

**ПРИСТРІЙ БАГАТОКАНАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ СИНХРОСИГНАЛІВ  
SMART GRID ЕНЕРГОСИСТЕМ З ОПТИМАЛЬНИМ ЗА ШВИДКОДІЄЮ  
ФАЗОВИМ АВТОПІДСТРОЮВАННЯМ ЧАСТОТИ**

**О.В. Самков**<sup>1\*</sup>, докт.техн.наук, **В.В. Коваль**<sup>2\*\*</sup>, докт.техн.наук,  
**В.П. Лисенко**<sup>2\*\*\*</sup>, докт.техн.наук, **Д.О. Кальян**<sup>2\*\*\*\*</sup>, канд.техн.наук,  
**О.Б. Рибіна**<sup>1</sup>, канд.техн.наук, **О.Л. Осінський**<sup>1\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup> Інститут електродинаміки НАН України,  
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна.

<sup>2</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України,  
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, Україна.

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

*У роботі запропоновано багатоканальний пристрій моніторингу з оптимальною за швидкодією системою фазового автопідстроювання частоти, який за рахунок виконання одночасних вимірів декількох синхросигналів відносно опорного, обробки і передавання результатів вимірів IP-мережею у реальному часі підвищує надійність та достовірність формування сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем. Встановлено аналітичні залежності для визначення умов, за яких в оптимальній за швидкодією системі автопідстроювання частоти відсутній вплив на перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики фазового дискримінатора. Експериментальні дослідження підтвердили виконання норм європейського стандарту ETS 300 462-4 на часові параметри опорного сигналу, який формується оптимальною за швидкодією системою фазового автопідстроювання, а також продемонстрували ефективність запропонованої реалізації пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем. Бібл. 12, рис. 7.*

**Ключові слова:** SMART Grid енергосистема, моніторинг синхросигналів, автопідстроювання частоти.

**Вступ.** В сучасних умовах енергозабезпеченість та енергоефективність є одними із головних технічних показників, що характеризують конкурентоспроможність продукції, інноваційний розвиток економіки, безпеку держави. Глобальні реалії, потреба адаптувати українську економіку ринковим цінам на енергоносії призвели до необхідності вирішення проблем раціонального використання електричної енергії [1]. Окрім цього в електроенергетичній галузі не менш актуальними є проблеми підвищення енергоефективності інтелектуальних електричних мереж [2]. Спільне вирішення зазначених проблем за рахунок впровадження інтелектуальних засобів керування з використанням синхронізованих векторних вимірювань та застосування мультиагентних комплексів управління передбачає отримання синергетичного, тобто позитивного ефекту, який, згідно визначення Г. Хакенена, базується на узгодженості взаємодії елементів через утворення структури як єдиного цілого [3].

Енергоефективне функціонування інтегрованих електроенергетичних мереж потребує вирішення задач узгодженості взаємодії елементів, включно і часової [2, 4, 5]. Дані задачі безпосередньо пов'язані з якістю функціонування систем автоматизованого керування, які побудовано на базі SMART Grid технологій [2, 4-7]. Сучасні цифрові системи автоматизованого керування виконують свої функції з прив'язкою до часу за рахунок використання синхросигналів. У

---

© Самков О.В., Коваль В.В., Лисенко В.П., Кальян Д.О., Рибіна О.Б., Осінський О.Л., 2023  
ORCID ID: \* <https://orcid.org/0000-0003-2790-8564>; \*\* <https://orcid.org/0000-0003-0911-2538>;  
\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-5659-6806>; \*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0003-2016-2253>;  
\*\*\*\*\* <https://orcid.org/0000-0002-9921-699X>

такому разі від характеристик синхросигналів залежить часова узгодженість взаємодій в системах автоматики та їхніх складових, і, як наслідок, якість роботи SMART Grid енергосистем [2, 4-9].

В міжнародних стандартах IEEE C37.118.1-2011, IEEE C37.118.2-2011 визначена точність  $\pm 1$  мікросекунда для синхросигналів, які використовуються для проведення синхронізованих векторних вимірювань в електроенергетичних SMART Grid мережах з використанням синхрофазорів. Очевидно, що у разі виникнення часової неузгодженості будуть погіршені технічні характеристики як систем керування, так і, відповідно, електроенергетичних мереж, що керуються ними. Зазначена залежність впливає на енергозабезпеченість та енергоефективність, що обумовлює необхідність застосування не тільки сучасних пристроїв синхронізації часу, а і високоякісних засобів моніторингу параметрів синхросигналів, які вони формують [4, 5, 9-12]. Одноканальний моніторинг, який базується на часових вимірах вхідного синхросигналу відносно опорного, є не цілком об'єктивним, а тому одержані результати обмежено достовірні [5, 10, 11]. Крім цього, моніторинг тільки одного вхідного синхросигналу звужує можливість ефективного підвищення надійності частотно-часового забезпечення шляхом використання як резервних додаткових джерел синхросигналів. Натомість впровадження системи багатоканального моніторингу пристроїв синхронізації часу забезпечує можливість формування синхросигналів із заданою якістю, підвищеною надійністю і достовірністю [5, 11, 12].

Складовою системи моніторингу є пристрій багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу, який формує інформацію про результати одночасних вимірів декількох синхросигналів у реальному часі без участі людини, тобто в автоматичному режимі, та передає її, використовуючи засоби мереж телекомунікації [5, 11, 12]. Важливим є те, що процес вимірювань параметрів базується на порівнянні з еталонною одиницею часу, яка формується джерелом опорного сигналу з системою фазового автопідстроювання частоти [5, 11]. Необхідна точність та стабільність джерела опорного сигналу забезпечується за рахунок його синхронізації від провідного генератора зразкових коливань з використанням фазового автопідстроювання частоти. Сучасні дослідження засобів синхронізації [4, 5, 9, 11] направлені на підвищення їхніх якісних показників, в тому числі швидкодії пристроїв автопідстроювання. До прикладу, виконана в дисертаційній роботі [11] оптимізація за швидкістю системи автопідстроювання частоти покращила показники продуктивності контролю багатоменклатурного виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

**Метою** роботи є розробка пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем, оптимізація за швидкістю джерела опорного сигналу на основі системи фазового автопідстроювання частоти, їхнє аналітичне й експериментальне дослідження та апробація на діючих IP-мережах.

**1. Система багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем.** В дослідженнях закордонних і вітчизняних фахівців проблем часової синхронізації SMART Grid енергосистем використовуються опосередковані способи оцінки характеристик сигналів синхронізації часу та одноканальні пристрої для вимірювань часових (частотних) характеристик сигналів [2, 4, 7, 8, 10]. Результати створення та дослідження пристроїв багатоканального контролю підтвердили ефективність їхнього використання на мережах синхронізації операторів телекомунікацій, в процесах багатоменклатурного виробництва і технічної експлуатації пристроїв синхронізації цифрових сигналів [11, 12]. Пропонується задля підвищення надійності та достовірності формування сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем розроблення пристрою багатоканального моніторингу з оптимальною за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти. Пристрій, у порівнянні з розробленим дослідним зразком [5], забезпечить обробку і передавання IP-мережею у реальному часі результатів одночасних вимірів декількох синхросигналів відносно опорного сигналу, який формується оптимальною за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти з урахуванням кількості змін знаку керуючої дії на інтервалі керування згідно теореми А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів.

Аналіз сформульованих задач, які повинні виконуватися системою багатоканального моніторингу, підтверджує необхідність одночасного виконання вимірів часових параметрів декількох контрольованих сигналів синхронізації часу (ССЧ) SMART Grid енергосистем, а саме відхилення часового інтервалу контрольованих синхросигналів відносно опорного сигналу. Також повинна бути забезпечена перевірка відповідності встановленим технічним показникам цифрових даних вимірів контрольованих ССЧ, які передаються з використанням цифрової телекомунікації до інтелектуальних засобів керування SMART Grid енергосистем (рис. 1). В режимі реального часу оброблені

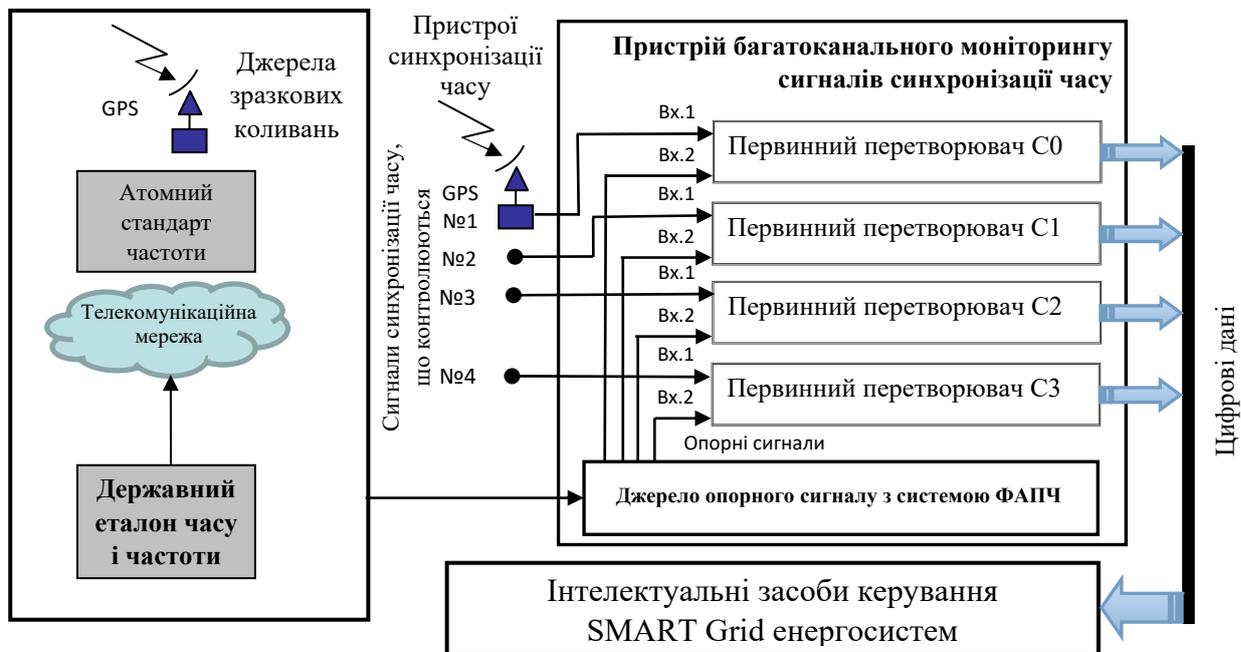


Рис. 1

комп'ютерними засобами цифрові дані вимірів повинні «надходити на екран дисплея у вигляді мнемонічних символів, сигнальної інформації та важливих кількісних показників з обов'язковим забезпеченням можливості інтерактивного режиму роботи оператора, за допомогою якого на основі даних контролю здійснюється прийняття рішення щодо якісних показників сигналів синхронізації часу та можливості їх використання для вирішення задач керування роботою електроенергетичної мережі SMART Grid» [11].

Пристрій багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу (ПБМССЧ), як складова системи моніторингу, яку представлено на рис. 1, повинен забезпечити одночасне виконання багатоканальних вимірів сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем, первинну обробку та передавання цифрових даних вимірювань з використання IP-технологій. ПБМССЧ є первинним датчиком системи, який «забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу (контрольованого показника якості). Первинний перетворювач перетворює вхідну фізичну величину – різницю фаз (часовий інтервал) – у пропорційний вихідний сигнал, представлений у вигляді цифрової кодової комбінації (цифрових даних)» [5].

З метою експериментальної перевірки і апробації способу багатоканального моніторингу виконано розроблення дослідного зразка ПБМССЧ SMART Grid енергосистем. Дослідний зразок пристрою має у своєму складі вхідні інтерфейси, комутатор, блоки контролю періодичності, первинні перетворювачі, джерело опорного сигналу з системою фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ), мікроконтролер, світлодіодну індикацію, інтерфейси RS-232 та Ethernet.

**2. Розроблення джерела опорного сигналу з оптимізованою за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти та адаптивним цифровим фазовим дискримінатором.** Аналіз вимог до реалізації ПБМССЧ та вибір засобів його практичної реалізації на етапі проектування як спільної задачі створення складної інформаційно-технічної системи, обумовили доцільність розроблення джерела опорного сигналу з використанням системи фазового автопідстроювання частоти [5, 11].

Система ФАПЧ забезпечує формування опорного цифрового сигналу з точним і стабільним значенням тривалості тактового інтервалу (періоду) за рахунок фазової синхронізації від провідного генератора (ПГ). Як ПГ можуть бути державні еталони часу і частоти, супутникові навігаційні системи, атомні та кварцові стандарти частоти. Важливим є те, що застосування системи ФАПЧ може забезпечити синхронізацію ПБМССЧ від провідного генератора, використовуючи за транспортне середовище кабельні, в тому числі IP-мережі, які є альтернативою закордонним супутниковим системам.

Розроблення джерела опорного сигналу з високими якісними показниками нерозривно пов'язано з удосконаленням технічних та конструкторських робіт, спрямованих на поліпшення (оптимізацію, адаптацію) параметрів, зростання його експлуатаційної надійності, поліпшення технологічності в експлуатації тощо. Виконання вимог щодо мінімальної тривалості режимів

перехідних процесів джерела опорного сигналу можливо забезпечити за рахунок реалізації в системі ФАПЧ оптимального за швидкістю входження в синхронізм [5, 11]. Виконаємо оптимізацію за швидкістю джерела опорного сигналу з системою ФАПЧ задля покращення якісних показників опорного сигналу і, як наслідок, підвищення точності та достовірності процесу багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем.

Джерело опорного сигналу ПБМССЧ побудовано з використанням системи ФАПЧ кварцового генератора, що керується напругою (ГКН), яка формується цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП). Цифрові сигнали керування, що поступають на входи ЦАП, формуються мікроконтролером згідно розроблених алгоритмів на основі даних фазового дискримінатора (ФД) про різницю фаз сигналів, які синхронізуються. Система ФАПЧ в процесі функціонування виконує автоматичне підстроювання частоти і фази керованого генератора під фазу синхронізуючого сигналу. Важливим є те, що використання цифрових технологій забезпечує можливість "запам'ятовування" даних ФД і ЦАП. У разі відсутності синхронізуючого сигналу розходження фаз (частот), в основному, буде обумовлено нестабільністю керованого генератора. Отже, принциповими складовими ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ є кварцовий генератор, що керується напругою від ЦАП, фазовий дискримінатор, мікроконтролер.

Проведення аналітичних досліджень системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ будемо виконувати з використанням схеми математичної моделі (рис. 2), яка, на відміну від відомих [5, 11], містить адаптивний цифровий ФД. Розроблення схеми, наведеної на рис. 2, виконано за умови ідеальності провідного генератора, тобто такого, у якого вихідний сигнал має абсолютно стабільне значення частоти і відсутній фазовий шум. Аналогічно зроблених в монографії [5] припущень, будемо вважати, що збурення, які діють на систему, незначні та їхній вплив відсутній, тобто  $f(t)=0$ . Враховуючи використання сучасних цифрових мікроелектронних компонентів, які є швидкодіючими та багаторозрядними, припустимо відсутність впливів ефектів квантування на процес автопідстроювання. Функцію фільтра нижніх частот (ФНЧ), яку виконує мікроконтролер, представимо у вигляді елемента з коефіцієнтом передачі  $K_{ФНЧ}(t)$ . В процесі досліджень важливим є врахування особливостей роботи системи ФАПЧ, які пов'язані з наявністю нелінійностей, обумовлених, наприклад, ефектами «насичення», періодичностями характеристики адаптивного цифрового ФД у функції різниці фаз [5, 10, 11].

З наведеної на рис. 2 схеми системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ та зроблених припущень можна записати алгебраїчне рівняння, яке описує роботу адаптивного цифрового ФД і вираз, що зв'язує різницю фаз  $\varphi(t)$  із значенням різниці частот  $\omega(t)$ , відповідно сигналів ГКН  $\omega_{ГКН}(t)$  і ПГ  $\omega_{ПГ}(t)$

$$\varphi(t) = \varphi_{ПГ}(t) - \varphi_{ГКН}(t) \text{ та } \dot{\varphi}(t) = \varphi_0 + \int (\omega_{ПГ}(t) - \omega_{ГКН}(t)) dt = \varphi_0 + \int \omega(t) dt,$$

де  $\varphi_0$  – різниця фаз при  $t=0$ ,  $\omega_{ПГ}(t)$  і  $\omega_{ГКН}(t)$  – відповідно частота ПГ і ГКН.

Проведення аналітичних досліджень системи ФАПЧ виконаємо за умови реалізації фільтра нижніх частот у вигляді інтегрувальної ланки. Рівняння динаміки інтегрувальної ланки та її передатна функція  $K_{\Phi}(p)$ , як відношення зображення по Лапласу вихідної до вхідної величини за нульових початкових умов, відповідно матимуть вигляд

$$u_{ФНЧ\text{вих}}(t) = K_{\Phi} \int_0^t u_{ФНЧ\text{вх}}(t) dt \text{ та } K_{\Phi}(p) = \frac{1}{T_{\Phi} p},$$

де  $u_{ФНЧ\text{вх}}(t)$  та  $u_{ФНЧ\text{вих}}(t)$  – відповідно напруга сигналу на вході та виході ФНЧ, реалізованого у вигляді інтегрувальної ланки;  $T_{\Phi}=1/k_{\Phi}$  – постійна інтегрування;  $p$  – комплексна змінна ( $p=\sigma+j\omega$ ).

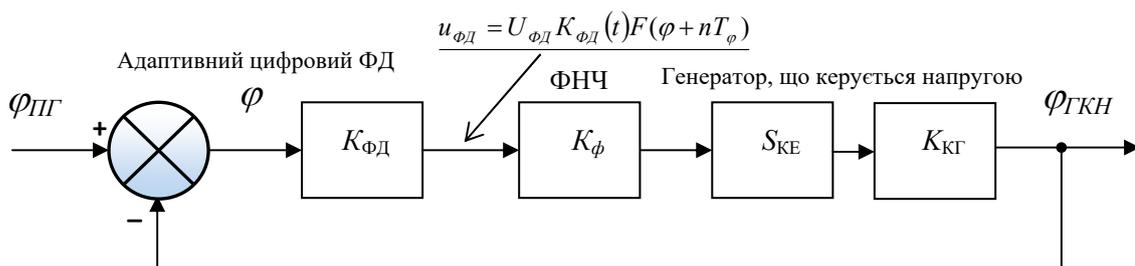


Рис. 2

Математичну модель замкнутої системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегрувальною ланкою для випадку, коли початкове розлаштування ГКН відносно ПГ є постійним та коефіцієнт передачі кварцового генератора КГ  $K_{КГ}=1$ , запишемо у вигляді системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = -\frac{S_{KE}}{T_\phi} K_{КГ}(t) u_{\phi Д}(t) = K_1 u_{\phi Д}(t); \\ \varphi(t) = \varphi_{ПГ}(t) - \varphi_{ГКН}(t); \\ u_{\phi Д}(t) = U_{\phi Д} K_{\phi Д}(t) F(\varphi(t) + nT_\phi); \\ U_{\phi Д\min} \leq U_{\phi Д} \leq U_{\phi Д\max}; -1 \leq F(\varphi(t) + nT_\phi) \leq 1, \end{cases} \quad (1)$$

де  $t$  – час (незалежна змінна);  $S_{KE}$  – крутизна характеристики керуючого елементу;  $u_{\phi Д}(t)$  – керуюча дія (сигнал на виході ФД);  $U_{\phi Д}$  – екстремальне значення сигналу керуючої дії на виході ФД;  $K_{\phi Д}(t)$  – коефіцієнт передачі адаптивного цифрового ФД;  $F(\varphi + nT_\phi)$  – нормована періодична характеристика адаптивного цифрового ФД з коефіцієнтом періоду  $n$ ;  $U_{\phi Д\max}$  і  $U_{\phi Д\min}$  – відповідно максимальне і мінімальне значення сигналу на виході адаптивного цифрового ФД;  $T_\phi$  – період періодичної за координатою  $\varphi$  дискримінаційної характеристики адаптивного цифрового ФД. Коефіцієнт  $K_1$  визначається рівнянням  $K_1 = -S_{KE}/T_\phi$ .

Проведемо оптимізацію за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегрувальною ланкою. В процесі оптимізації будемо враховувати обмеження на екстремальні значення та періодичність керуючої дії в функції фазової координати, що формується адаптивним цифровим ФД [5]. Керуюча дія – напруга на виході адаптивного цифрового ФД (рис. 2), є періодичною функцією різниці фаз  $\varphi$ , що вимірюється адаптивним цифровим ФД, вперше реалізованим в ПБМССЧ з використанням програмованої логічної інтегральної схеми CYCLONE IV. Вказана періодичність є наслідком того, що система ФАПЧ має нескінчене злічене число станів стійкої рівноваги, яке обумовлено періодичністю різниці фаз  $\varphi$ . Експериментально визначена періодичність адаптивного цифрового ФД формалізована і представлена виразом

$$\varphi = \varphi + nT_\phi, T_\phi = 2\pi, \forall n = -\infty, +\infty. \quad (2)$$

Обмеження на екстремальні значення напруги на виході адаптивного цифрового ФД типу "насичення", які за умови прийнятого значення коефіцієнта передачі ФД, рівного  $K_{\phi Д}(t)=1$ , можуть бути записані у вигляді нерівності

$$U_{\phi Д\min} \leq u_{\phi Д}(t) \leq U_{\phi Д\max}. \quad (3)$$

Сформулюємо постановку задачі оптимізації за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегрувальною ланкою в наступному виді. Необхідно, щоб система досягла стану стійкої рівноваги в момент часу  $t_k$  за допустимого значення періодичної керуючої дії  $u_{\phi Д}(t, \varphi)$  з урахуванням того, що у момент часу  $t=t_0$  вона знаходилася в стані, який визначається початковими умовами. Зазначений динамічний процес повинен виконуватися за умови мінімізації інтегрального критерію оптимальності, який представимо у вигляді функціонала

$$\Theta = \int_{t_0}^{t_k} 1 \cdot dt \Rightarrow \min.$$

З метою визначення оптимального за швидкодією керування в системі ФАПЧ джерела опорного сигналу скористаємося результатами проведених аналітичних досліджень з використанням принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна-Гамільтона, які наведено в монографії [5] з урахуванням обмежень (3) на екстремальні значення напруги на виході адаптивного цифрового ФД.

Згідно поставленої задачі необхідно знайти такий закон керування, а саме зміну значення  $u_{\phi Д}(t)$ , що забезпечує таку траєкторію руху, для якої значення функції Гамільтона  $H$  у всіх її точках будуть максимальні. Також потрібно, щоб функція Гамільтона  $H$  була максимальною за керуючою дією  $u_{\phi Д}(t)$ . Функція Гамільтона  $H$  і система рівнянь з допоміжними змінними  $\psi_1$  і  $\psi_2$  для системи рівнянь (1), відповідно, матимуть вигляд

$$H = \psi_1 \omega + \psi_2 K_1 u_{\phi Д}(t) - 1 \quad (4)$$

i

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \varphi}, \\ \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \omega} = \psi_1. \end{cases} \quad (5)$$

Інтегруючи (5), з урахуванням рівняння (4), отримуємо наступний вираз для допоміжних змінних  $\psi_1, \psi_2$  вектор-функції  $\Psi$  за любых початкових умов  $\psi_{10}$  і  $\psi_{20}$

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_{10} = const, \\ \psi_2 = \psi_{10}t + \psi_{20}. \end{cases} \quad (6)$$

Згідно з принципом максимуму акад. Л.С. Понтрягіна оптимальним за швидкодією буде таке керування, за якого функція Гамільтона  $H$  буде максимальною за керуючою дією з обов'язковим урахуванням умов нерівності (3), а саме обмежень типу "насичення". Виконання зазначених вимог з урахуванням результатів аналітичних досліджень [5] дає наступне рішення:

$$u_{\text{фд}}(t) = U_{\text{ФДекстр}} \cdot \text{sign}(\psi_{10}t + \psi_{20}), \quad (7)$$

де  $U_{\text{ФДекстр}}$  визначається граничними значеннями  $U_{\text{ФДмакс}}$  або  $U_{\text{ФДмін}}$ .

Отриманий вираз (7) є оптимальним за швидкодією законом керування в системі ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегровальною ланкою. Відповідно до (7) керуюча дія  $u_{\text{фд}}(t)$  повинна мати не більш, ніж одне перемикання. Це положення відповідає теоремі А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів, так як за будь-яких початкових умов  $\psi_{10}$  і  $\psi_{20}$  виразу, що стоїть в круглих дужках співвідношення (7), може змінити знак не більше одного разу [5].

Узагальнюючи отримані результати графоаналітичних досліджень [5] сформулюємо закон формування керуючої дії  $u_{\text{фд}}(t)$  у вигляді наступного рівняння:

$$u_{\text{фд}}(t) = U_{\text{ФДекстр}} \cdot \text{sign} \sigma(\varphi, \omega), \quad (8)$$

де  $\sigma(\varphi, \omega)$  – функція перемикання. Задля досягнення максимальної швидкодії в системі ФАПЧ з інтегровальною ланкою зазначена в рівнянні (8) функція перемикання  $\sigma(\varphi, \omega)$  має визначатися з урахуванням наступних умов:

$$\begin{cases} \sigma(\varphi, \omega) = \text{sign} \left( \frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign} \omega - \varphi \cdot K_1 \right), \text{ у разі } \left| \frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign} \omega - \varphi \cdot K_1 \right| > 0; \\ \sigma(\varphi, \omega) = 0, \text{ у разі } \frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign} \omega - \varphi K_1 = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Встановлений закон керування (8) з урахуванням умов (9), на відміну від результатів попередніх досліджень, враховує додаткове обмеження на формування керуючої дії  $u_{\text{фд}}(t)$ , яке експериментально визначено і представлено формулою (2). Зазначені обмеження обумовлюють необхідність продовження теоретичних досліджень з метою визначення їхнього впливу на функціонування системи автопідстроювання, а також синтезу структури оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з використанням оригінальних схемотехнічних рішень, сучасних апаратних засобів обчислювальної техніки та програмного забезпечення.

На першому етапі синтезу виконаємо імітаційні дослідження моделі системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегровальною ланкою, в якій реалізовано закон формування керуючої дії (8) з урахуванням умов (9). Для розроблення імітаційної моделі системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ будемо використовувати програми Simulink пакету MATLAB та модель, яку запропоновано в дисертаційній роботі [11]. В розробленій імітаційній моделі (рис. 3) модуль «Блок контролю» виконує обчислення виразу  $\xi(t) = (\omega^2/2) \text{sign} \omega$ , який стоїть після оператора  $\text{sign}$  в системі рівнянь (9). Для проведення часового аналізу сигналів використовується чотирьохпроменевий осцилограф «Score1», а проведення дослідження у просторі станів на фазовій площині здійснюється за допомогою графобудівника «XY Graph». Результати експериментальних досліджень сигналів в контрольних точках схеми для випадку, коли початкове значення фазової похибки  $\varphi_0=1$ , а початкове частотне розлаштування  $\omega_0=0$ , наведено на рис. 4.

На другому етапі синтезу оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ виконаємо графо-аналітичні дослідження, в процесі яких будемо враховувати обмеження на амплітуду керуючої дії  $u_{\text{фд}}(t)$  типу «насичення» (3) та обмеження (2), які пов'язані з залежністю керуючої дії від миттєвої різниці фаз  $\varphi(t)$ . Відповідно до результатів досліджень статична

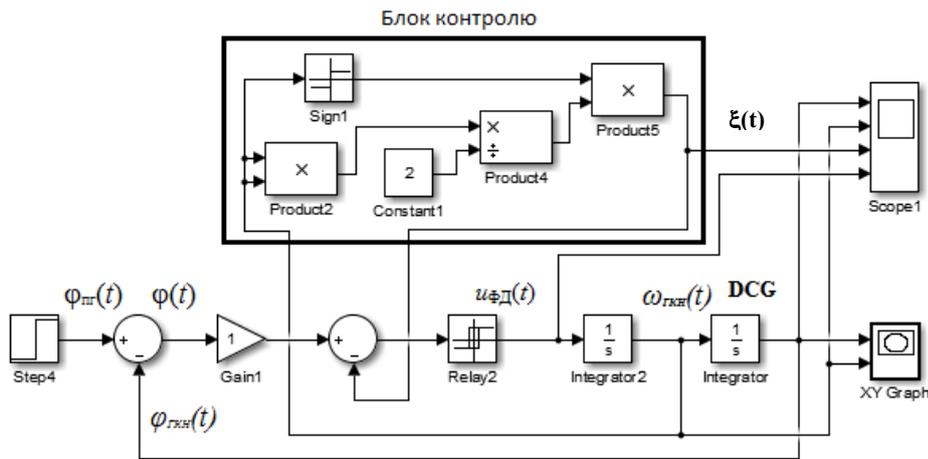


Рис. 3

частоти  $\omega(t)=d\varphi(t)/dt$ . Отже, зміна часового інтервалу  $T_i(t)$ , який має обернено-пропорційну залежність від миттєвої різниці частот  $F(t)=\omega(t)/2\pi$  і впливає на формування керуючої дії  $u_{\text{ФД}}(t)$ , призводить до необхідності розгляду автопідстроювання в системі ФАПЧ як квазіперіодичного процесу з динамічним періодом  $T_i(t)$ .

Виконаємо аналітичні дослідження системи ФАПЧ для визначення траєкторії руху

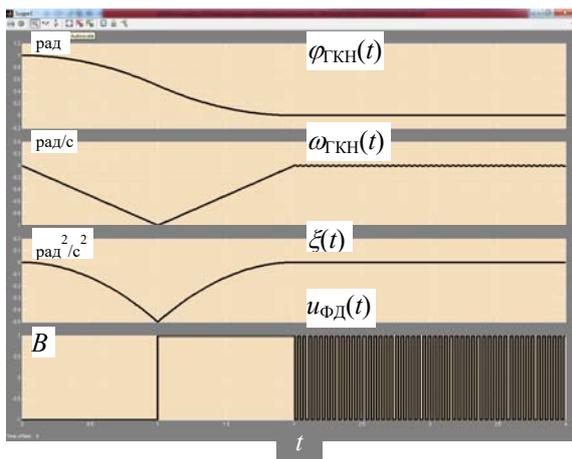


Рис. 4

відображаючої точки на координатній площині  $(\varphi, \omega)$  з використанням наступних відношень для граничних значень керуючої дії  $U_{\text{ФДмін}}$  та  $U_{\text{ФДмакс}}$ :

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = K_1 \frac{1}{\omega} U_{\text{ФДмін}} \quad \text{та} \quad \frac{d\omega}{d\varphi} = K_1 \frac{1}{\omega} U_{\text{ФДмакс}} \quad (10)$$

Після інтегрування рівнянь (10) для граничних значень  $U_{\text{ФДмін}}$  та  $U_{\text{ФДмакс}}$  отримаємо відповідно наступні відношення:

$$\frac{\omega^2}{2} = \varphi K_1 U_{\text{ФДмін}} + c \quad \text{та} \quad \frac{\omega^2}{2} = \varphi K_1 U_{\text{ФДмакс}} + c, \quad (11)$$

де  $c$  – постійна інтегрування, величину якої можна знайти, задавши координати точки, що знаходиться на координатній площині  $(\varphi, \omega)$ . Згідно теореми А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів зміна знаку керуючої дії на інтервалі оптимального керування відбувається не більше одного разу. Для виконання цієї умови потрібно, щоб до завершення опти-

мального перехідного процесу на нього не впливали обмеження, обумовлені періодичною за фазовою різницею  $\varphi(t)$  статичною характеристикою ФД. Такий вплив буде відсутнім за умови, коли тривалість всього оптимального перехідного процесу  $\Theta_{\text{опт}}$  буде меншою за часовий інтервал  $T_i(t)$ .  
З метою встановлення впливу часового інтервалу  $T_i(t)$  на перехідні процеси в оптимальній за швидкодією системі ФАПЧ з інтегрувальною ланкою виконано графо-аналітичні дослідження. Результати графічного дослідження оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ з використанням фазового портрету наведено на рис. 5. Припустимо, що відображаюча точка А на фазовій площині  $(\varphi, \omega)$  відповідає початковим значенням фазової похибки  $\varphi_0$  і частотного розлаштування  $\omega_0$ . У цьому разі фазова траєкторія мала би проходити через точки АБВГД і стійка рівновага відповідала величині фазової похибки  $\varphi_0=2\pi$  за умови відсутності впливу обмежень, які обумовлені періодичною за фазовою різницею  $\varphi(t)$  статичною характеристикою ФД. Натомість, відображаюча точка А має траєкторію, що проходить через точки АБЕО і стійка рівновага настає, коли величина фазової похибки  $\varphi_0=0$ . У цьому разі зміна знаку керуючої дії на інтервалі оптимального керування відбувається два рази (точка Б і точка Е, рис. 5), тобто більше одного разу, що не відповідає теоремі А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів.

характеристика адаптивного цифрового фазового дискримінатора ФД, який побудовано з використанням сучасної програмованої логічної інтегральної схеми CYCLONE IV, є періодичною з періодом  $T_\varphi$  за різницею фаз  $\varphi(t)$ .

В процесі автопідстроювання відбувається зміна миттєвої різниці фаз  $\varphi(t)$  і, відповідно, її похідної за часом – миттєвої різниці

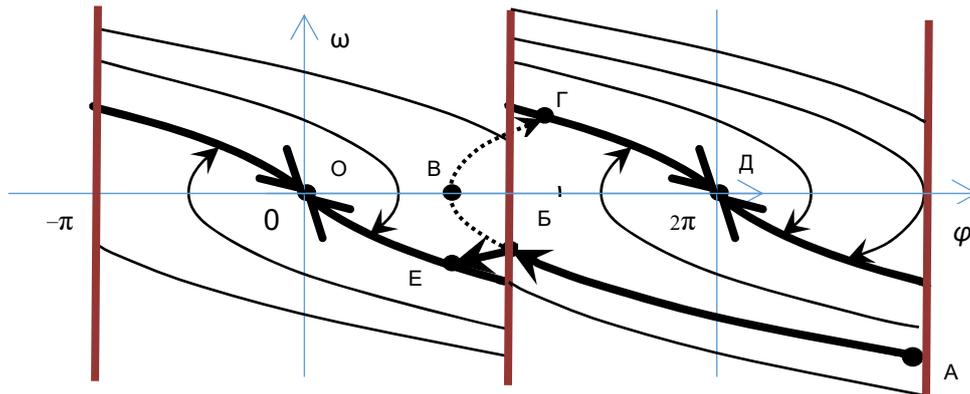


Рис. 5

Для аналітичного визначення умов, за яких в оптимальній за швидкодією системі ФАПЧ з інтегровальною ланкою відсутній вплив на перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики ФД, скористаємося формулами обчислення тривалості перехідного процесу  $\Theta_{\text{ОПТ}}$  [5]. З урахуванням введеного позначення  $\Omega_K = S_{KE} U_{\text{ФДекстр}}$  і значення миттєвої частоти  $\omega_1$  в кінці першого інтервалу оптимального руху відображаючої точки на координатній площині  $(\varphi, \omega)$  отримано рівняння для визначення тривалості перехідного процесу  $\Theta_{\text{ОПТ}}$  в оптимальній за швидкодією системі ФАПЧ з інтегровальною ланкою та адаптивним цифровим ФД

$$\Theta_{\text{опт}} = \left| -\frac{T_{\phi}}{\Omega_K} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_{\phi}}{\Omega_K} \omega_1 \right|. \quad (12)$$

Враховуючи те, що  $\omega(t) = d\varphi(t)/dt$ , можна записати умови, за яких буде відсутній вплив на оптимальний перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики адаптивного цифрового ФД

$$\left| -\frac{T_{\phi}}{\Omega_K} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_{\phi}}{\Omega_K} \omega_1 \right| < \frac{2\pi}{\omega(t)}. \quad (13)$$

За умови виконання нерівності (13) оптимальні за швидкодією перехідні процеси будуть закінчуватися не більше, ніж за два інтервали постійності керуючої дії (не більше, ніж одна зміна знаку) і виконуються умови, за яких має місце теорема А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів.

Отримані результати досліджень на основі теорії оптимального керування з використанням принципу максимуму Л.С. Понтрягіна використано під час розроблення структури і відповідних схемотехнічних рішень оптимальної за швидкодією системи ФАПЧ джерела опорного сигналу ПБМССЧ з інтегровальною ланкою. В розробленій на основі принципу максимуму системі реалізуються екстремальні керуючі дії, що максимізують функцію Гамільтона, а також умови, за яких має місце теорема А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів. Формування алгоритмів керування виконується за допомогою мікроконтролера, а використання адаптивного цифрового фазового дискримінатора, побудованого на базі програмованої логічної інтегральної схеми CYCLONE IV, дає можливість створення дворівневої ієрархічної системи автопідстроювання. Розроблене вперше джерело опорного сигналу ПБМССЧ (рис. 1) з синтезованою системою ФАПЧ, в якій протікання перехідних процесів здійснюється згідно встановленого закону керування (8) та з урахуванням умов нерівності (13), забезпечує оптимальне за швидкодією автопідстроювання частоти.

**4. Експериментальні дослідження пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем з оптимальним за швидкодією фазовим автопідстроюванням частоти.** З метою перевірки отриманих аналітичних, графічних та імітаційних результатів досліджень виконано розроблення експериментального зразка ПБМССЧ SMART Grid енергосистем з джерелом опорного сигналу, який реалізовано на основі оптимізованої за швидкодією системи ФАПЧ. В процесі експериментальних досліджень виконано виміри відхилення часових інтервалів ВЧІ синхросигналу джерела опорного сигналу ПБМССЧ з оптимальною за швидкодією системою ФАПЧ. Виміри виконано з використанням супутникової навігаційної системи GPS, стандарту частоти кварцового СЧК-103, цифрового генератора з програмованою фазовою

модуляцію, персонального комп'ютера та вимірювача часових інтервалів ВЧВ-2002. Результати вимірів залежності від часу ВЧІ (Time Interval Error) синхросигналу, який формується джерелом опорного сигналу ПБМССЧ з оптимальною за швидкодією системою ФАПЧ, наведено на рис. 6.

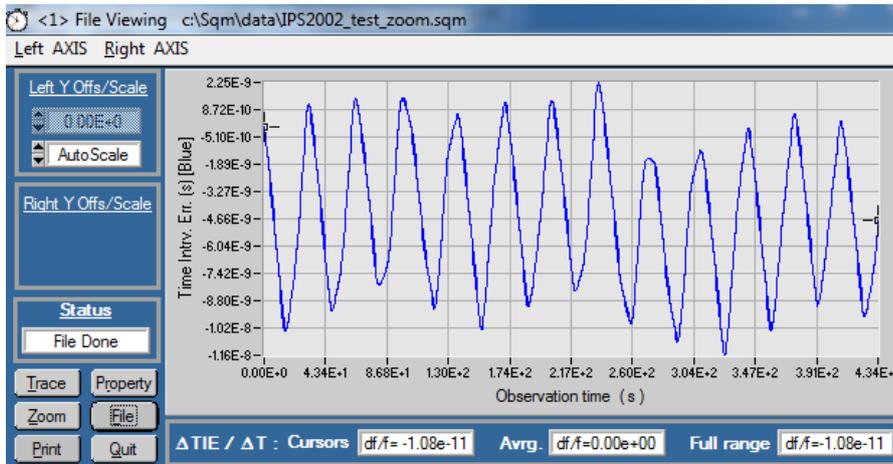


Рис. 6

З рисунка видно, що флуктуації фази синхросигналу, які обумовлені зоною нечутливості релейного елемента системи автопідстроювання частоти, знаходяться в межах від -11,6 нс до +2,25 нс. Значення максимального ВЧІ (MTIE) та девіації часового інтервалу (TDEV), які отримано в результаті статистичної обробки даних вимірів, в результаті порівняння з нормами європейського стандарту ETS 300 462-4 дають можливість зробити висновок про виконання

зазначених норм із значним запасом.

В процесі експериментальних досліджень виконано перевірку технічних характеристик ПБМССЧ щодо його використання для контролю показників якості двох синхросигналів SMART Grid енергосистем з різними номінальними значеннями частот у режимі реального часу відносно опорного сигналу, який синхронізується від супутникової навігаційної системи GPS. Разом з цим, проведено апробацію на діючих IP-мережах процесу одночасного моніторингу синхросигналів пристроєм ПБМССЧ з використанням програмного забезпечення P4000winXP, текстовий та графічний фрагмент даних вимірів яких представлено на рис. 7.

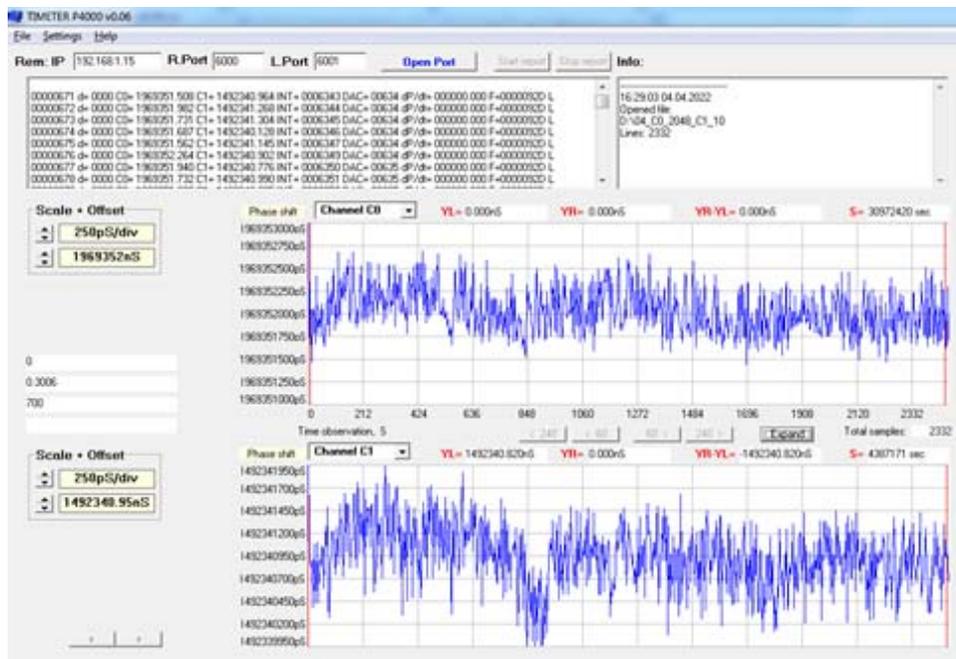


Рис. 7

Реалізована багатоканальність в ПБМССЧ розширює його функціональні можливості щодо оперативного вибору диспетчером синхросигналів, які можуть підключатися для проведення вимірювань, перетворення результатів вимірів у цифрові дані та їхнє передавання IP-мережами. Одночасне підключення до ПБМССЧ двох і більше контрольованих синхросигналів забезпечує

підвищення його продуктивності у два рази і більше у порівнянні з аналогічними одноканальними пристроями.

### Висновки

1. Запропоновано апаратну і програмну реалізацію системи багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем з фазовим автопідстроюванням частоти, яка забезпечує можливість формування синхросигналів із заданою якістю, підвищеною надійністю і достовірністю.

2. Проведено аналітичні дослідження та імітаційне моделювання з використанням програми Simulink пакету MATLAB оптимальної за швидкістю системи фазового автопідстроювання частоти пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем.

3. Отримано формули для визначення умов, за яких в оптимальній за швидкістю системі фазового автопідстроювання частоти з інтегрованою ланкою відсутній вплив на перехідний процес обмежень періодичної статичної характеристики фазового дискримінатора і виконуються умови, за яких має місце теорема А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів.

4. Синтезовано структуру оптимальної за швидкістю системи ФАПЧ джерела опорного сигналу пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу з урахуванням кількості змін знаку керуючої дії на інтервалі керування згідно теореми А.А. Фельдбаума про  $n$ -інтервалів.

5. Розроблено пристрій багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу SMART Grid енергосистем, проведено його експериментальні дослідження та апробацію на діючих IP-мережах.

6. Експериментальні дослідження на діючих IP-мережах розробленого пристрою підтвердили адекватність запропонованого способу реалізації багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу з оптимальною за швидкістю системою фазового автопідстроювання частоти та розрахунку параметрів перехідних процесів. Зокрема, експериментальним шляхом встановлено виконання пристроєм, який реалізовано на основі оптимальної за швидкістю системи фазового автопідстроювання, норм європейського стандарту ETS 300 462-4 за максимальним відхиленням (MTIE) та девіацією часових інтервалів (TDEV).

7. Використання пристрою багатоканального моніторингу сигналів синхронізації часу забезпечує підвищення надійності і достовірності формування синхросигналів SMART Grid енергосистем. Перспективним є використання розробленого пристрою на об'єктах високотехнологічних галузей економіки та безпеки країни.

*Роботу виконано за бюджетною темою «Науково-технічні засади відновлення та керованості електроенергетичної системи України в повоєнний період за синхронної роботи з енергооб'єднанням країн континентальної Європи (ENTSO-E)» (шифр «Феникс»), КПКБК 6541030.*

1. Кириленко О.В., Басок Б.І., Базеев Є.Т., Блінов І.В. Енергетика України та реалії глобального потепління. *Технічна електродинаміка*. 2020. № 3. С 52-61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052>
2. Базюк Т.М., Блінов І.В., Буткевич О.Ф., Гончаренко І.С., Денисюк С.П., Жуйков В.Я., Кириленко О.В., Лук'яненко Л.М., Миколаєць Д.А., Осипенко К.С., Павловський В.В., Рибіна О.Б., Стелюк А.О., Танкевич С.Є., Трач І.В. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2016. 400 с.
3. Dynamic of synergetic systems. Edited by H. Haken. Berlin: Springer, 1980. 271 p.
4. Time Synchronization in the Electric Power System. NASPI Technical Report. North American Synchronphasor Initiative. March 2017. URL: [https://www.naspi.org/sites/default/files/reference\\_documents/tstf\\_electric\\_power\\_system\\_report\\_pnnl\\_26331\\_march\\_2017\\_0.pdf](https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/tstf_electric_power_system_report_pnnl_26331_march_2017_0.pdf) (accessed at 05.05.2022).
5. Коваль В.В., Самков О.В., Блінов І.В., Ламеко О.Л., Трач І.В., Поліщук С.Й., Вакась В.І., Чопик В.В., Осінський О.Л. Автоматизований моніторинг сигналів синхронізації часу енергосистем. К.: Видавничий центр НУБіПУ, 2021. 380 с.
6. Кириленко О.В., Блінов І.В., Танкевич С.Є. Smart Grid та організація інформаційного обміну в електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2012. № 3. С. 47 – 48.
7. Allnutt J., Anand D., Arnold D., Goldstein A., Noseworthy R., Subramaniam R., Weiss M., Li-Baboud Y., Nguyen C., Martin A. Timing challenges in the smart grid. NIST Special Publication 1500-08: National Institute of Standards and Technology, 2017. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-08>
8. Aweya J., Al Sindi N. Role of time synchronization in power system automation and smart grids. IEEE

international conference on *industrial technology* (ICIT). Cape Town, South Africa, 25-28 February 2013. ID: 13484744. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505875>

9. Todescato M., Carli R., Schenato L., Barchi G. Smart Grid State Estimation with PMUs Time Synchronization Errors. *Energies*. 2020. Vol. 13. No 19. 5148. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13195148>

10. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи. М.: Мир, 2003. 456с.

11. Кальян Д.О. Автоматизация процесса контролю показателей качества устройств синхронизации цифровых сигналов багатомономенклатурного виробництва: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ. 2020. 284 с

12. Koval V.V., Osinskiy O.L., Lysenko V.P., Samkov O.V., Khudyntsev M.M. Infocommunication technologies and networks for multichannel monitoring of synchronization signals of SMART grid and microgrid electrical systems. IEEE international scientific-practical conference on *Problems of Infocommunications. Science and Technology* (PIC S&T). Kyiv, Ukraine, October 8-11, 2019. Pp. 153-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061443>

## MULTICHANNEL CLOCK SIGNAL MONITORING APPLIANCES FOR SMART GRID NETWORKS WITH SPEED-OPTIMAL PHASE-LOCKED LOOP

O.V. Samkov<sup>1</sup>, V.V. Koval<sup>2</sup>, V.P. Lysenko<sup>2</sup>, D.O. Kalian<sup>2</sup>, O.B. Rybina<sup>1</sup>, O.L. Osinskiy<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, 56, Peremohy ave., Kyiv, 03057, Ukraine.

<sup>2</sup> National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oborony str., Kyiv, 03041, Ukraine.

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

*The paper discusses a multichannel monitoring device with a speed-optimal phase-locked loop system, which, by performing simultaneous measurements of several clock signals against the reference one, processing and transmitting measurement results by an IP-network in real time, increases the accuracy and precision of providing time synchronization signals for SMART Grid energy system. Analytical expressions were established to determine the conditions under which in the optimal system of phase-locked loop has no influence on the transient process of limiting the periodic static characteristic of the phase discriminator. Experimental studies have confirmed meeting the norms of the European standard ETS 300 462-4 for the time parameters of the reference signal generated by the phase-locked loop system, which is optimal in terms of speed, and also demonstrated the effectiveness of the proposed implementation of the device for multi-channel monitoring of time synchronization signals for SMART Grid of power systems. References 12, figures 7.*

**Keywords:** SMART Grid systems, clock signal monitoring, phase-locked loop.

1. Kyrylenko O.V., Basok B.I., Baseyev Ye.T., Blinov I.V. Power industry of Ukraine and realities of the global warming. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2020. No 3. Pp. 52–61. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2020.03.052> (Ukr)

2. Bazyuk T.M., Blinov I.V., Butkevych O.F., Goncharenko I.S., Denysyuk S.P., Zhujkov V.Y., Kyrylenko O.V., Lukyanenko L.M., Mykolaets D.A., Osypenko K.S., Pavlovskiy V.V., Rybina O.B., Stelyuk A.O., Tankevych S.E., Trach I.V. Intelligent electrical networks: elements and modes. Kyiv: Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2016. 400 p. (Ukr).

3. Dynamic of synergetic systems. Edited by H. Haken. Berlin: Springer, 1980. 271 p.

4. Time Synchronization in the Electric Power System. NASPI Technical Report. North American Synchrophasor Initiative. March 2017. URL: [https://www.naspi.org/sites/default/files/reference\\_documents/tsf\\_electric\\_power\\_system\\_report\\_pnnl\\_26331\\_march\\_2017\\_0.pdf](https://www.naspi.org/sites/default/files/reference_documents/tsf_electric_power_system_report_pnnl_26331_march_2017_0.pdf) (accessed at 05.05.2022).

5. Koval V.V., Samkov O.V., Blinov I.V., Lameko O.L., Trach I.V., Polischuk S.J., Vakas V.I., Chopyk V.V., Osinskiy O.L. Automated monitoring of time-synchronization signals of power systems. Kyiv: Vydavnychiy tsentr Natsionalnoho universytetu bioresursiv ta pryrodokorystuvannya Ukrainy, 2021. 380 p. (Ukr)

6. Kyrylenko O.V., Blinov I.V., Tankevych S.E. Smart Grid and organization of information exchange in electric power systems. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2012. No 3. Pp. 47–48. (Ukr)

7. Allnutt J., Anand D., Arnold D., Goldstein A., Noseworthy R., Subramaniam R., Weiss M., Li-Baboud Y., Nguyen C., Martin A. Timing challenges in the smart grid. NIST Special Publication 1500-08: National Institute of Standards and Technology, 2017. 28 p. DOI: <https://doi.org/10.6028/NIST.SP.1500-08>

8. Aweya J., Al Sindi N. Role of time synchronization in power system automation and smart grids. IEEE international conference on *industrial technology* (ICIT). Cape Town, South Africa, 25-28 February 2013. ID:

13484744. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIT.2013.6505875>

9. Todescato M., Carli R., Schenato L., Barchi G. Smart Grid State Estimation with PMUs Time Synchronization Errors. *Energies*. 2020. Vol. 13. No 19. 5148. <https://doi.org/10.3390/en13195148>

10. Breni S. Synchronization of digital communication networks. Moskva: Mir, 2003. 456 p.

11. Kalian D.O. Automation of the process of monitoring quality parameters of digital signal synchronization devices of flexible manufacturing system: diss. for obtaining a scientific degree of the candidate of tech. sciences: 05.13.07. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. Kyiv. 2020. 284 p. (Ukr)

12. Koval V.V., Osinskiy O.L., Lysenko V.P., Samkov O.V., Khudyntsev M.M. Infocommunication technologies and networks for multichannel monitoring of synchronization signals of SMART grid and microgrid electrical systems. IEEE international scientific-practical conference on *Problems of Infocommunications. Science and Technology* (PIC S&T). Kyiv, Ukraine, October 8-11, 2019. Pp. 153-156. DOI: <https://doi.org/10.1109/PICST47496.2019.9061443>

Надійшла 17.05.2022

Остаточний варіант 05.08.2022