

УДК 681.516.75:631.234

**ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ  
КВАРЦОВОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО  
КОНТРОЛЮ СИНХРОСИГНАЛІВ**

*Д. О. Кальян, аспірант\**

*В. В. Коваль, доктор технічних наук, професор*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*Ю. А. Максименко, кандидат технічних наук, старший викладач кафедри*

*Військова академія, м. Одеса*

*О. В. Самков, доктор технічних наук, старший науковий співробітник*

*Інститут електродинаміки НАН України*

*В.Г. Дубович-Костецький, студент магістратури*

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

*E-mail: [v.koval@nubip.edu.ua](mailto:v.koval@nubip.edu.ua)*

**Анотація.** Актуальним в умовах сьогодення є розробка, дослідження та оптимізація апаратно-програмного забезпечення для створення ефективної системи автоматизованого контролю синхросигналів, які використовуються в високотехнологічних системах різних галузей економіки. Метою роботи є дослідження сучасних рішень для підвищення якості безперервного контролю синхросигналів по параметру відхиленню часового інтервалу (ВЧІ), відносно опорного сигналу, за рахунок оптимізації процесу фазового автопідстроювання частоти кварцового генератора, що є складовою частиною блоку первинного перетворювача системи автоматизованого контролю синхросигналів. Для забезпечення, в автоматичному режимі, безперервного контролю ВЧІ синхросигналу розроблено блок первинного перетворювача БПП TIMETER з використанням оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ та адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД). Виконано імітаційне моделювання системи з використанням програми Simulink пакету MATLAB, що підтвердило отримані теоретичні положення. Використання АЦФД, який захищено патентом України на винахід забезпечує оптимальне керування формою дискримінаційної характеристики, мінімальну тривалість перехідного процесу автопідстроювання частоти кварцового генератора, що покращує якісні показники опорного сигналу системи автоматизованого контролю.

*Використання БПП TIMETER забезпечує в автоматичному режимі високоякісний контроль синхросигналів шляхом виконання одночасних багатоканальних вимірювань ВЧІ відносно опорного сигналу (еталону). Система забезпечує прямі, незалежні та достовірні результати контролю сигналів синхронізації з централізованим управлінням та накопиченням даних, що дозволяє не тільки своєчасно знаходити і локалізувати проблеми в формуванні синхросигналів, а також, при використанні статистичних методів обробки інформації, прогнозувати їх якість та стабільність.*

**Ключові слова:** *синхронізація, автопідстроювання, оптимізація, швидкодія, відхиленню часового інтервалу, адаптивний цифровий фазовий дискримінатор, автоматизований контроль*

**Актуальність.** Розвиток багатьох напрямків економіки країни, особливо тих, які в виробничих процесах використовують сучасні досягнення високих технологій, безупинно висуває підвищені вимоги до інформаційного забезпечення. Зважаючи на те, що сучасний світ інформації в значній мірі базується на цифрових засобах обробки, транспортування та її зберігання, то для ефективного функціонування цих засобів постає проблема в синхронізації, для забезпечення якої необхідні якісні синхросигнали. Одним із способів підвищення якості синхросигналів є проведення контролю їх параметрів. Зважаючи на це, актуальним в умовах сьогодення є розробка, дослідження та оптимізація апаратно-програмного забезпечення для створення ефективної системи автоматизованого контролю синхросигналів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Виконаємо аналіз останніх досліджень та публікацій, що стосуються проблем контролю синхросигналів, які використовуються в телекомунікація, електроенергетиці, метрології, а також методів і способів побудови високоякісних пристроїв, які використовуються для побудови систем автоматизованого контролю.

Насамперед, варто зазначити, що цифрові технології, незважаючи на те де вони застосовуються, потребують точного визначення і синхронізації часових інтервалів. Так, наприклад, від параметрів та характеристик синхронізації залежить якість надання сучасних інформаційних послуг засобами

телекомунікацій користувачам, можливість їх розширення, а також взаємодії та інтеграції з системами інших країн, континентів [1-5].

При функціонуванні інтегрованих систем електропостачання на базі SMART-технологій, розподільних електричних мереж з розосередженими джерелами електроенергії (вітрові, сонячні та інші електростанції на нетрадиційних джерелах енергії) виникають задачі управління режимами роботи, стійкості, організації роботи систем автоматики та ін. Дані задачі безпосередньо пов'язані з керуванням та моніторингом параметрів обладнання мереж з прив'язкою до реального часу за рахунок використання синхросигналів відповідної якості [6-8].

Об'єктам, яким необхідні синхросигнали можуть бути сукупності великих систем, або їх підсистеми і окремі виділені об'єкти, в першу чергу, це високотехнологічні інформаційні системи державних інституцій. Національні об'єкти, що потребують використання синхросигналів: телекомунікаційні мережі, цифрове телебачення, об'єднані електроенергетичні системи, метрологія, білінг, авіаційний та залізничний транспорт, нафто та газопроводи, агропромислова, природоохоронна та інші галузі економіки [1-10]. Окремо слід зазначити важливість отримування еталонних синхросигналів точного часу службами спеціального призначення, які вирішують задачі національної кібербезпеки держави та необхідність впровадження в країні єдиного (київського) обліково-звітного часу.

Аналіз наукових публікацій закордонних і вітчизняних вчених [1-10] дає можливість стверджувати, що актуальною проблемою сьогодення є підвищення якості синхросигналів. Одним із способів підвищення якості синхросигналів є здійснення оптимізації пристроїв та систем формування і вимірювання їх параметрів, що і є основною метою статті.

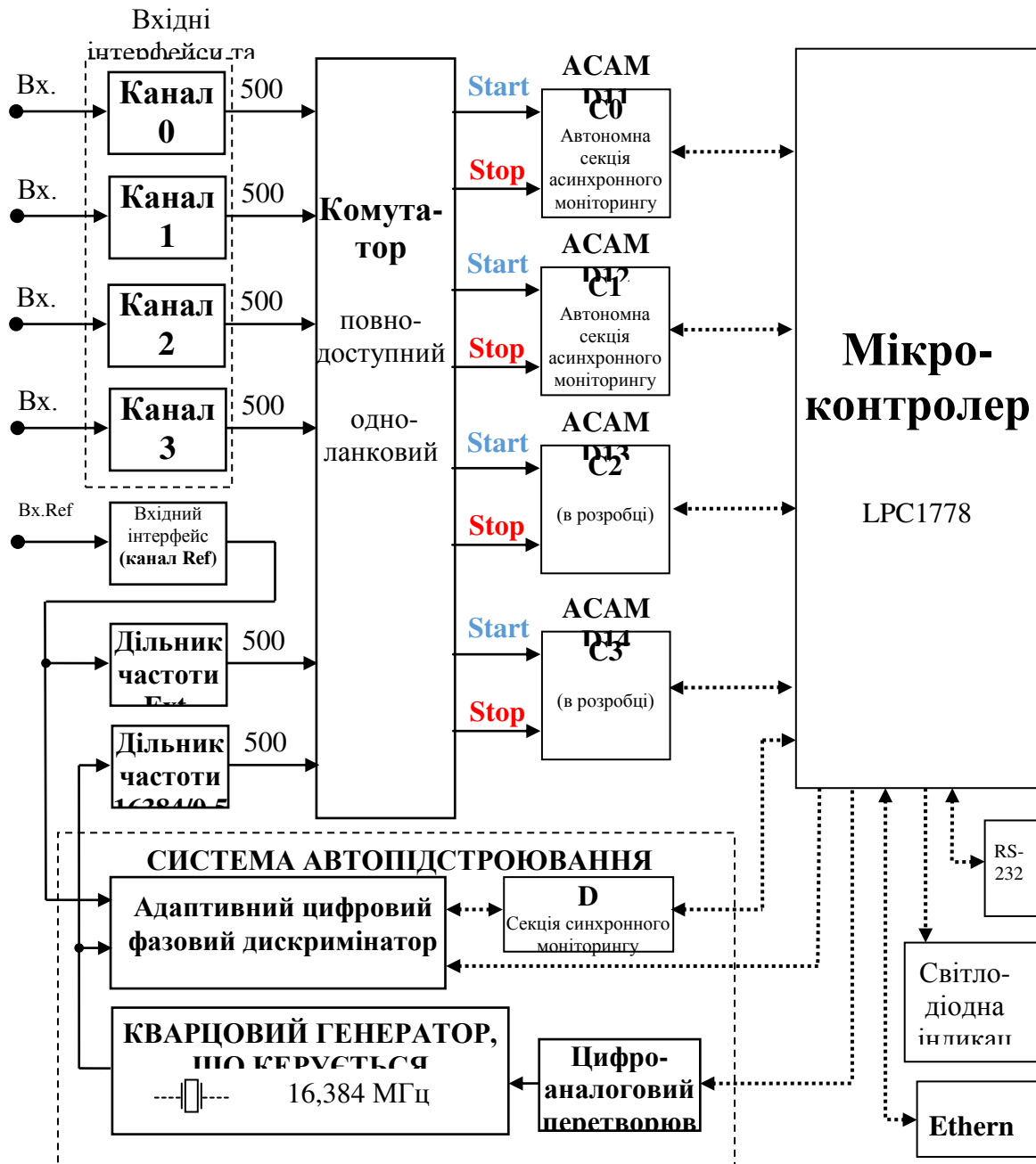
**Мета** дослідження – аналіз сучасних рішень для підвищення якості безперервного контролю синхросигналів по параметру відхиленню часового

інтервалу, відносно опорного сигналу, за рахунок оптимізації процесу фазового автопідстроювання частоти кварцового генератора, що є складовою частиною блоку первинного перетворювача системи автоматизованого контролю синхросигналів.

**Матеріали і методи дослідження.** Розглянемо методи фазової синхронізації та оптимізації за швидкодією системи автопідстроювання частоти кварцового генератора, розробку та натурні дослідження лабораторного макету блоку первинного перетворювача системи автоматизованого контролю синхросигналів.

*Система автоматизованого контролю синхросигналів.* Система забезпечує в автоматичному режимі безперервний контроль відхилення часового інтервалу (ВЧІ) синхросигналу відносно опорного сигналу, вимірювання якого здійснюється в блоці первинного перетворювача (рис.1). В якості опорного може використовуватись сигнал, який приймається від супутникових навігаційних систем GPS чи ГЛОНАСС, національного еталона часу і частоти, іншого високостабільного зовнішнього джерела або від вбудованого кварцового генератора (КГ). В останньому випадку забезпечується можливість вибору одного із каналів, в якості синхронізуючого сигналу, для фазового автопідстроювання частоти вбудованого КГ.

Аналіз вимог до точності передавання і формування опорного сигналу обумовлює необхідність підвищення якості роботи системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Однією із вимог до робочих характеристик системи є оптимальне за швидкодією входження в синхронізм, що можливо забезпечити мінімальною тривалістю режимів перехідних процесів [1, 2, 4]. Виконаємо оптимізацію за швидкодією автопідстроювання частоти вбудованого кварцового генератора, що підвищить якісні показники опорного сигналу і, як наслідок, забезпечить підвищення точності і достовірності системи автоматизованого контролю синхросигналів.



**Рис.1. Структурна схема блоку первинного перетворювача системи автоматизованого контролю синхросигналів**

Оптимізація за швидкодією системи фазового автопідстроювання частоти кварцового генератора першого порядку. В системі ФАПЧ синхронізуючий сигнал, який подається на вхідний інтерфейс (канал Ref, рис.1) і сигнал, що формується КГ, синхронізуються за рахунок керування його

частотою. Керуюча дія формується на основі різниці фаз (похибка ФАПЧ), що визначається фазовим дискримінатором (ФД), за рахунок каналу зворотного зв'язку (керування за відхиленням). На тис.1 представлена практична реалізація ФД на базі адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД) [12]. При такій побудові системи ФАПЧ сутність керування КГ полягає у точному автопідстроюванні фази сигналів, що поступають на вимірювальні входи АЦФД де порівнюються і перетворюються в кодову комбінацію придатну для цифрової обробки мікроконтролером. КГ керується напругою, яка формується цифро-аналоговим перетворювачем на основі кодової комбінації прийнятої від мікроконтролера. В цьому випадку КГ можна представити у вигляді інтегратора, а математичну модель замкнутої системи автоматичного керування запишемо у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \frac{1}{K(p)} = \Omega_{\Pi} \pm S_B u_{\text{ФД}}(t), \\ u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}} F[\varphi(t, nT_{\varphi}), \sigma] \\ F[\varphi(t, nT_{\varphi}), \sigma] = F[\varphi(t) + nT_{\varphi}, \sigma], \forall n = -\infty, +\infty; \\ -1 \leq F[\varphi(t) + nT_{\varphi}] \leq 1, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\varphi(t) = \varphi_{\Pi}(t) - \varphi_{\text{КГ}}(t)$  – фазова похибка системи ФАПЧ КГ;  $\varphi_{\Pi}(t)$  і  $\varphi_{\text{КГ}}(t)$  – відповідно фаза провідного генератора (ПГ) і КГ;  $K(p)$  – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот (ФНЧ);  $\Omega_{\Pi}$  – початкове розлаштування КГ відносно ПГ;  $S_B$  – крутизна характеристики виконавчого елементу;  $u_{\text{ФД}}(t)$  – періодична керуюча дія;  $F[\varphi(t, nT_{\varphi}), \sigma]$  – нормована характеристика АЦФД;  $\sigma$  – сигнал каналу керування (третього входу АЦФД), що забезпечує можливість керування формою характеристики ФД на тривалість оптимального перехідного процесу;  $d$  – оператор диференціювання;  $U_{\text{ФД}}, T_{\varphi}$  – відповідно амплітуда керуючої дії та період періодичної дискримінаційної характеристики АЦФД;  $t$  – незалежна змінна (час).

Специфікою моделі виду (1) є врахування періодичності керуючої дії в

функції фазової координати системи, яка формується ФД. Новизною результатів даної роботи є дослідження оптимальних за швидкодією систем ФАПЧ КГ, які враховують керуючі дії з періодичностями, що обумовлені періодичністю дискримінаційної характеристики АЦФД.

Варто також зазначити, що особливістю моделі виду (1) є наявність трьох параметрів управління  $\varphi(t)$ ,  $T_\varphi$  і  $\sigma$ . Для двох параметрів управління  $\varphi(t)$ ,  $T_\varphi$  маємо наступну повну групу подій:

- 1)  $\varphi(t) = \text{var}$ ,  $T_\varphi = \text{var}$ ;
- 2)  $\varphi(t) = \text{var}$ ,  $T_\varphi = \text{const}$ ; наприклад,  $T_\varphi = 2\pi$ ;
- 3)  $\varphi(t) = \text{const}$ ,  $T_\varphi = \text{var}$ ;
- 4)  $\varphi(t) = \text{const}$ ,  $T_\varphi = \text{const}$ .

Будемо розглядати перші два варіанти, зважаючи на те, що останні два варіанти мають протиріччя самої фізичної суті процесів керування, які реалізуються в системах ФАПЧ, а тому в подальшому не досліджуються.

Згідно публікації [12] для системи ФАПЧ з нескінченною смугою пропускання ФНЧ, при умові виконання обмеження  $U_{\text{ФДмін}} \leq u_{\text{ФД}}(t) \leq U_{\text{ФДмакс}}$ , маємо наступну форму оптимального за швидкодією алгоритму керування:

$$u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}} \cdot \text{sign}[\Psi(t)] = U_{\text{ФД}} \cdot \text{sign} \Psi_0 = \pm U_{\text{ФД}}, \quad (2)$$

де -  $\Psi_0$  – невідома початкова умова допоміжної змінної  $\Psi(t)$ .

Сформуємо, згідно отриманого в аналітичному виді оптимального за швидкодією закону керування в системі ФАПЧ вимоги до її елементів з метою практичної реалізації. А саме, по перше, сигнал на виході ФД за тривалість часу відпрацювання фазової (частотної) похибки в системі ФАПЧ повинен мати максимальне  $u = +U_{\text{ФД}}$ , або мінімальне  $u = -U_{\text{ФД}}$  значення, в залежності від початкового стану. Згідно з теоремою про  $n$ -інтервалів оптимального за швидкодією руху для системи без ФНЧ, тобто першого порядку, маємо один інтервал руху. Наслідком є те, що нормована характеристика ФД  $F[\varphi(t, nT_\varphi), \sigma], \forall n = -\infty, +\infty$  повинна бути, за інтервал оптимального руху (в

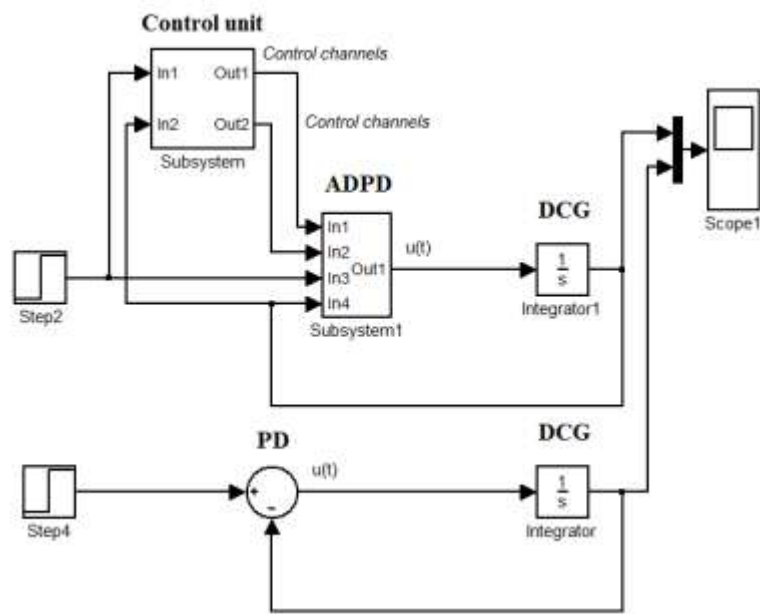
динаміці), неперіодичною функцією часу, а приймати постійне значення. яке дорівнює максимальній амплітуді  $u=+ U_{\Phi Д}$  або мінімальній  $u=- U_{\Phi Д}$ , в залежності від початкового стану. В статисти дискримінаційна характеристика АЦФД  $F[\varphi(t, nT_{\varphi}), \sigma] \forall n = -\infty, +\infty$  є періодичною по фазовій координаті, з періодом  $T_{\varphi}$ . По-друге, формування заданого виду характеристик ФД, оптимальних за швидкодією систем ФАПЧ, по суті її адаптації, повинно здійснюватися каналом керування (третім входом), наявність якого передбачена у обраному з можливих варіантів реалізації, а саме АЦФД [12] для формування оптимальної керуючої дії. На вхід каналу керування надходить сигнал оптимального переключення  $\sigma$ , що забезпечує керування формою характеристики ФД на тривалість перехідного процесу в залежності від величини і знаку фазової (частотної) похибки системи ФАПЧ оптимальної за швидкодією. Канал керування АЦФД забезпечує за  $T_{opt}$  найшвидше і точне попадання відображаючої точки системи в положення стійкої рівноваги для випадків, як при  $T_{\varphi}=var$ , так і при  $T_{\varphi}=const$ . Таким чином, використання АЦФД в системі ФАПЧ забезпечує керування формою характеристики ФД на тривалість перехідного процесу в залежності від величини і знаку фазової (частотної) похибки системи. В свою чергу, канал керування АЦФД забезпечує найшвидше і точне попадання відображаючої точки системи ФАПЧ в положення стійкої рівноваги і, як наслідок, в системі реалізується оптимальне за швидкодією керування.

Для проведення дослідження оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ КГ виконаємо імітаційне моделювання, використовуючи математичну модель, що записана у вигляді системи рівнянь (1), з врахуванням значення коефіцієнта передачі фільтра нижніх частот з нескінченим значенням смуги пропускання  $K(p)=1$ . В якості прикладу на рис.2 представлена імітаційна модель системи ФАПЧ КГ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ. Модель розроблена з використанням програми Simulink пакету MATLAB. На рис.2 КГ представлено у



виді інтегратора з надписом DCG, фазовий дискримінатор представлено з надписом DCG, адаптивний цифровий фазовий дискримінатор – ADPD, мікроконтролер – Control unit.

На рис.3 наведені осцилограми, які отримані в результаті імітаційного моделювання оптимальної за швидкодією (рис.2, схема, що розташована вище) та не оптимальної, назвемо її традиційною, систем ФАПЧ КГ (рис.2, нижня схема). З рис.3 очевидно, що в оптимальній за швидкодією системі тривалість перехідного процесу є мінімальною.



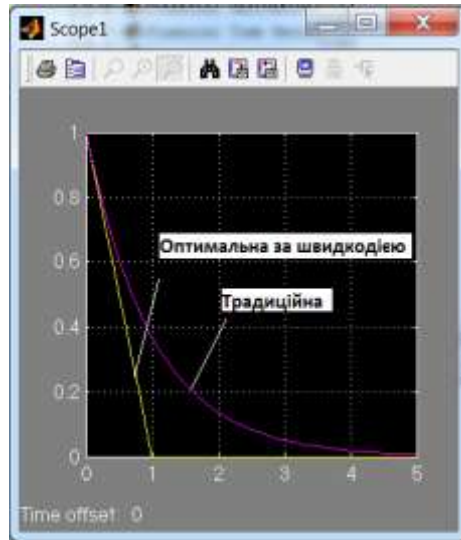
**Рис. 2. Імітаційна модель системи ФАПЧ КГ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ**

Рівняння (1) для системи ФАПЧ КГ з використанням аперіодичного ФНЧ, що має передатну функцію типу

$$K(p) = \frac{1}{Tp + 1}, \quad (3)$$

де  $T$  – постійна часу ФНЧ;  $p$  – оператор Лапласа, буде мати вид:

$$\begin{cases} T \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Omega_{\Pi} \pm S_B u_{\text{ФД}}(t); \\ u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}} F[\varphi(t, nT_{\varphi}), \sigma]; \\ F[\varphi(t, nT_{\varphi}), \sigma] = F[\varphi(t) + nT_{\varphi}, \sigma], \forall n = -\infty, +\infty; \\ -1 \leq F[\varphi(t) + nT_{\varphi}] \leq 1. \end{cases} \quad (4)$$



**Рис. 3. Осцилограми сигналів на виходах системи ФАПЧ КГ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ**

Аналогічно до розглянутої вище системи ФАПЧ КГ, що має ФНЧ з нескінченною смугою пропускання, будемо враховувати обмеження зміни величини керуючої дії виду  $U_{\text{ФДмін}} \leq u_{\text{ФД}}(t) \leq U_{\text{ФДмакс}}$ . Застосуємо принцип максимуму академіка Л.С. Понтрягіна після заміни змінних в рівнянні (4), диференціювання та введення допоміжних змінних. Максимізуючи функцію Гамільтона по керуючій дії з урахуванням обмежень на величину цієї дії і двох останніх рівнянь системи (4), отримано [2] оптимальний алгоритм керування при  $\Omega_{\Pi} = \text{const}$ ,  $S_B = \text{const}$ ,  $T = \text{const}$ :

$$u(t) = \max u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}} \text{sign} F[\varphi(t, nT_{\varphi})] + U_{\text{екстр}} \text{sign}(e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20}), \forall n = -\infty, +\infty, \quad (5)$$

де  $U_{\text{екстр}}$  дорівнює граничним значенням  $U_{\text{ФДмакс}}$  або  $U_{\text{ФДмін}}$ ;  $\lambda_1, \lambda_2$  – корні характеристичного полінома;  $\Psi_{20}$  – початкові умови допоміжної змінної  $\Psi_2$ .

Проведення подальших досліджень оптимальної за швидкістю системи ФАПЧ з аперіодичним ФНЧ в кільці регулювання, встановленим перед КГ, може також виконуватись з запропонованим АЦФД та використанням програми Simulink пакету MATLAB. При цьому варто зазначити, що суттєво, в порівнянні з безфільтровою системою ФАПЧ, змінюються обчислювальні функції мікроконтролера (рис.2, Control unit), які відповідно обумовлені зміною оптимального алгоритму керування згідно рівняння (5).

*Розроблення і дослідження лабораторного макету системи автоматизованого контролю синхросигналів з оптимальним за швидкістю фазовим автопідстроюванням частоти КГ.* Розроблення лабораторного макету, для експериментального дослідження системи автоматизованого контролю синхросигналів, має за ціль виготовлення програмно-апаратного засобу у вигляді блоку первинного перетворювача (БПП), що отримав назву TIMETER, та програмного забезпечення P4000winXP для відображення на екрані персонального комп'ютера результатів виконаних вимірів відхилення часового інтервалу (ВЧІ) контрольованих синхросигналів у вигляді двох динамічних графіків ВЧІ в реальному часі (планується збільшення до чотирьох одночасно контрольованих синхросигналів). Програмне забезпечення P4000winXP дозволяє відобразити результати вимірів у вигляді даних з штампами часу та відповідно двох графіків ВЧІ контрольованих синхросигналів. Розроблене програмне забезпечення дає можливість оперативного перегляду, запису на запам'ятовуючі пристрої і здійснення обробки технічним персоналом результатів вимірів.

БПП TIMETER (рис.1) забезпечує проведення одночасного контролю синхросигналів за рахунок вимірювань ВЧІ сигналів підключених: на входи Start та Stop автономної секції асинхронного моніторингу (АСАМ D11); на входи Start та Stop автономної секції асинхронного моніторингу (АСАМ D12); на входи ФД ADTD (Адаптивного Цифрового Фазового Дискримінатора) секції синхронного моніторингу (ССМ). Сигнал з інтерфейсу Vx.REF (рис.1), у випадку необхідності

його додаткової обробки (фільтрації, використанню режиму "holdover" тобто «запам'ятовування» значення частоти і фази), може бути програмно комутований на КГ, що включений в кільце системи ФАПЧ.

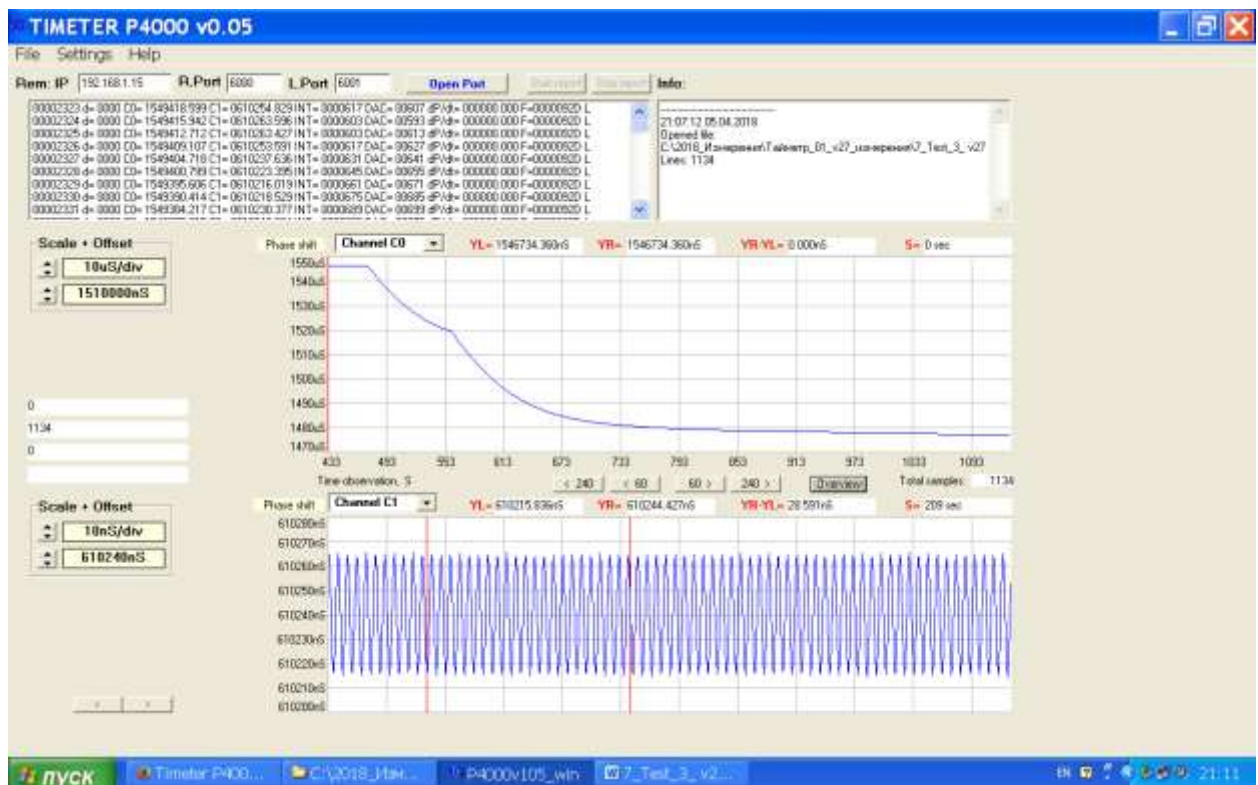
Для практичної реалізації оптимального за швидкодією закону керування запропоновано використання адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД), який захищено патентом України на винахід [12]. Вказане рішення забезпечує адаптивне кероване формування кодової комбінації про величину кута зсуву фази двох взаємно незалежних періодичних імпульсних послідовностей та підвищення достовірності представлення результатів вимірювань у цифровому виді.

Виконано ряд досліджень лабораторного макету БПП TIMETER. Отримані експериментальні дані вимірювань характеристик лабораторного макету підтверджують результати теоретичних досліджень.

**Результати досліджень та їх обговорення.** На основі отриманих теоретичних результатів розроблено і виконано дослідження лабораторного макету БПП TIMETER системи автоматизованого контролю синхросигналів та програмного забезпечення. Блок первинного перетворювача TIMETER забезпечує в автоматизованому режимі моніторинг періодичних сигналів шляхом виконання одночасних багатоканальних вимірювань ВЧІ синхросигналів з номінальними значеннями частот 2,048 МГц; 5МГц; 10МГц. Пристроєм TIMETER автоматично проводяться вимірювання ВЧІ сигналів на інтервалах часу  $\tau = 200$  мс з дозволеними квантовими значеннями 0,2 нс, виконується їх цифрова обробка на інтервалі  $T=1$ с і формуються дані в цифровому виді. Результати виконаних вимірів ВЧІ декількох пар синхросигналів періодично (з періодом одна секунда) передаються з використанням технології Ethernet на комп'ютер. Передбачена можливість підключення комп'ютера для сервісного обслуговування пристрою TIMETER через послідовний інтерфейс RS-232 (Local).

Персональний комп'ютер оброблює отримані данні за допомогою розробленого у середовищі Microsoft Visual C++ програмного забезпечення P4000winXP. Для наочності, на рис.4 наведено приклад графіків зміни ВЧІ контрольованих синхросигналів на інтервалі часу від 443с до 1153 с.

Розроблені засоби автоматизованого поліканального контролю синхросигналів забезпечують унікальну можливість одночасного поліканального контролю сигналів (відносно еталону) в порівнянні, наприклад, з одноканальним вимірювачем параметрів синхронізації PJS2000 виробництва фірми PLLB (Італія). Система забезпечує прямі, незалежні та достовірні результати контролю сигналів синхронізації з централізованим управлінням та накопиченням даних, що дозволяє не тільки своєчасно знаходити і локалізувати проблеми в формуванні синхросигналів, а також, при використанні статистичних методів обробки інформації, прогнозувати їх якість та стабільність.



**Рис. 4. Графіки ВЧІ контрольованих синхросигналів**

**Висновки і перспективи.** Проведено аналіз наукових публікацій та

встановлено, що актуальними для підвищення якості синхросигналів є задачі оптимізації пристроїв вимірювання їх параметрів і систем формування опорних сигналів.

Розроблена структурна схема блоку первинного перетворювача системи автоматизованого контролю синхросигналів та на основі проведеної оптимізації за швидкодією системи ФАПЧ КГ виконано імітаційне моделювання, що підтвердило отримані теоретичні результати. Реалізація оптимального закону керування з використанням запропонованого адаптивного цифрового фазового дискримінатора в системі ФАПЧ КГ створить можливість підвищення якісних показників опорного сигналу і, як наслідок, забезпечить підвищення точності і достовірності системи автоматизованого контролю синхросигналів.

Розроблено і виконано дослідження лабораторного макету БПП TIMETER з оптимальною за швидкодією системою ФАПЧ КГ та програмного забезпечення P4000winXP. Використання БПП TIMETER забезпечує в автоматичному режимі високоякісний контроль синхросигналів шляхом виконання одночасних багатоканальних вимірювань відхилення часового інтервалу від еталону (опорного сигналу). Система забезпечує прямі, незалежні та достовірні результати контролю сигналів синхронізації з централізованим управлінням та накопиченням даних, що дозволяє не тільки своєчасно знаходити і локалізувати проблеми в формуванні синхросигналів, а також, при використанні статистичних методів обробки інформації, прогнозувати їх якість та стабільність.

Передбачається можливість використання розроблених засобів для моніторингу змін часових затримок передачі синхросигналів, які можуть бути викликані різким підвищенням завантаження IP-мереж в результаті кібератак.

Потенційними користувачами пристрою є центри метрології Збройних Сил України, центральні та обласні метрологічні установи, цифрові підстанції інтегрованих систем електропостачання Smart-технологій, оператори телекомунікаційних систем, цифрового телебачення, стільникового зв'язку,

провайдери комп'ютерних мереж та споживачі синхросигналів інших галузей економіки.

### **Список літератури**

1. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи: Пер с англ. / С. Брени. – М.: Мир, 2003. – 456с.
2. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с.
3. Коваль В.В. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж: монографія / В. В. Коваль, Д. О. Кальян, О. В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с.
4. Konovalov, G., Kostik, B., Koval, V., Shkliarevskiy, I. "Timing information's 24×7 monitoring as an important factor of network synchronization quality support", 2013 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS-2013), Digital Object Identifier: 10.1109/ISPCS.2013.6644769. 22-27 вересня, Лемго, Германия. 2013. - С.89-94.
5. Koval V.V., Kalian D.O., Tepluk V.M., Shkliarevskii I.I., Khudyntsev M.M. Multichannel Clock Signal Monitoring System for Infocommunication Networks // Proc. International Conf. "Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2016). – Lviv-Slavske, Ukraine, 23-26 February, 2016. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2016. pp.618-620.
6. Ingram D.M., et al. Performance Analysis of PTP Components for IEC 61850 Process Bus Applications, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol.62, No. 4, April 2013, pp.710–719.
7. Baumgartner B., Riesch C., Rudigier M. IEEE 1588/PTP: The Future of Time Synchronization in the Electric Power Industry, PAC World Conference 2012, Budapest, Hungary, 2012.
8. Jackie Peer, Eric Sagen, Shankar Achanta, and Veselin Skendzic. The Future of Time: Evolving Requirements for Precise Time Synchronization in the Electric Power Industry. Presented at the 13th Annual Western Power Delivery Automation Conference Spokane, Washington, March 29–31, 2011.
9. Величко О.Н.. Вторичный эталон единиц времени и частоты как источник сигналов синхронизации и времени / О. Н. Величко, М. В. Головня // Электросвязь. – 2013. – № 2. – С. 22–25.
10. Shkliarevskiy I., «Precision Time Protocol in different applications: profile comparative analysis», T-Comm, v.8, #11, 2014, pp.116-120.
11. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) H 03 D 13/00, H 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473

Україна, МПК (2016.01) H 03 D 13/00, H 03 D 3/04 (2006.1) / Коваль В.В., Кальян Д.О., Коваль В.В. (Україна) - № а 2015 11981, Заявл. 03.12.2015, Опубл. Відомості про заявку 10.05.2016, Бюл. № 9. Опубл. Бюл. №2, 25.01.2017.

12. Kalian D.O. Precise time provider with speed optimal phase-locked loop for digital substations of smart grid systems // 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018: Lviv-Slavske; Ukraine; 20 February 2018 до 24 February 2018: Proceedings Volume 2018-April, 10 April 2018, Pages 1199-1204.

### **References**

1. Breny, S. (2013). Synkhronyzatsiya tsyfrovikh setei sviazy [Synchronization of digital communication networks]. Moskow: Myr, 456.

2. Koval, V.V., Kalian, D.O. (2016). Prystroi synkhronizatsii infokomunikatsiinykh merezh z periodychnoiu avtopidstroikoju: monohrafiia [Devices of synchronization of infocommunication networks with periodic self-repair: a monograph]. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 412.

3. Koval, V.V., Kalian, D.O., Samkov, O.V. (2016). Avtomatyzovana systema peredachi synkhrosyhnaliv z vykorystanniam IR-merezh: monohrafiia [Automated system of transmission of synchronous signals using IP-networks: monograph ]. Kyiv: NUBiP Ukrainy, 182.

4. Konovalov, G., Kostik, B., Koval, V., Shkliarevskiy, I. (2013). Timing information's 24×7 monitoring as an important factor of network synchronization quality support", 2013 International IEEE Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement Control and Communication (ISPCS-2013), Digital Object Identifier: 10.1109/ISPCS.2013.6644769, 89-94.

5. Koval, V.V., Kalian, D.O., Tepluk, V.M., Shkliarevskii, I.I., Khudyntsev, M.M. (2016). Multichannel Clock Signal Monitoring System for Infocommunication Networks Proc. International Conf. "Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science" (TCSET'2016). Lviv-Slavske, Ukraine, 23-26 February, 2016., 618-620.

6. Ingram, D.M., et al. (2013). Performance Analysis of PTP Components for IEC 61850 Process Bus Applications, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 62 (4), 710–719.

7. Baumgartner, B., Riesch, C., Rudigier, M. (2012). IEEE 1588/PTP: The Future of Time Synchronization in the Electric Power Industry, PAC World Conference 2012, Budapest, Hungary, 2012.

8. Jackie Peer, Eric Sagen, Shankar Achanta, and Veselin Skendzic (2011). The Future of Time: Evolving Requirements for Precise Time Synchronization in the Electric Power Industry. Presented at the 13th Annual Western Power Delivery Automation Conference Spokane, Washington, March 29–31, 2011.

9. Velychko, O.N., Holovnia, M.V. (2013). Vtorychniy etalon edynyts vremeny y chastoty kak istochnyk syhnalov synkhronyzatsiy i vremeny [Secondary standard of



time and frequency units as a source of synchronization and time signals]. Elektrosviaz, 2, 22–25.

10. Shkliarevskyi, I. (2014). Precision Time Protocol in different applications: profile comparative analysis. T-Comm, 8 (11), 116-120.

11. Patent na vynakhid №113473 Ukraina, MPK (2016.01) N 03 D 13/00, N 03 D 3/04 (2006.1). Adaptivnyi tsyfrovyy fazovyy dyskryminator. Pat. №113473 Ukraina, MPK (2016.01) N 03 D 13/00, N 03 D 3/04 (2006.1) / Koval, V.V., Kalian, D.O. (Ukraina) - № a 2015 11981, Zaiavl. 03.12.2015, Opubl. Vidomosti pro zaiavku 10.05.2016, Biul. № 9. Opubl. Biul. №2, 25.01.2017.

12. Kalian, D.O. (2018). Precise time provider with speed optimal phase-locked loop for digital substations of smart grid systems // 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2018: Lviv-Slavske; Ukraine; 20 - 24 February 2018: Proceedings Volume 2018-April, 1199-1204.

## **ОПТИМИЗАЦИЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ АУТОПОДСТРОЙКИ ЧАСТОТЫ КВАРЦЕВОГО ГЕНЕРАТОРА СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ СИНХРОСИГНАЛОВ**

***Д.А. Кальян, В.В. Коваль, Ю.А. Максименко, А.В. Самков, В.Г. Дубович-  
Костецкий***

**Аннотация.** *Актуальным в сегодняшних условиях является разработка, исследование и оптимизация аппаратно-программного обеспечения для создания эффективной системы автоматизированного контроля синхросигналов, которые используются в высокотехнологичных системах различных отраслей экономики. Целью работы является исследование современных решений для повышения качества непрерывного контроля синхросигналов по параметру отклонения временного интервала (ОВИ), относительно опорного сигнала, за счет оптимизации процесса фазовой автоподстройки частоты кварцевого генератора, который является составной частью блока первичного преобразователя системы автоматизированного контроля синхросигналов. Для обеспечения, в автоматическом режиме, непрерывного контроля ОВИ синхросигнала разработан блок первичного преобразователя БПП TIMETER с использованием оптимальной по быстродействию системы ФАПЧ и адаптивного цифрового фазового дискриминатора (АЦФД). Выполнено имитационное моделирование системы с использованием программы Simulink пакета MATLAB, что подтвердило полученные теоретические положения. Использование АЦФД, который защищен патентом Украины на изобретение, обеспечивает оптимальное управление формой дискриминационной характеристики, минимальную продолжительность переходного процесса*

автоподстройки частоты кварцевого генератора, улучшает качественные показатели опорного сигнала системы автоматизированного контроля.

Использование БПП TIMETER обеспечивает в автоматическом режиме высококачественный контроль синхросигналов путем выполнения одновременных многоканальных измерений ОВИ относительно опорного сигнала (эталона). Система обеспечивает прямые, независимые и достоверные результаты контроля сигналов синхронизации с централизованным управлением и накоплением данных, позволяет не только своевременно находить и локализовать проблемы в формировании синхросигналов, а также, при использовании статистических методов обработки информации, прогнозировать их качество и стабильность.

**Ключевые слова:** синхронизация, автоподстройка, оптимизация, быстроедействие, отклонение временного интервала, адаптивный цифровой фазовый дискриминатор, автоматизированный контроль.

## **OPTIMIZING FOR SPEED AUTOMATIC FREQUENCY CONTROL OF QUARTZ CRYSTAL OSCILLATOR FOR SYNCHRONIZING SIGNAL CONTROL SYSTEMS**

***D.Kalian, V. Koval, Y. Maksimenko, A.. Samkov, V. Dubovich-Kostecki***

**Abstract.** Actual in today's conditions is the development, research and optimization of hardware and software to create an effective system for automated monitoring of clock signals, which are used in high-tech systems of various industries. The purpose of the work is to study modern solutions for improving the quality of continuous monitoring of clock signals by the parameter of time interval error (TIE), relative to the reference signal, by optimizing the process of phase-locked loop of a quartz oscillator, which is an integral part of the primary converter of the system for automatic monitoring of clock signals. To ensure, in automatic mode, a continuous monitoring of the TIE of the clock, a block of the TIMETER primary transfer unit was developed using an optimal PLL and an adaptive digital phase discriminator (ADPD). Simulation of the system using the Simulink program of the MATLAB package was carried out, which confirmed the theoretical positions obtained. The use of the ADPD, which is protected by the patent of Ukraine for the invention, ensures optimal control of the form of the discriminative characteristic, the minimum duration of the transient process of the auto-tuning of the frequency of the quartz generator, improves the quality parameters of the reference signal of the automated control system.

The use of the TIMETER in the automatic mode provides high-quality control of the clock signals by performing simultaneous multichannel measurements of the OBD with respect to the reference signal (reference). The system provides direct, independent and reliable results of monitoring synchronization signals with centralized control and accumulation of data, allows not only to find and localize

*problems in the timing of the timing in a timely manner, but also, using statistical methods of information processing, to predict their quality and stability.*

**Key words:** *synchronization, auto-tuning, optimization, speed optimization, time interval error, adaptive digital phase discriminator, automated control*