздалегідь невідомо, за якого значення змінної  $ch$  виникне умова  $ct \geq Tn$ , то, коли поточний час  $tc$  перевищує очікуваний час  $Tn$ , для якого будуть розраховуватися інтерпольовані відліки сигналів, додатково змінна  $maskCh$  ініціалізується константою  $BITSch$ , в якій всі біти з номерами від 0 до  $Nch-1$  встановлюються в одиничний стан. Потім перед інтерполяцією даних для каналу  $ch$  біт з номером  $ch$  в  $maskCh$  скидається в 0. Таким чином після кожної події  $ct \geq Tn$  для кожного каналу можливий лише один цикл інтерполяції.

На прикладі шести каналного ВП з вхідними сигналами напруги  $U_a, U_b, U_c$  та струму  $I_a, I_b, I_c$  на рис. 11 показано розташування вибірок АЦП в моменти часу  $t_d$  (рис. 11, а), інтерпольованих вибірок в моменти часу  $t_n$  (рис. 11, б) та інтервали лінійної апроксимації, в яких розраховуються інтерпольовані вибірки та послідовність обробки каналів (рис. 11, в).

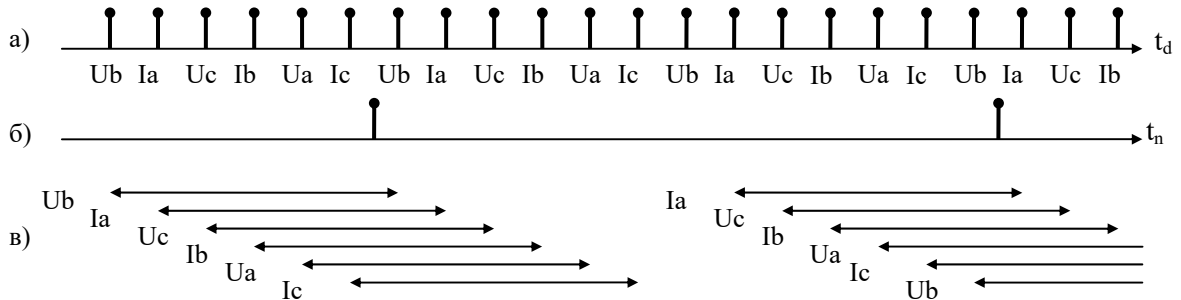


Рис. 11

Розглянуті алгоритми не можуть бути використані у повній мірі в просторово-розподілених вимірювальних системах, оскільки ініціалізація переривань на обробку вибірок відбувається зовнішніми ВП. Запропонований авторами алгоритм обробки вибірок вхідних сигналів у ВП (рис. 3) з **асинхронним кодуванням** наведено на рис. 12–15. Цей алгоритм достатньо складний, тому представлено найпростіший варіант, коли зовнішні ВП посилають в концентратор запити на обмін інформації. Концентратор для кожного зовнішнього ВП має відповідний вхід МК, сигнал на якому збуджує відповідне переривання  $IrqInput\_nch()$ , де  $nch$  – число від 1 до  $Nch$  – фізичний або логічний

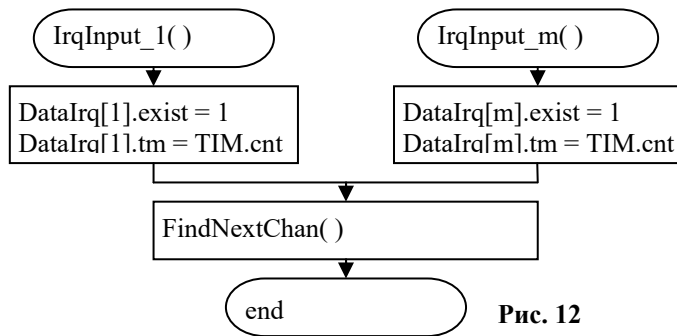


Рис. 12

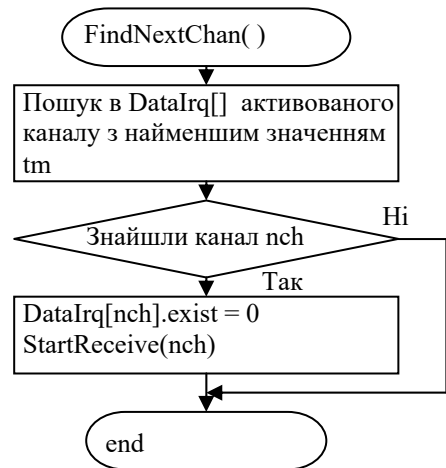


Рис. 13

номер каналу, який може не співпадати з номером каналу  $ch$ , що використовується в основній процедурі алгоритму  $Proc3()$  (рис. 12). В  $IrqInput\_nch()$  в структурі  $DataIrq[nch]$  фіксується, що канал  $nch$  отримав запит та момент часу цього запиту по лічильнику внутрішнього таймеру концентратора  $TIM.cnt$

$$\begin{aligned} DataIrq[nch].exist &= 1, \\ DataIrq[nch].tm &= TIM.cnt. \end{aligned} \quad (9)$$

Після цього викликається процедура  $FindNextChan()$ , яка у масиві  $DataIrq[]$  серед каналів, для яких  $DataIrq.exist = 1$ , виконує пошук каналу з мінімальним значенням  $tm$  (рис 13). Якщо такий канал знайдено, то  $DataIrq[nch].exist=0$  і викликається процедура  $StartReceive(nch)$ , що запускає обмін даними між зовнішнім ВП та концентратором.

Після завершення обміну даними викликається процедура  $GetExternalData()$  (рис 14), в якій дані, отримані з зовнішнього ВП з фізичним номером  $nch$ , заносяться у структуру  $DataAsync \{ch, Vadc, tm\}$ . В структурі  $DataAsync$  поле  $ch$  відповідає номеру каналу, який використовується в  $Proc3()$ , а поле  $tm$  – миттєвому значенню часу, за якого було отримано вибірку сигналу в зовнішньому ВП. Можливий варіант, коли зовнішній ВП не має датчика часу. Тоді у концентраторі при опції  $UseExternalTm = 0$  поле  $DataAsync.tm = DataIrq[nch].tm$ , тобто використовується локальний час концентратора. Далі дані із структури  $DataAsync$  використовуються в  $Proc3()$ , а потім знову

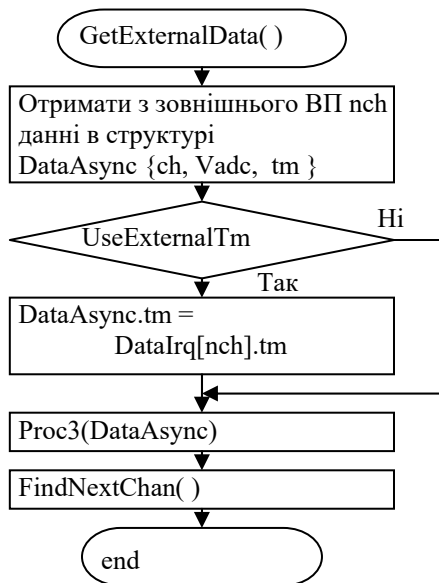


Рис. 14

викликається процедура *FindNextChan()* і виконується пошук наступного каналу з мінімальним значенням поля *tm* в масиві структур *DataIrq[]*.

Основний алгоритм обробки асинхронних даних виконується в процедурі *Proc3()*, де як параметр передається структура *DataAsync* (рис. 15). Основна відмінність цього алгоритму полягає в тому, що в кожному зовнішньому ВП своя частота дискретизації, тому доводиться ще інтерполювати вибірки сигналів, які входять в сумарний сигнал на вході ЦФНЧ. Це зумовлено тим, що хоча номінальні частоти дискретизації в зовнішніх ВП можуть бути рівними, але ж на практиці є деякі розбіжності в соті або тисячні долі процентів, внаслідок чого може плисти кут зсуву фази поміж вибірками сигналів із різних ВП. Деякі елементи блок-схеми на рис. 15 співпадають з раніше розглянутими блок-схемами алгоритмів на рис. 4 та рис. 10. В даному випадку не треба запускати АЦП, тому що усі необхідні дані було отримано із зовнішнього ВП (рис. 14). Проте, все одно порівнюється момент часу *tm* вибірки,

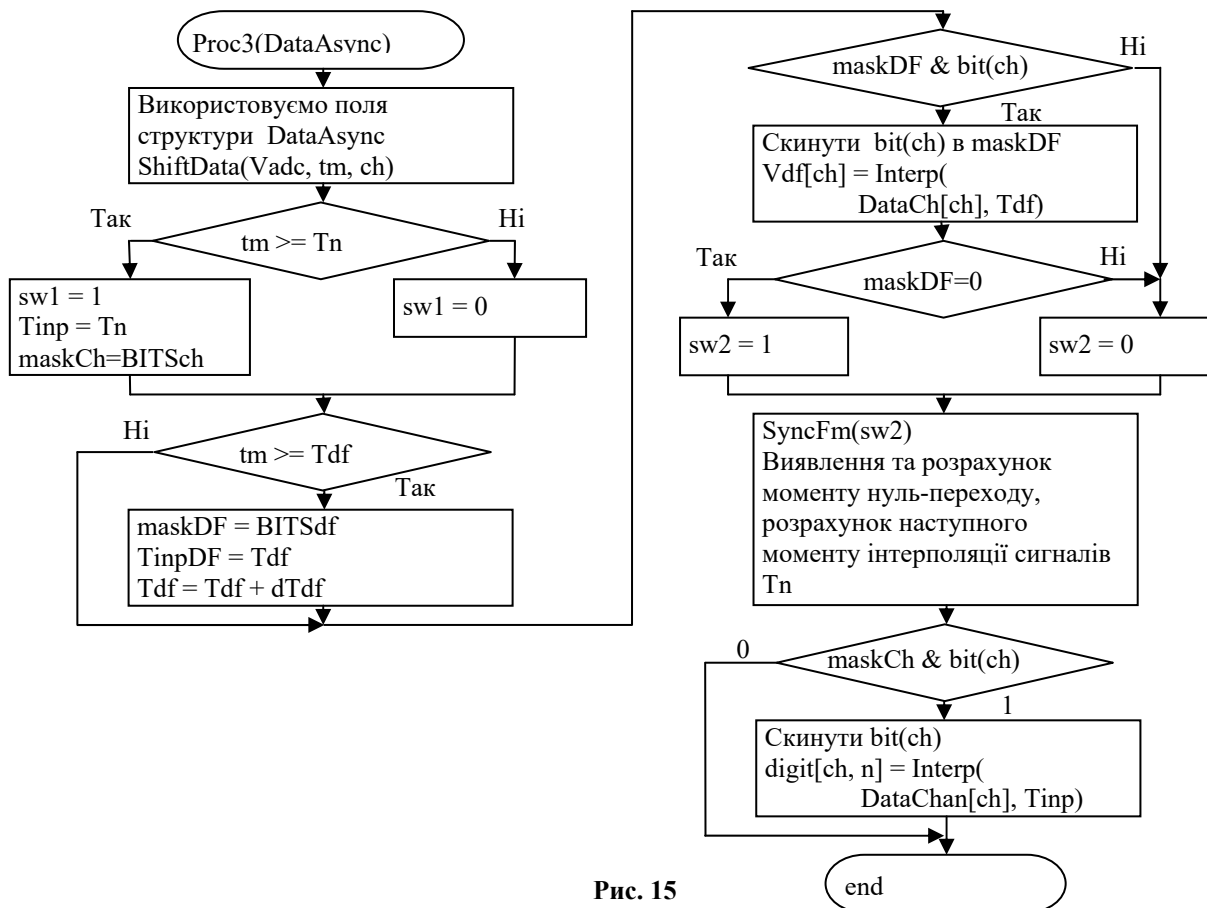


Рис. 15

незалежно від того звідки він взявся – із зовнішнього ВП чи це локальний час концентратора з очікуваним моментом часу ЕПЧ  $T_n$ . Також  $tm$  порівнюється з очікуваним моментом  $T_{df}$  вибірки на вході ЦФНЧ. Якщо виявилось перевищення  $tm \geq T_n$  та/або  $tm \geq T_{df}$ , то, відповідно, фіксується момент часу  $T_{inp}$  та/або  $T_{inpDF}$ , до якого прив'язані інтерпольовані вибірки, та встановлюються змінні  $maskCh = BITSch$  та/або  $maskDF = BITSdf$ . Для варіанту концентратора, який обробляє сигнали напруг  $U_a, U_b, U_c$  та струмів  $I_a, I_b, I_c$ , шістнадцятирічний код констант буде  $maskCh = 0x3F$ ,  $maskDF = 0x07$ , тобто кожному каналу  $ch$ , який використовується, відповідає встановлений одиничний біт із номером  $ch$ . Далі йде блок, в якому виконується інтерполяція вибірок для сумарного сигналу ЦФНЧ. Цей блок аналогічний тому, який застосовується для інтерполяції вибірок для моменту  $T_d$ .

Інтерполяція виконується для того каналу, для якого встановлено одиничний біт в *maskCh* та/або *maskDF*, після чого цей біт скидається. Зауважимо, що частота дискретизації вхідного сигналу ЦФНЧ  $F_{df} = 1/T_{df}$  може суттєво відрізнятись від частот дискретизації в зовнішніх ВП. Параметр *sw2*, який використовується в процедурі *SyncFm()*, приймає значення одиниці тільки після того як всі канали, що беруть участь у формуванні вхідного сигналу ЦФНЧ, будуть оброблені.

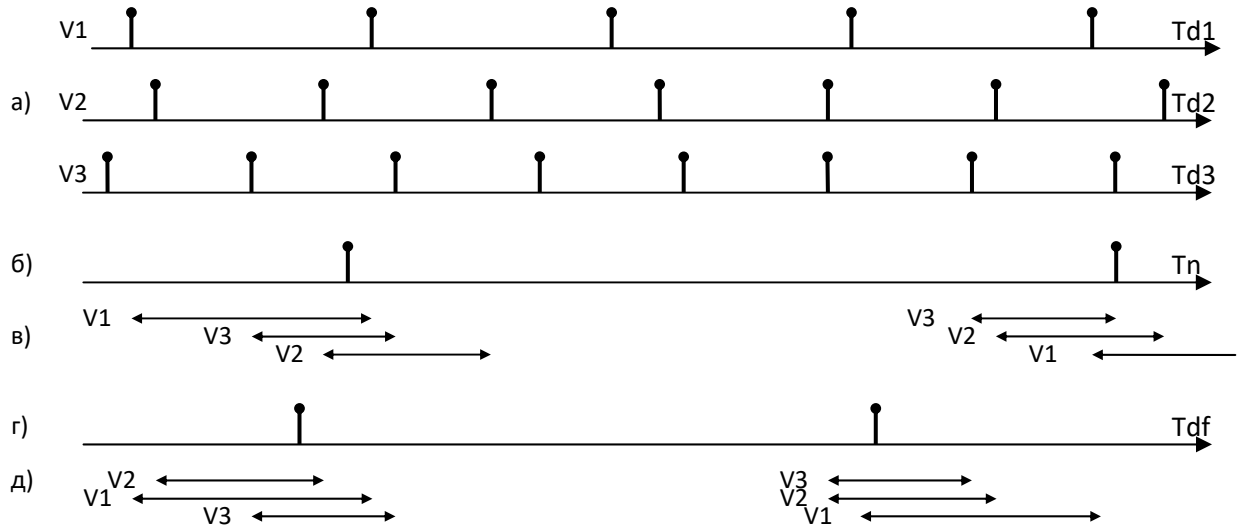


Рис. 16

На рис. 16 на прикладі трьохканального ВП з вхідними сигналами  $V_1, V_2, V_3$  показано розташування вибірок за умови кодування в зовнішніх ВП відповідно з періодами дискретизації  $T_{d1}, T_{d2}, T_{d3}$  (рис. 16, а) інтерпольованих вибірок з періодами дискретизації  $T_n$  та  $T_{df}$  (рис. 16, б та 16, в) та відповідні їм інтервали лінійної апроксимації, в яких розраховуються інтерпольовані вибірки та послідовність обробки даних каналів (рис. 16, в та 16, д).

**Практичні дослідження.** Для підтвердження ефективності запропонованих алгоритмів було розроблено комп'ютерну модель та макет розподіленої вимірювальної системи. Ця модель дає змогу задавати вибірки сигналів для довільних моментів часу з заданою частотою дискретизації  $F_d$ , моделювати похибки АЦП, виконувати запроваджені алгоритми обробки сигналів. На рис. 17

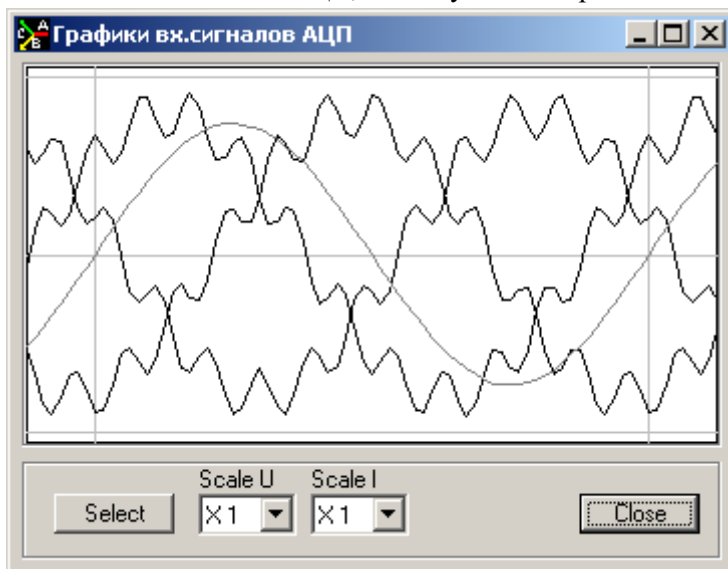


Рис. 17

наведено графіки вхідних сигналів, які отримано завдяки цій комп'ютерній моделі і до яких був залучений алгоритм лінійної апроксимації. Для кожного із сигналів застосовано по 64 вузла, між якими виконано лінійну апроксимацію у точках відповідно формулі (1). Вхідні сигнали створені за допомогою програмного цифрового генератора. У даному випадку ці сигнали є сумішшю основної та тринадцятої гармоніки (так наочніше). Сірим кольором наведено синусоїду вихідного сигналу ЦФНЧ, за точками нуль-перетину якого визначається період сигналу.

Макет розподіленої вимірювальної системи (рис. 18) включає в себе генератор трифазної напруги ГТН; зразковий трифазний ВП; три однакові

одноканальні зовнішні ВП1 – ВП3, структурну схему яких зображено на рис. 19; мікроконтролер МК, який отримує дані від ВП1 – ВП3 та обробляє їх згідно з запропонованими алгоритмами (рис. 12–15); ПЕОМ. За МК у зразковому ВП та зовнішніх ВП використовуються мікросхеми STM32F401CB [22]



або STM32F411CC [23]. На макеті зв'язок між зовнішніми ВП та МК здійснюється через *SPI* (*Serial Peripheral Interface*) [24], а з ПЕОМ – через *RS232* [25]. Кожний із ВП1 – ВП3 має свій датчик часу, за який, наприклад, використовується модуль GPS [26]. Модуль GPS у кожному ВП генерує блок даних з поточним відліком часу та іншими параметрами [27], який через *UART* [28] пересилається до МК. Модуль GPS також генерує короткий імпульс *PPS* (*Time pulse signal per second*), точність появи переднього фронту якого складає 30 наносекунд [26]. Цей імпульс надходить на один із входів запиту переривання МК і є базовим для відліку моменту кодування вибірки вхідного сигналу. МК згідно алгоритму на рис. 12 та 13 обробляє запити, обирає один із зовнішніх ВП (сигнали *Enable1* – *Enable3*) і зчитує з нього данні через *SPI* або якийсь інший інтерфейс. У зовнішньому ВП можливо використання як вбудованого в МК 12-бітного АЦП, так і зовнішнього АЦП, наприклад, 16-бітного АЦП ADS8320 [29].

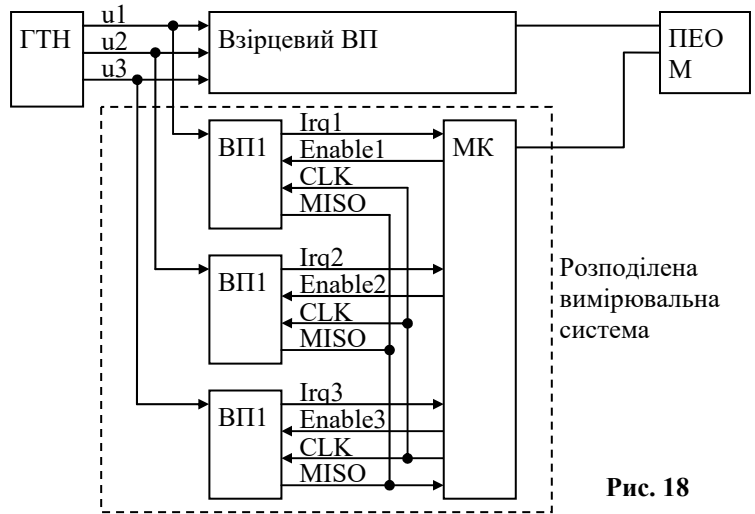


Рис. 18

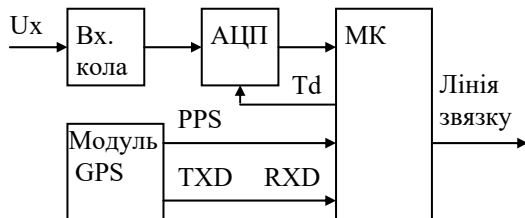


Рис. 19

Корекція амплітудних та фазових похибок виконується в МК концентратора згідно з алгоритмами, наведеними в [30].

Стосовно визначення точного моменту взяття вибірки. Імпульси *PPS* слідують з інтервалом 1 сек, а нам потрібно з кожною вибіркою надавати відлік часу з точністю хоча би 1 мкс. Це питання вирішується таким чином. Імпульс *PPS* поступає на один із входів переривання МК, який пов'язаний з внутрішнім модулем

*Input capture* [22], в якому внутрішнім таймером МК фіксується момент приходу імпульсу *PPS* з дискретністю тактової частоти на вході таймеру *Fclk*. У нас ця частота дорівнює 10 МГц, тобто роздільна здатність по часу складає  $T_0 = 0.1$  мкс. АЦП також запускається по цьому ж таймеру.

Враховуючи, що точність кварцового генератора, імпульси якого поступають на вхід таймера, може складати кілька сотих проценту, то треба корегувати значення коду таймера, яке використовується для відліку часу вибірки. Це робиться в наступному алгоритмі. З блоку даних [25], який через *UART* передається з модулю GPS в МК, обчислюється номер секунди  $Nsec$ , наприклад, від початку XXI століття. Фіксуються відліки  $N1cap$  модуля *Input capture* для моментів появи імпульсів *PPS*, по яким обчислюється період  $PPS$   $Npps$  та інші параметри у одиницях періоду вхідних імпульсів таймеру

$$\begin{aligned} Npps &= Ncap - Nprev, \\ Nprev &= Ncap, \\ Kpps &= (2 \cdot Nnom - Npps) / Nnom, \end{aligned} \quad (10)$$

де  $Nprev$  – значення  $Ncap$  для попереднього періоду;  $Nnom$  – номінальне значення періоду імпульсів *PPS*, у даному випадку  $Nnom = 10000000$  чисельно дорівнює номінальному значенню  $Fclk$ ,  $Kpps$  – коефіцієнт, який застосовується під час обчислювання моменту вибірки вхідного сигналу  $tn$  за формулою

$$tn = (Ncnt - Nprev) \cdot Kpps + Nsec, \quad (11)$$

де  $Ncnt$  – значення лічильника таймера у момент запуску АЦП.

У перспективі можливе запровадження зв'язку між зовнішніми ВП і концентратором через канали *Ethernet* чи *WiFi* з використанням протоколів IEC 61850 [31, 32].

**Висновки.** 1. За результатами досліджень проведено систематизацію алгоритмів цифрової обробки сигналів в залежності від умов їхнього використання.

2. Розроблені алгоритми застосовано у макетах приладів та системах вимірювання параметрів електричної енергії. При цьому після інтерполяції вибірок миттєвих значень сигналів до них можуть бути застосовані раніше розроблені алгоритми [7] обчислення параметрів.

3. В результаті моделювання та експериментальної перевірки на макетах ВП отримано точність вимірювання до 0.05% і вище.

4. Надзвичайно важливим застосуванням розроблених алгоритмів може бути розподілена у просторі вимірювальна система, коли у різних точках мережі встановлені ВП для збору миттєвих значень сигналів, а їхня обробка виконується в концентраторі або в ПЕОМ.

1. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Блінов І.В. Цифрова трансформація енергетики: сучасні тенденції та завдання. *Праці ІЕД НАН України*. 2023. Вип. 65. С. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>.
2. Жаркін А.Ф., Палачов С.О. Впровадження в нормативну базу України європейських вимог до проведення вимірювання показників якості електричної енергії. *Праці ІЕД НАН України*. 2023. Вип. 65. С. 15-20. DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.015>.
3. ГОСТ 13109-97 Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Киев, Госстандарт Украины, 1999. 31 с.
4. ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012 Электромагнитная совместимость. Часть 4-7. Методики испытания и измерения. Общее руководство по измерению гармоник и интергармоник от электроснабжающих систем общего назначения и вспомогательного оборудования (ІЕС 61000-4-7:2009, ІDT). URL: [https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=29280](https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=29280) (дата звернення 20.02.2024).
5. ІЕС 82053-21:2003(E) Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements – Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2). URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62053-21%7Bed1.0%7Den\\_d.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62053-21%7Bed1.0%7Den_d.pdf) (дата звернення 20.02.2024).
6. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. Киев: Техника, 1985. 151 с.
7. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Микропроцессорный измерительный преобразователь параметров электрических сетей. *Технічна електродинаміка*. 2003. № 5. С. 69-75.
8. Борщев П.И. Селективный измеритель электрических величин на промышленной частоте. *Технічна електродинаміка*. 2005. № 4. С 74–78.
9. Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Serial Port ADE7754. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7754.pdf> (дата звернення 20.02.2024).
10. High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC ADE9000. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade9000.pdf> (дата звернення 20.02.2024).
11. AN-1483: Harmonic Analysis Using the ADE9000 by Aaron Heredia. URL: <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-1483.html> (дата звернення 20.02.2024).
12. Implementation of a Three-Phase Electronic Watt-Hour Meter Using the MSP430F677x(A). URL: <http://www.ti.com/lit/an/slaa577g/slaa577g.pdf> (дата звернення 20.02.2024).
13. Window function. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Window\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function) (дата звернення 20.02.2024).
14. Таранов С.Г., Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Современные средства измерения параметров электрических сетей. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2010. Вип. 26. С. 114-120.
15. Digital measurement: ІЕС 61850-9-2 process bus and ІЕС 61869-9 current transformers. URL: <https://www.artech.com/en/digital-instrument-transformers> (дата звернення 20.02.2024).
16. Lebedev V., Yablokov A., Ivanov I., Litvinov S. Development of a high accuracy digital voltage transformer and a test bed supporting ІЕС 61850 and ІEEE C37.118. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7981226> (дата звернення 20.02.2024).
17. Jianqin Feng, Qingming Wang, Fen Niu; Guangzhao Cui, Anping Zheng An Electronic Voltage Transformer Based on WLAN Technology. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5459830> (дата звернення 20.02.2024).
18. Цифровая подстанция. Технологии и системы компании Сименс. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f278d576-62bf-4c19-b9ef-0e63b6cf2cfb/ru-digital-substation.pdf> (дата звернення 20.02.2024).
19. 250 kSPS, 6-Channel, Simultaneous Sampling, Bipolar 16-/14-/12-Bit ADC 5. Data Sheet AD7656/AD7657/AD7658. URL: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656\\_7657\\_7658.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656_7657_7658.pdf) (дата звернення 20.02.2024).
20. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1977. 832 стр.
21. Карасинский О.Л., Тесик Ю.Ф. Программно-аппаратная реализация умножителей частоты. *Электронное моделирование*. 2002. №1. С. 119-124.

- 22 STM32F401. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401.html> (дата звернення 20.02.2024).
- 23 STM32F411. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f411.html> (дата звернення 20.02.2024).
- 24 Serial Peripheral Interface. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface) (дата звернення 20.02.2024).
- 25 RS-232. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232> (дата звернення 20.02.2024).
- 26 GP-02-Kit Specifications. URL: [https://arduino.ua/files/GP-02-Kit\\_Specifications-2021-0729.pdf](https://arduino.ua/files/GP-02-Kit_Specifications-2021-0729.pdf) (дата звернення 20.02.2024).
- 27 Описание протокола NMEA 0183. URL: <https://wiki.iarduino.ru/page/NMEA-0183/> (дата звернення 20.02.2024).
- 28 Universal asynchronous receiver-transmitter. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_asynchronous\\_receiver-transmitter](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver-transmitter) (дата звернення 20.02.2024).
- 29 ADS8320 16-Bit, High-Speed, 2.7-V to 5-V microPower Sampling Analog-to-Digital Converter. URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8320.pdf?ts=1709578285793&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8320.pdf?ts=1709578285793&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (дата звернення 20.02.2024).
- 30 Карасінський О.Л., Тесик Ю.Ф. Корекція похибок у приладах вимірювання параметрів електричної енергії. *Технічна електродинаміка*. 2021. №2. С. 84-90. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.084>.
- 31 IEC 61850. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61850#Features](https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61850#Features) (дата звернення 20.02.2024).
- 32 IEC 61850-9-2:2011 Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6023> (дата звернення 20.02.2024).

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF MEASUREMENT ALGORITHM PARAMETERS OF ELECTRICITY IN THE CASE OF USING A FIXED FREQUENCY OF SAMPLING OF SIGNALS

O.L. Karasinskiy, Yu.F. Tesyk

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,  
56, Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

E-mail: [pribor@ied.org.ua](mailto:pribor@ied.org.ua).

*A study of the possibilities of measuring current values, phase shift angles and other parameters of electrical networks using these data, when sampling with a frequency not multiple of the network frequency, was carried out. In the proposed algorithm, an intermediate linear approximation is used to calculate the instantaneous values of interpolated signals at equidistant moments of time during the period of the main frequency of the network. The cases when such sampling is performed on one device with sequential or simultaneous coding of input signals and the case when sampling frequencies do not match in each measurement channel are considered. A study of the use of these methods was conducted using the developed computer model and layout of the distributed measurement system. References 32, figures 19.*

**Key words:** devices, electrical networks, analog-digital conversion, discretization, linear approximation and interpolation.

1. Kyrylenko O.V., Denysiuk S.P., Blinov I.V. Digital transformation of the energy industry: current trends and task. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. No 65. Pp. 5-14. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.005>.
2. Zharkin A.F., Palachov S.O. Implementyayion of the Eropean prinxples of measuring the quality of electrical energy into the requkatory base of Ukraine. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2023. No 65. Pp. 15-20. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/publishing2023.65.015>
3. State Standard 13109 -97 Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems. Kyiv, Gosstandart Ukrainy, 1999, 31 p. (Rus)
4. State Standard of Ukraine IEC 61000-4-7:2009. Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected (IEC 61000-4-7:2009, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id\\_doc=29280](https://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=29280) (accessed at 20.02.2024).
5. IEC 82053-21:2003(E) Electricity metering equipment (a.c.) – Particular requirements – Part 21: Static meters for active energy (classes 1 and 2). URL: [https://webstore.iec.ch/preview/info\\_iec62053-21%7Bed1.0%7Den\\_d.pdf](https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62053-21%7Bed1.0%7Den_d.pdf) (accessed at 20.02.2024).
6. Gorlach A.A., Mints M.Ya., Chinkov V.N. Digital signal processing in measurement technology. Kyiv: Tekhnika, 1985. 151 p. (Rus)
7. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F. Microprocessor measuring transducer for electrical network parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2003. No 5. Pp. 69-75. (Rus)

8. Borschev P.I. Selective meter of electrical values at industry frequency. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2005. No 4. Pp. 74-78 (Rus).
9. Polyphase Multifunction Energy Metering IC with Serial Port ADE7754. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADE7754.pdf> (accessed at 20.02.2024).
10. High Performance, Multiphase Energy, and Power Quality Monitoring IC ADE9000. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ade9000.pdf> (accessed at 20.02.2024).
11. AN-1483: Harmonic Analysis Using the ADE9000 by Aaron Heredia. URL: <https://www.analog.com/en/resources/app-notes/an-1483.html> (accessed at 20.02.2024).
12. Implementation of a Three-Phase Electronic Watt-Hour Meter Using the MSP430F677x(A). URL: <http://www.ti.com/lit/an/slaa577g/slaa577g.pdf> (accessed at 20.02.2024).
13. Window function. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Window\\_function](https://en.wikipedia.org/wiki/Window_function) (accessed at 20.02.2024)
14. Taranov S.G., Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F. Modern devices of measuring the parameters of electrical networks. *Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsionalnoi Akademii Nauk Ukrainy*. 2010. Vyp. 26. Pp. 114-120. (Rus)
15. Digital measurement: IEC 61850-9-2 process bus and IEC 61869-9 current transformers. URL: <https://www.artech.com/en/digital-instrument-transformers> (accessed at 20.02.2024).
16. Lebedev V., Yablokov A., Ivanov I., Litvinov S. Development of a high accuracy digital voltage transformer and a test bed supporting IEC 61850 and IEEE C37.118. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7981226> (accessed at 20.02.2024).
17. Jianqin Feng, Qingming Wang, Fen Niu; Guangzhao Cui, Anping Zheng An Electronic Voltage Transformer Based on WLAN Technology. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5459830> (accessed at 20.02.2024).
18. Digital substation. Siemens technologies and systems. URL: <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f278d576-62bf-4c19-b9ef-0e63b6cf2cfb/ru-digital-substation.pdf> (accessed at 20.02.2024) (Rus).
19. 250 kSPS, 6-Channel, Simultaneous Sampling, Bipolar 16-/14-/12-Bit ADC 5. Data Sheet AD7656/AD7657/AD7658. URL: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656\\_7657\\_7658.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD7656_7657_7658.pdf) (accessed at 20.02.2024).
20. Korn G., Korn T. Mathematical Handbook for scientists and engineers. Moskva: Nauka, 1977. 832 p. (Rus)
21. Karasinskiy O.L., Tesik Yu.F Software and hardware implementation of multipliers frequencies. *Elektronnoe modelirovanie*. 2002. No 1. Pp.119-124.(Rus).
22. STM32F401. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f401.html> (accessed at 20.02.2024). (Rus)
23. STM32F411. URL: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32f411.html> (accessed at 20.02.2024).
24. Serial Peripheral Interface. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface) (accessed at 20.02.2024).
25. RS-232. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-232> (accessed at 20.02.2024).
26. GP-02-Kit Specifications. URL: [https://arduino.ua/files/GP-02-Kit\\_Specifications-2021-0729.pdf](https://arduino.ua/files/GP-02-Kit_Specifications-2021-0729.pdf) (accessed at 20.02.2024).
27. Description of the protocol NMEA 0183. URL: <https://wiki.iarduino.ru/page/NMEA-0183/> (accessed at 20.02.2024). (Rus)
28. Universal asynchronous receiver-transmitter. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Universal\\_asynchronous\\_receiver-transmitter](https://en.wikipedia.org/wiki/Universal_asynchronous_receiver-transmitter) (accessed at 20.02.2024).
29. ADS8320 16-Bit, High-Speed, 2.7-V to 5-V microPower Sampling Analog-to-Digital Converter. URL: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8320.pdf?ts=1709578285793&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads8320.pdf?ts=1709578285793&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (accessed at 20.02.2024).
30. Karasinskiy O.L., Tesyk Yu.F. Correction of errors in instruments of measuring electric power parameters. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2021. No 2. Pp. 84-90. (Ukr) DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2021.02.084>
31. IEC 61850. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/IEC\\_61850#Features](https://en.wikipedia.org/wiki/IEC_61850#Features) (accessed at 20.02.2024).
32. IEC 61850-9-2:2011 Communication networks and systems for power utility automation - Part 9-2: Specific communication service mapping (SCSM) - Sampled values over ISO/IEC 8802-3. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6023> (accessed at 20.02.2024).

Надійшла 13.03.2024  
Остаточний варіант 13.06.2024