

ОПТИМАЛЬНЕ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ФАЗОВЕ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ СИНТЕЗАТОРА МІТОК ТОЧНОГО ЧАСУ ІНТЕГРОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ SMART-ТЕХНОЛОГІЙ

В. В. КОВАЛЬ, доктор технічних наук, професор

Д. О. КАЛЬЯН, аспірант*

*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Ю. А. МАКСИМЕНКО, кандидат технічних наук, старший викладач

Військова академія м. Одеса

О. В. САМКОВ, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

Інститут електродинаміки НАН України

E-mail: v.koval@nubip.edu.ua, mytrophan@gmail.com, max75-08@ukr.net

Анотація. Актуальним в умовах сьогодення є забезпечення бажаної енергоефективності систем електропостачання за рахунок підвищення якості та надійності передавання і формування міток точного часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу. Мета дослідження – розробка сучасних рішень для передавання синхроінформації з використанням IP-технологій та оптимізації за швидкодією процесу фазового автопідстроювання частоти синтезатора, що забезпечить підвищення якості формування міток точного часу.

Для лінеаризованої моделі системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу проведено, на основі принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна, оптимізацію за швидкодією режимів перехідних процесів. Отримано оптимальний закон керування та запропоновано його реалізацію за допомогою адаптивного цифрового фазового дискримінатора.

Використання адаптивного цифрового фазового дискримінатора (ФД), який захищено патентом України на винахід, у синтезаторі міток точного часу, забезпечує оптимальне керування формою характеристики ФД, мінімальну тривалість перехідного процесу, що покращує якісні показники сформованих міток точного часу.

Обґрунтовано можливість ефективного передавання синхроінформації діючими IP-мережами на основі сучасного протоколу RTP, що дасть змогу підвищити надійність забезпечення інтегрованих систем електропостачання мітками часу з класом точності T5 відповідно до вимог МЕК 61850-90-5.

Ключові слова: системи електропостачання, SMART Grid, мітки часу, синхронізація, протокол RTP, автопідстроювання, оптимізація, швидкодія, адаптивний цифровий фазовий дискримінатор

* Науковий керівник – доктор технічних наук, професор В. В. Коваль

© В. В. Коваль, Д. О. Кальян, Ю. А. Максименко, О. В. Самков, 2018

Актуальність. Побудову розподільної мережі неможливо уявити без технологій автоматизованого керування роботою мережі і дистанційного моніторингу стану енергетичного обладнання, які дають змогу ефективно та безпечно застосовувати альтернативні джерела енергії, у тому числі сонячну енергію, енергію вітру та інші рішення, і, відповідно до попиту, постачати цю енергію споживачам [1].

Активне впровадження в техніку автоматизованого керування мікропроцесорів і цифрових електронних обчислювальних машин (комп'ютерів) останнього покоління дозволило розробити технологію SMART – Self-Monitoring, Analysis and Reporting Technology (від англ. технологія самодіагностики, аналізу та звіту), що дає змогу створювати системи керування та контролю всього технологічного циклу: збору, опрацювання, передачі інформації, а також керування підстанціями в режимі реального часу [2, 3, 4].

Варто зазначити, що розроблена концепція інтелектуальної енергомережі (SMART Grid) має складову частину, яка пов'язана з необхідністю безперервного моніторингу параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу за допомогою міток точного часу.

Зважаючи на це, актуальним в умовах сьогодення є забезпечення підвищення енергоефективності систем електропостачання за рахунок підвищення якості та надійності формування міток точного часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. На об'єктах електропостачання синхронізація пристроїв у часі здійснюється вже достатньо давно. Зокрема, вона використовується для забезпечення можливості співвіднесення подій, що реєструються різними пристроями. З початком впровадження інтегрованих систем електропостачання SMART-технологій, де використовуються шини процесу, постає необхідність у забезпеченні більш високої точності синхронізації пристроїв за часом – у межах 1 мкс. Це створює необхідні умови для реалізації принципово нових рішень в задачі вибору заходів реагування, у тому числі превентивного, у разі нестандартних або несподіваних ситуацій, наприклад, виникнення каскадних аварійних відключень електроенергії [3].

У системах електропостачання вимірювання та опрацювання даних повинні забезпечуватися з точністю фіксації часу ± 1 мс, наприклад, дані систем SCADA (Supervisory Control & Data Acquisition), реєстраторів подій, терміналів захистів. Така точність досягається порівняно легко і, відповідно до вимог МЕК 61850 [4, 5], відноситься до Т1 класу точності часу для вимірювання подій і синхронізації. Наступний клас точності часу Т2 повинен забезпечуватися з точністю ± 100 мкс. У сучасних пристроях інтегрованих систем електропостачання SMART-технологій потрібна вища точність. Для синхронізації даних від вимірювальних трансформаторів визначені ще три наступних класи точності часу: Т3 з точністю ± 25 мкс; Т4 з точністю ± 4 мкс і Т5 з точністю ± 1 мкс.

Мета дослідження – розробка сучасних рішень для передавання синхроінформації з використанням IP-технологій та оптимізація за швидкодією процесу фазового автопідстроювання частоти синтезатора, що забезпечить підвищення якості та надійності передавання і формування міток часу класу точності T5 для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу відповідно до вимог МЕК 61850.

Матеріали і методи дослідження. Розглянемо методи часової синхронізації, протоколи передачі, способи автопідстроювання частоти синтезатора для формування міток точного часу інтегрованих систем електропостачання SMART-технологій.

Розрізняють два підходи до виконання часової синхронізації. Перший, в якому використовують незалежну систему, що включає в себе виділені канали передачі інформації та другий, де використовують IP-мережу (Ethernet), по якій, водночас, здійснюється обмін даними між пристроями автоматики і SCADA-системою, а також між окремими пристроями систем електропостачання та ін. На сьогодні мережі Ethernet, дедалі ширше використовуються у межах систем автоматизації підстанцій, тому їх можна також ефективно застосовувати для передачі сигналів часової синхронізації.

Найбільше розповсюджені два протоколи синхронізації часу: Network Time Protocol (NTP) і Precision Time Protocol (PTP). Обидва протоколи, під час передавання й формування міток часу на підстанціях, здійснюють обмін повідомленнями по мережі Ethernet. При застосуванні протоколу NTP зі встановленими відповідними серверами часу і пристроями клієнтів, що мають підтримку даного комунікаційного протоколу, може бути досягнута точність синхронізації часу в діапазоні від 1 до 4 мс.

Стандарт IEEE Std 1588-2008 визначає другу версію протоколу PTP, відому як PTPv2 або 1588v2 [4]. Даний протокол забезпечує високу точність синхронізації часу (класу T5), яка досягається шляхом фіксації міток часу повідомлень синхронізації PTP на інтерфейсах Ethernet на апаратному рівні. Профіль PTP для електроенергетики (Power Profile IEEE Std C37.238-2011) додатково закріплює ряд параметрів для забезпечення точності синхронізації часу в межах 1 мкс. Так, похибки, що вносяться окремим прозорим синхронізатором, не перевищують 50 нс. Зазначене потрібно для забезпечення точності синхронізації не більше, ніж 1 мкс при організації топології локальної мережі, що включає в себе 16 комутаторів Ethernet.

Аналіз зазначених вимог до точності передавання й формування міток часу зумовлює необхідність підвищення якості роботи синтезатора міток точного часу (СМТЧ). Виконаємо оптимізацію за швидкодією процесу фазового автопідстроювання частоти СМТЧ, що забезпечить підвищення якості формування міток часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу.

Основою СМТЧ є системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Структурну схему лінеаризованої моделі системи ФАПЧ наведено на рис. 1. У СМТЧ синхронізуючий сигнал, який переданий по

мережі Ethernet і сигнал, що формується генератором, синхронізуються за рахунок керування частотою тактового генератора. Керуюча дія формується на основі різниці фаз (похибка ФАПЧ, що визначається фазовим дискримінатором ФД) між сигналом провідного (ПТГ) і веденого (ВТГ) тактового генератора.

Однією з вимог до робочих характеристик СМТЧ є оптимальне за швидкодією входження в синхронізм, що можливо забезпечити мінімальною тривалістю режимів перехідних процесів [6].

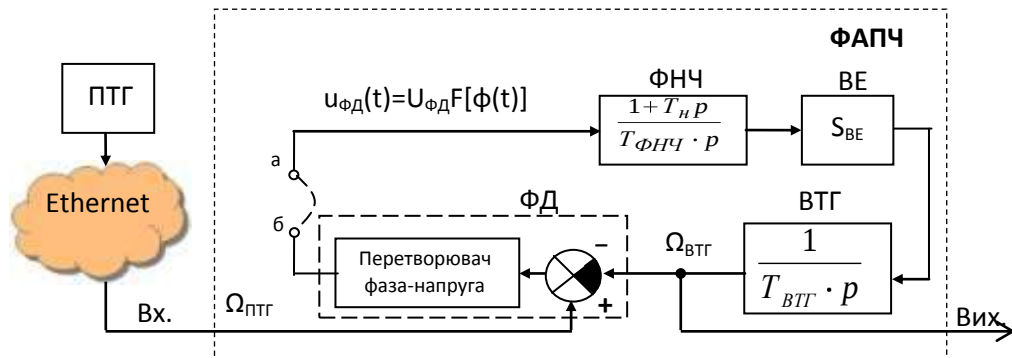


Рис. 1. Структурна схема системи ФАПЧ СМТЧ

Математична модель ФАПЧ СМТЧ може бути записана у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} \cdot \frac{1}{K(p)} = \Omega_{\Pi} \pm S_B u_{\text{ФД}}(t), \\ u_{\text{ФД}}(\varphi(t)) = U_{\text{ФД}} F(\varphi(t)); \quad u_{\text{ФД}}(0) = u_{\text{ФД}}(T \varphi(t)); \\ u_{\text{ФД}}(\varphi) = u_{\text{ФД}}(\varphi + T_{\varphi}), \quad T_{\varphi} = \text{const}; \\ u_{\text{ФДст}}(t) = u_{\text{ФД}}(\varphi), \quad u_{\text{ФДдин}}(t) = F_{\text{дин}} u_{\text{ФД}}(t), \quad u_{\text{ФД}}(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

де $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПТГ}}(t) - \varphi_{\text{ВТГ}}(t)$ – фазова похибка ФАПЧ СМТЧ;

$\varphi_{\text{ПТГ}}(t)$ і $\varphi_{\text{ВТГ}}(t)$ – відповідно, фаза ПТГ та ВТГ;

$K(p)$ – коефіцієнт передачі фільтра нижніх частот (ФНЧ);

Ω_{Π} – початкове розлаштування ВТГ відносно ПТГ;

S_B – крутизна характеристики виконавчого елементу;

$u_{\text{ФД}}(t)$ – періодична керуюча дія;

$F(\varphi(t))$ – нормована характеристика ФД;

t – незалежна змінна (час);

d – оператор диференціювання;

$U_{\text{ФД}}, T_{\varphi}$ – відповідно, амплітуда та період керуючої дії;

$u_{\text{ФДст}}(t)$ і $u_{\text{ФДдин}}(t)$ – відповідно, статичне і динамічне значення керуючої дії.

Рівняння (1) для синтезатора мітки точного часу з використанням в кільці системи ФАПЧ аперіодичного ФНЧ, що має передатну функцію типу

$$K(p) = \frac{1}{Tp+1}, \quad (2)$$

де T – постійна часу ФНЧ;

p – оператор Лапласа, буде мати вигляд:

$$\begin{cases} T \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Omega_{\Pi} \pm S_{BE} U_{\Phi D}(t); \\ u_{\Phi D}(\varphi(t)) = U_{\Phi D} F(\varphi(t)); \\ u_{\Phi D}(0) = u_{\Phi D}(T_{\varphi}(t)); u_{\Phi D}(\varphi) = u_{\Phi D}(\varphi + T_{\varphi}), T_{\varphi} = \text{const}; \\ u_{\Phi D_{CT}}(t) = u_{\Phi D}(\varphi); u_{\Phi D_{днн}}(t) = F_{днн} u_{\Phi D}(t), u_{\Phi D}(\varphi) = \end{cases} \quad (3)$$

Будемо враховувати обмеження зміни величини керуючого впливу вигляду

$$U_{\min} \leq u_{\Phi D}(t) \leq U_{\max}. \quad (4)$$

Після заміни змінних, диференціювання рівняння (3), введення допоміжних змінних, виконаємо оптимізацію за швидкодією з використанням принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна [6]. Максимізуючи функцію Гамільтона по керуючій дії з урахуванням обмежень (4) і двох останніх рівнянь системи (3), отримуємо оптимальний алгоритм керування при $\Omega_{\Pi} = \text{const}$, $S_{BE} = \text{const}$, $T = \text{const}$:

$$u(t) = \max u_{\Phi D}(t) = U_{\Phi D} \text{sign} F(\varphi(t)) + U_{\text{екстр}} \text{sign} e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20}, \quad (5)$$

де $U_{\text{екстр}}$ дорівнює граничним значенням $U_{\max}$ або $U_{\min}$ нерівності (4);

λ_1, λ_2 – корні характеристичного полінома;

Ψ_{20} – початкові умови допоміжної змінної Ψ_2 .

Результати досліджень та їх обговорення. У результаті виконаних досліджень отримано аналітичні вирази для розрахунку показників якості оптимальних режимів перехідних процесів та побудови кривої керування. Для цього знайдено рішення рівнянь системи:

$$\begin{cases} \frac{dz_1(t)}{dt} = u_1 \Omega_{\Pi}, u_{\Phi D}(t); \\ \frac{dz_2(t)}{dt} = \lambda_2 y_2(t) + u_2 \Omega_{\Pi}, u_{\Phi D}(t); \end{cases} \quad (6)$$

де

$$y_1 = c_{11}\varphi + c_{12}\omega;$$

$$y_2 = c_{21}\varphi + c_{22}\omega;$$

$$u_1 = \Omega_{\Pi} \pm S_{BE} u_{\Phi D}(t) \pm \frac{c_{12}}{T}; \quad u_2 = \Omega_{\Pi} \pm S_{BE} u_{\Phi D}(t) \pm \frac{c_{22}}{T}; \quad c_{11} = -\lambda_2; \quad c_{12} = c_{22} = 1; \quad c_{21} = -$$

λ_1 ; $\omega = d\varphi/dt$, яке при довільних початкових умовах з урахуванням виразу (5) буде мати вигляд:

$$\begin{cases} z_1(t) = Y_{10} + U_{\text{ФД}} \text{sign} F(\varphi(t)) \pm U_{\text{екстр}} \text{sign} e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20} \cdot t; \\ z_2(t) = Y_{20} e^{\lambda_2 t} - \frac{1}{\lambda_2} (1 - e^{\lambda_2 t}) U_{\text{ФД}} \text{sign} F(\varphi(t)) \pm U_{\text{екстр}} \text{sign} e^{-\lambda_2 t} + \Psi_{20} \cdot t. \end{cases} \quad (7)$$

Конкретний приклад побудови кривої оптимального керування, згідно з виконаними аналітичними дослідженнями, подано на рис. 2. Проаналізуємо отриманий оптимальний алгоритм керування (5) з урахуванням максимізації функції Гамільтона (14) і сформулюємо вимоги, що пред'являються до форми характеристики ФД.

Перший доданок оптимального алгоритму керування (5) характеризує його залежність від миттєвої різниці фаз ПТГ і ВТГ; другий – від часу. Наявність залежності від складової керування, що визначається другим доданком при оптимальному керуванні наближує досліджувану систему до оптимальних за швидкодією аналогових і релейних систем, в яких ця складова є єдиним керуванням.

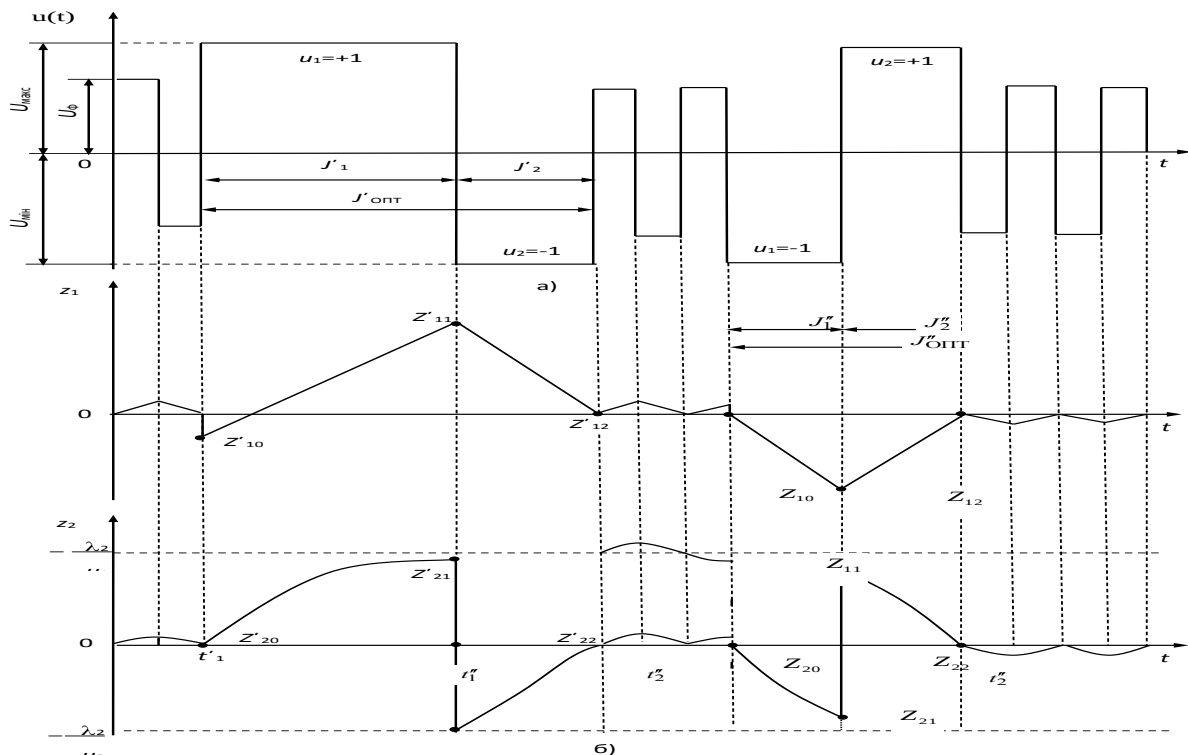


Рис. 2. Керована характеристика ФД (а) та характер оптимальних режимів перехідних процесів у системі ФАПЧ СМТЧ (б)

Зазначена вище обставина зумовлює цілий ряд істотних відмінностей у дослідженні оптимальних систем з періодичними управляючими діями, головними з яких є періодичність фазового простору, неможливість точного аналітичного розрахунку параметрів динаміки та ін.

Для реалізації оптимального алгоритму керування система ФАПЧ повинна мати керований ФД, що забезпечить формування заданого виду

характеристики i , відповідно, оптимальної керуючої дії. Формування характеристики ФД повинно здійснюватися каналом керування (третім входом). На вхід каналу надходить сигнал оптимального переключення, що забезпечує керування формою характеристики ФД на тривалість перехідного процесу залежно від величини і знаку фазової (частотної) похибки системи ФАПЧ оптимальної за швидкодією. Канал керування ФД забезпечує найшвидше і точне попадання відображуючої точки системи в положення стійкої рівноваги. Практична реалізація керованого ФД може бути ефективно виконана з використанням цифрових технологій за допомогою запропонованого адаптивного цифрового фазового дискримінатора АЦФД [7].

Висновки і перспективи. Для лінеаризованої моделі системи фазового автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу виконано оптимізацію за швидкодією режимів перехідних процесів на основі принципу максимуму академіка Л. С. Понтрягіна. Отримано в аналітичному вигляді оптимальний закон керування та запропоновано його реалізацію з використанням цифрових технологій за допомогою запропонованого адаптивного цифрового фазового дискримінатора (ФД).

Використання адаптивного цифрового ФД, який захищено патентом України на винахід, у синтезаторі міток точного часу, забезпечує оптимальне керування формою характеристики фазового дискримінатора, мінімальну тривалість перехідного процесу. Така система одночасно забезпечує також високу точність і стабільність частоти сигналу СМТЧ.

Обґрунтовано можливість ефективного передавання синхроінформації діючими IP-мережами на основі сучасного протоколу РТР, що дасть змогу надійно забезпечити інтегровані системи електропостачання мітками часу з класом точності T5 відповідно до вимог МЕК 61850-90-5.

Список літератури

1. Velychko O. M., Kalian D. O., Koval V. V., Samkov O. V. "Terminal devices for synchro-information systems with adaptive properties for IoT" / 2st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017), Lviv, Ukrain, 4–7 July 2017. – Львів : Львівська політехніка. – 2017. – С. 22–25.
2. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж : монографія / В. В. Коваль, Д. О. Кальян, О. В. Самков. – К. : НУБіП України, 2016. – 182 с.
3. Velichko O. N. Metrological activity in Ukraine // Measurement Techniques. – Vol. 42. – December, 1999. – Number 12. – P. 1109–1115.
4. 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.
5. IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations; <http://domino.iec.ch/webstore/webstore.nsf/searchview/?SearchView=&SearchOrder=4&SearchWV=TRUE&SearchMax=1000&Query=61850&submit=OK>
6. Коваль В. В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою : монографія / В. В. Коваль, Д. О. Кальян. – К. : НУБіП України, 2016. – 412 с.

7. Пат. на винахід, №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор / Коваль В. В., Кальян Д. О., Коваль В. В. (Україна) – № а 2015 11981 ; заявл. 03.12.2015 ; опубл. 10.05.2016, Бюл. № 9. Опубл. Бюл. № 2, 25.01.2017.

References

1. Velychko, O. M., Kalian, D. O., Koval, V. V., Samkov, O. V. (2017). Terminal devices for synchro-information systems with adaptive properties for IoT. 2st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017), Lviv, Ukraine, 4–7 july 2017, 22–25.
2. 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] Kiyv: NUBiP Ukrainy, 182.
3. Velichko, O. N. (1999). Metrological activity in Ukraine. Measurement Techniques. 42 (12), 1109–1115.
4. Ingram D.M., et al. (2014). Perfomance Analysis of PTP Components for IEC 61850 Process Bus Applications”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, I.62 (4), 710–719.
5. IEC 61850 – Communication Networks and Systems in Substations; Avalaible at: <http://domino.iec.ch/webstore/webstore.nsf/searchview/?SearchView=&SearchOrder=4&SearchWV=TRUE&SearchMax=1000&Query=61850&submit=OK>
6. Koval, V. V., Kalian, D. O. (2016). Prystroi synkhronizatsii infokomunikatsiinykh merezh z periodychnoiu avtopidstroikoju: monohrafiia [Devices of synchronization of infocommunication networks with periodic auto-tuning]. Kiyv: NUBiP Ukrainy, 412.
7. Patent na vynakhid №113473 Ukraina, MPK (2016.01) N 03 D 13/00, N 03 D 3/04 (2006.1). Adaptivnyi tsyfrovyi fazovyi dyskryminator [Adaptive Digital Phase Discriminator]. Koval, V. V., Kalian, D. O., Koval, V. V. (Ukraine) – № а 2015 11981, Zaiavl. 03.12.2015, Opubl. 10.05.2016, Biul. № 9. Opubl. Biul. № 2, 25.01.2017.

ОПТИМАЛЬНАЯ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ ФАЗОВАЯ АВТОПОДСТРОЙКА ЧАСТОТЫ СИНТЕЗАТОРА МЕТОК ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ ИНТЕГРИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ SMART-ТЕХНОЛОГИЙ

**В. В. Коваль,
Д. А. Кальян,
Ю. А. Максименко,
А. В. Самков**

Аннотация. В современных условиях актуальным является обеспечение желаемой энергоэффективности систем электроснабжения за счет повышения качества, надежности передачи и формирования меток точного времени для непрерывного мониторинга стабильности параметров электросети с привязкой к реальному времени. Цель исследования – разработка современных

решений для передачи синхронизации с использованием IP-технологий и оптимизации по быстродействию процесса фазовой автоподстройки частоты синтезатора, которая обеспечит повышение качества формирования меток точного времени.

На основе линеаризованной модели замкнутой системы автоматического регулирования синтезатора меток точного времени и использования метода оптимизации на основе принципа максимума академика Л. С. Понтрягина получено в аналитическом виде оптимальный по быстродействию закон управления и предложена его реализация с помощью адаптивного цифрового фазового дискриминатора (ФД).

Использование адаптивного цифрового ФД, который защищен патентом Украины на изобретение, в синтезаторе меток точного времени обеспечивает оптимальное управление формой характеристики фазового дискриминатора (ФД), минимальную продолжительность переходного процесса и улучшение качественных показателей меток точного времени. Передача синхронизации действующими IP-сетями на основе современного протокола PTP позволит надежно обеспечить интегрированные системы электроснабжения метками времени с классом точности T5 в соответствии с требованиями МЭК 61850-90-5.

Ключевые слова: электроснабжение, SMART Grid, метки времени, синхронизация, протокол PTP, автоподстройка, оптимизация, быстродействие, адаптивный цифровой фазовый дискриминатор

SPEED OPTIMAL PHASE-LOCKED LOOP FOR PRECISE TIME INSTANTS SYNTHESIZER FOR INTEGRATED POWER SUPPLY SMART GRID SYSTEMS

**V. Koval,
D. Kalian,
U. Maksimenko,
A. Samkov**

Abstract. Nowadays, it is important to achieve the desired energy efficiency of power supply systems by improving the quality, reliability of transmission and generation of accurate precise time instants for continuous monitoring of the stability of power grid parameters with real-time scale. The goal of the work is to investigate modern solutions for the transfer of synchronization information using IP-based technologies and optimize for the speed the phase-locked loop of frequency synthesizer, which will improve the quality of generating the exact time instants.

On the basis of the linearized model of a closed system of automatic regulation of the synthesizer of labels of the exact time and the use of the optimization method on the basis of the maximum principle by academician L.

S. Pontryagin obtained in the analytical form the speed-optimal control law and proposed its implementation using an adaptive digital phase discriminator (PD)

The use of adaptive digital PD, which is protected by the patent of Ukraine for invention, in the synthesizer of precise time marks provides optimal control of the shape of the phase discriminator (PD) characteristics, the minimum duration of the transient process and the improvement of the quality indicators of the generated exact time marks. The transfer of synchronization information by the existing IP networks based on the modern PTP protocol will enable reliable provision of integrated power supply systems with timestamps with accuracy class T5 in accordance with the requirements of IEC 61850-90-5.

Keywords: *power supply, Smart Grid, timestamps, synchronization, PTP protocol, auto-tuning, optimization, performance, adaptive digital phase discriminator*

УДК 621:541:183

ДО ПИТАННЯ ПРО СУШІННЯ ГАЗІВ НА ОСНОВІ КОРОТКОЦИКЛОВОЇ БЕЗНАГРІВНОЇ АДСОРБЦІЇ

Б. Х. ДРАГАНОВ, доктор технічних наук, професор
*Національний університет біоресурсів
і природокористування України*

Ю. Ф. СНЄШКІН, доктор технічних наук, професор
Інститут технічної теплофізики НАН України
E-mail: epafort1@mail.ru

Анотація. *Мета дослідження – аналіз процесів сушіння газів на основі короткоциклової безнагрівної адсорбції.*

Наведено основні відомості про адсорбцію, теорію молекулярної адсорбції, структури адсорбентів, а також основи сушіння газоподібних тіл на основі адсорбційної техніки.

Встановлено, що основною перевагою короткоциклової адсорбції є вища продуктивність установок за зіставних габаритів та відсутності допоміжних пристроїв для нагрівання регенеруючого повітря.

Ключові слова: *сушіння газів, адсорбція, хемосорбція, адсорбент короткоциклова безнагрівна адсорбція*

Актуальність. *Адсорбцією називають концентрування речовин на поверхні розподілу фаз або в об'ємі пор твердого тіла. У процесі адсорбції беруть участь щонайменше два агенти: тіло, на поверхні або в об'ємі пор якого відбувається концентрування речовини, яка поглинається (її називають адсорбентом), і сама речовина. Остання, якщо вона знаходиться в газовій або рідкій об'ємній фазі, тобто в неадсорбованому*