

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

КАЛЬЯН ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.518.5:621.39

ДИСЕРТАЦІЯ

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ
ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ
БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ВИРОБНИЦТВА

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»
(технічні науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело Д.О. Кальян

Науковий керівник
Коваль Валерій Вікторович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2020

АНОТАЦІЯ

Кальян Д.О. Автоматизація процесу контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів багатомономенклатурного виробництва. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.13.07 «Автоматизація процесів керування». Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2020.

Мета дисертації - підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва за рахунок створення автоматизованої системи контролю з використанням сучасних ІР-технологій та розробки програмного забезпечення і блоку первинних перетворювачів контрольованих сигналів з ієрархічною системою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1.Визначити основні підходи до забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю пристроїв синхронізації в умовах багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва.

2.Дослідити багатомономенклатурне виробництво пристроїв синхронізації цифрових сигналів як об'єкт автоматизації.

3.Провести на основі системного підходу аналіз способів підвищення продуктивності процесу контролю в умовах багатомономенклатурного виробництва.

4.Розробити апаратну структуру вимірювального блоку автоматизованої системи контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів і програмне забезпечення для візуалізації та статистичної обробки отриманих цифрових даних.

5.Розробити структуру пристрою контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії процесу контролю.

6. Визначити на основі теоретико-ймовірнісного методу вимоги до блоку контролю періодичності та його складових (електричних компонентів) з метою підвищення надійності його функціонування і, як наслідок, зменшення ризику прийняття хибного рішення оператором про наявність або відсутність контрольованого сигналу.

7. Дослідити підсистему фазового автопідстроювання частоти опорного генератора блоку первинних перетворювачів автоматизованої системи контролю та здійснити її оптимізацію за швидкодією.

8. Розробити лабораторний макет автоматизованої системи контролю з блоком первинних перетворювачів контрольованих сигналів і програмним забезпеченням та провести експериментальні дослідження.

Для виконання роботи використано методи сучасної теорії автоматичного керування, імітаційного моделювання, елементи теорії оптимального керування, системний аналіз, статистичні методи обробки інформації, теоретико-ймовірнісні методи, методи прикладного програмування і методи експериментальних досліджень розробленого лабораторного макета автоматизованої системи контролю.

У результаті дисертаційного дослідження вирішено важливе наукове завдання, яке полягає у розробленні автоматизованої системи контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів з урахуванням їх багатомітенклатурного виробництва.

Внаслідок проведення теоретичних та експериментальних досліджень отримані такі наукові та практичні результати. Досліджено процес контролю пристроїв синхронізації в умовах їх багатомітенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва, як об'єкт автоматизації: визначено, на основі аналізу структурних особливостей системи керування гнучким інтегрованим виробництвом, завдання інформаційних функцій, які забезпечуються підсистемою вимірювань і контролю показників якості, розроблено автоматизовану систему контролю, до складу якої входять лабораторний макет багатоканального вимірювального блоку БПП «TIMETER» і програмне

забезпечення Р4000winXP для візуалізації та аналізу даних, які використовуються для прийняття рішення про зміну параметрів виробничого технологічного процесу. Проведено експериментальні дослідження системи в процесі багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації різного призначення.

Вперше розроблено структуру багатоканальної автоматизованої системи контролю показників якості пристроїв синхронізації, яка забезпечує багатократне підвищення продуктивності процесу контролю і спрощує візуалізацію та аналіз даних, що використовуються для прийняття рішень; адаптивний цифровий фазовий дискримінатор, який забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал, а також можливість керованого формування його статичної характеристики; пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, в якому прийняття рішення здійснюється в кінці кожного періоду сигналу тактовою частиною, що підвищує надійність і швидкодію контролю; ієрархічну структуру підсистеми фазового автопідстроювання частоти опорного генератора, яка забезпечує адаптивне формування сигналу керуючого впливу відповідно до встановленого на основі принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна оптимального за швидкодією закону управління; математичну модель оптимальної за швидкодією підсистеми та визначено граничні умови, за яких періодичність характеристики фазового дискримінатора не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і виконуються умови теореми А.А. Фельдбаум про n -інтервалів.

Набув подальшого розвитку метод перетворення похибки інтервалів часу в цифровий сигнал, з використанням якого розроблено структуру адаптивного цифрового фазового дискримінатора, котрий забезпечує можливість керованого формування статичної характеристики в залежності від режиму функціонування системи фазового автопідстроювання частоти. Встановлено, що адаптивне формування сигналу керуючої дії за встановленим оптимальним за швидкодією законом керування дозволяє зменшити тривалість перехідного

процесу в підсистемі від 2,7 до 4 разів, в залежності від значення початкових умов.

Вперше формалізовано визначення температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу, яка складається з впливів великої кількості фізичних і умовних електричних компонентів блоку контролю періодичності, що дає змогу проводити підсумовування цих впливів за правилами теорії ймовірностей, а не за «мінімаксім» методом і, як наслідок, підвищити надійність прийняття рішення оператором щодо зняття невизначеності про наявність або відсутність контрольованого сигналу.

Вперше на основі запропоновано методу багатоканального контролю показників якості розроблено апаратну структуру вимірювального блоку БПП «TIMETER» автоматизованої системи контролю, що забезпечує, в порівнянні з одноканальним, підвищення в 4 рази продуктивності контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатомініклатурного гнучкого інтегрованого виробництва, а також в процесі їх технічної експлуатації у складі сучасних високотехнологічних систем.

Розроблено автоматизовану систему контролю показників якості багатомініклатурного виробництва, яка пройшла дослідні випробування і використовувалась у процесі багатомініклатурного гнучкого виробництва прецизійних пристроїв синхронізації різного призначення в ТОВ “Інформаційні системні технології”. Діючий лабораторний макет автоматизованої системи контролю з блоком БПП «TIMETER» і програмним забезпеченням P4000winXP впроваджений в МПП «Анігер» і використаний з метою оцінювання показників якості міток точного часу ЕВРП «Регіна-Ч», що експлуатуються на об’єктах Об’єднаної енергосистеми України.

Інструментами для розробки були Simulink/MATLAB, Quartus Prime Lite Edition, Excel, Embarcadero RAD Studio.

Експериментальні дослідження автоматизованої системи контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів з використанням розробленого лабораторного макета блоку первинних перетворювачів БПП «TIMETER» і

програмного забезпечення P4000winXP підтверджують високі якісні та кількісні показники процесу контролю в умовах багатомоделного гнучкого автоматизованого виробництва конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

Ключові слова: автоматизація, контроль, багатомоделне виробництво, пристрій синхронізації, показник якості, багатоканальність, автопідстроювання частоти, оптимізація, швидкодія, принцип максимуму.

ABSTRACT

Kalian D. O. Automation of the process of monitoring quality parameters of digital signal synchronization devices of flexible manufacturing system. - Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences on the specialty 05.13.07 «Automation of control processes». National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The goal of the thesis - increase the productivity, speed and reliability of the process of monitoring the quality indicators of digital signal synchronization devices in a multi-product flexible manufacturing system by creating an automated monitoring system using modern IP-technologies and developing software and a block of primary converters of controlled signals with a hierarchical phase-locked loop system using reference oscillator frequency.

To meet the goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. Define main approach to guarantee high quality and quantitative indicators of the process of control of synchronization devices in the conditions of multi-product flexible manufacturing system.

2. Investigate flexible manufacturing system of digital signal synchronization devices as an automation object.

3. Analyze, on the basis of a systematic analysis, ways to increase the productivity of the control process in the conditions of flexible manufacturing system.

4. Develop a hardware architecture of the measuring unit of an automated system for monitoring quality indicators of digital signal synchronization devices and software for visualization and statistical processing of the received digital data.

5. Synthesize the structure of the control system for the period of the pulse sequence of the clock frequency, that provides increased reliability and speed of the control process.

6. Define requirements, on the basis of the probabilistic-theoretical method, for the periodicity control unit and its components (electrical components) in order to increase the reliability of its operation and, as a consequence, reduce the risk of an operator making an erroneous decision about the presence or absence of a controlled signal.

7. Analyze the phase-locked loop subsystem of the reference oscillator of the primary transducer block of the automated control system and optimize it in terms of speed.

8. Develop a laboratory model of an automated control system with a block of primary converters of controlled signals and software and conduct experimental research.

To accomplish the work, the methods of the modern theory of automatic control, simulation modeling, elements of the theory of optimal control, system analysis, statistical methods of information processing, theoretical and probabilistic methods, methods of applied programming and methods of experimental research of the developed laboratory layout of the automated control system were used.

As a result of the dissertation research, an important scientific problem was solved, that is to develop an automated system for monitoring quality indicators of digital signal synchronization devices, taking into account their flexible manufacturing system.

As a result of theoretical and experimental research, the following scientific and applied results were obtained. The process of control of synchronization devices in the conditions of their multi-product flexible manufacturing system has been investigated as an object of automation: defined based on the analysis of the

structural aspects of the control system for integrated flexible manufacturing system, set goals for information functions provided by the subsystem of measurement and control of quality indicators, automated control system has been developed, which includes a laboratory model of a multichannel measuring block of primary converters PCU «TIMETER» and software P4000winXP for data visualization and analysis, which are used to make a decision on changing the parameters of the production technological process. Experimental studies of the system were performed for the process of flexible manufacturing system of synchronization devices for various purposes.

For the first time, the structure of a multichannel automated system for monitoring quality parameters of synchronization devices has been developed, which provides a multiple times increase in the productivity of the monitoring process and simplifies the visualization and analysis of data used for decision making; adaptive digital phase discriminator, that provides a primary conversion of the time interval error into a digital code, as well as the possibility of controlled formation of its static characteristics; device to control clock frequency pulse sequence, in which the decision is made at the end of each period of the clock signal, which increases the reliability and speed of control; hierarchical structure of the phase-locked loop subsystem of the reference oscillator, that guarantees adaptive shaping of the control action signal in accordance with the established on the basis of the Pontryagin's maximum principle of the time-optimal control law; the mathematical model of the optimal in terms of speed subsystem and the boundary conditions are determined, at which the periodicity of the characteristics of the phase discriminator does not affect the duration of the time-optimal transient processes and the conditions are met for the Feldbaum's theorem on n -intervals.

The method of converting the error of time intervals into a digital signal was further developed, with the use of which the structure of an adaptive digital phase discriminator has been developed, which provides the possibility of controlled formation of a static characteristic depending on the mode of operation of the phase-locked loop system. It has been established that the adaptive shaping of the control

signal according to the established optimal control law in terms of speed makes it possible to reduce the duration of the transient process in the subsystem from 2.7 to 4 times, depending on the value of the initial conditions.

For the first time, the definition of the temperature instability of the duration of the transient process of an exemplary signal, which consists of the effects of a large number of physical and conventional electrical components of the periodicity control unit, was formalized, which allows summing up these effects according to the rules of probability theory, and not according to the "minimax" method and, as a consequence, to increase the reliability of the operator's decision to remove the uncertainty about the presence or absence of a controlled signal.

For the first time, based on the proposed method of multichannel quality control, the hardware structure of the measuring unit was developed unit PCU «TIMETER» for automated control system, providing, in comparison with a single-channel, a 4-times increase in the performance of monitoring the quality indicators of digital signal synchronization devices in integrated flexible manufacturing system, as well as in the process of their technical operation as part of modern high-tech systems.

The automated quality control system for multi-item production has been developed, which has passed research tests and was used in the process of multi-item flexible production of precision synchronization devices for various purposes in LLC “Information System Technologies“. The working laboratory model of the automated control system with the BPP ”TIMETER” unit and the P4000winXP software was deployed in the MPP “Aniger” and used to evaluate the timestamps quality parameters of the EVRP “Regina-Ch”, that is operated at the facilities of the United Power System of Ukraine.

Development tools were Simulink / MATLAB, Quartus Prime Lite Edition, Excel, Embarcadero RAD Studio.

Experimental studies of an automated control system for digital signal synchronization devices using the developed laboratory model of the primary converter unit PCU «TIMETER» and software P4000winXP confirm the high quality

and quantitative indicators of the control process under the conditions of multi-product flexible manufacturing system of competitive digital signal synchronization devices.

Keywords: automation, control, flexible manufacturing system, synchronization device, quality indicator, multichannel, phase-locked loop, optimization, speed, maximum principle.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних:

1. V.V. Koval, **D.O. Kalian**, M.M. Khudyntsev, V.P. Lysenko, O.V. Samkov, I.I. Shkliarevskyi. Automated 24x7 monitoring of synchroninformation in modern digital networks // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки. - 2017. - Випуск №2. - С.88-94. Режим доступу до статті: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1824870 (*Здобувачем проведено аналіз способів забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю ПСЦС, розроблено на основі запропонованого методу структуру багатоканального контролю показників якості з застосуванням IP-технологій блоку БПП «TIMETER», P4000winXP, отримано кількісні оцінки показники за результатами вимірів*).

2. V.P. Lysenko, V.V. Koval, K.V. Nakonechna, **D.O. Kalian**. Modern information technologies in the control systems for complex biotechnical objects of agricultural appointment // Information and Telecommunication Sciences, Volume 9, Number 2(15), July-December 2017, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.38-43. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/119897> (*Здобувачем розроблено лабораторний стенд системи контролю, проведено експериментальні дослідження з використанням інформаційної системи корпоративної IP-мережі, отримано дані результатів контролю передавання синхроінформації на основі протоколу RTP IEEE-1588v2 з використанням ПСЦС*).

3. **Dmytro Kalian.** Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences, Number 1(2018), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, P.11-18. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/136460>

4. Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Максименко Ю.А., Самков О.В. Оптимальне за швидкодією фазове автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу інтегрованих систем електропостачання Smart-технологій // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2018. – Вип.283. – С.89-98. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/pvnapu_tech_2018_283_13 (Здобувачем розроблено структуру ПФАПЧ з нелінійностями, проведено дослідження математичної моделі оптимальної за швидкодією системи, отримано в аналітичному виді оптимальний закон керування та запропоновано його реалізацію з використанням цифрових технологій).

5. **Кальян Д.О.**, Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецький. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540> (Здобувачем проведено аналіз способів контролю ПСЦС в умовах багатомономенклатурного виробництва та технічної експлуатації, розроблено апаратну структуру блоку багатоканального контролю БПП «TIMETER» АСК з підсистемою фазового автопідстроювання, проведено дослідження математичної моделі підсистеми, отримано граничні умови, за яких періодичність характеристики ФД не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і кількісну оцінку результатів оптимізації).

Стаття у науковому виданні іншої держави:

6. **Dmytro Kalia**n, Nadiia Kazakova, Boris Kravchenko, Valerii Koval. Automated system for Monitoring Synchronizing precise time signals at SMART-GRID power plants. Projectowanie, badania, i eksploatacja. Tom 1. - Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej. Bielsku-Bialej, Poland. 2019. - P.155-160. <http://www.engineerxxi.ath.eu/book/designing-researches-and-exploitation-2019-vol-1/> *(Здобувачем проведено аналіз способів забезпечення високих якісних показників автоматизованого контролю ПСЦС в умовах експлуатації та виробництва, розроблено структуру системи багатоканальних довготривалих вимірювань показників якості з застосуванням ІР-технологій та використанням статистичної обробки отриманих даних вимірів).*

Патенти:

7. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 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. *(Здобувачем розроблено структуру і системотехнічну реалізацію адаптивного цифрового фазового дискримінатора).*

8. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК Н 03 К 5/19 (2006.01). Пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК Н 03 К 5/19 (2006.01) / Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Коваль В.В. (Україна) - № и 2016 11977, Заявл. 25.11.2016, Опубл. Відомості про заявку 12.06.2017, Бюл. № 11. *(Здобувачем розроблено структуру пристрою контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти).*

Монографії:

9. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації

інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с. *(Здобувачем проведено системний аналіз способів контролю ПСЦС в умовах експлуатації та багатомономенклатурного виробництва, розроблено алгоритм контролю часових характеристик для візуалізації та аналізу даних, сформовано вимоги до опорного генератора та інших компонентів блоку контролю періодичності).*

10. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж: монографія / В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**, О.В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с. *(Здобувачем сформульовано завдання і запропонована методика синтезу структури оптимальної за швидкодією ПФАПЧ, проведено системний аналіз сучасних програмно-апаратних засобів вимірювання та контролю показників якості синхросигналів, отримано кількісну оцінку точності цифрової передачі сигналу еталонних частот).*

11. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с. *(Здобувачем запропоновано схемні реалізації пристрою синхронізації з автопідстроювання частоти, розроблено лабораторний стенд для дослідження основних показників системи фазового автопідстроювання та пристрій для виміру тривалості переходу від однієї частоти на іншу).*

12. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, **Д.О. Кальян**. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. – 494 с. *(Здобувачем проведено системний аналіз способів забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю ПСЦС в умовах багатомономенклатурного виробництва і технічної експлуатації, сформована вихідна множина альтернатив побудови систем автопідстроювання частоти, розроблено на основі запропоновано методу багатоканального контролю показників якості апаратну структуру та діючий лабораторний макет БПП «TIMETER», отримано кількісну оцінку оптимальних за швидкодією перехідних процесів в системі автопідстроювання з адаптивним формуванням сигналу керуючої дії).*

Матеріали та тези наукових доповідей:

13. Коваль В.В., Дорогобед В.В., **Кальян Д.О.**, Твердохліб А.В., Худинцев М.М. Автоматизована система багатоканального моніторингу синхроінформації цифрових телекомунікацій / Матеріали п'ятої міжнародної наук.-пр. конф. "Інфокомунікації – сучасність та майбутнє", м. Одеса 29 – 30 жовтня 2015 р.: в 3 ч. Ч.3. - Одеса: ОНАЗ, 2015. – С.40-43. *(Здобувачем розроблено апаратну структуру автоматизованої системи багатоканального моніторингу синхроінформації, проведено обробку результатів вимірів і здійснено порівняння їх на відповідність міжнародним нормам).*

14. Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Мовчан С.А., Шкляревський І.Ю. Дослідження якості переміщення синхроінформації з використанням протоколу прецизійного часу стандарту IEEE 1588-2008 // Матеріали П'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. "Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості". 8-9 жовтня 2015 р. – Одеса: Одеська державна академія технічного регулювання та якості, 2015. – С.94-95. *(Здобувачем розроблена схема дослідження показників якості синхроінформації, отримано за експериментальними даними кількісну оцінку точності переміщення синхросигналів).*

15. Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Циб В.М., Шевчук Б.В. Системи синхронізації цифрових інфокомунікацій з адаптивними властивостями / Тези доповідей III Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК", м.Київ 17-19 грудня 2015 р., Київ, Україна. – К.: НУБіП України, 2015. – С.36-38. *(Здобувачем розроблено систему синхронізації з адаптивними властивостями та фазовою автоматичною підстройкою частоти).*

16. Коваль В.В., Дорогобед В.В., **Кальян Д.О.**, Коваль В.В. мол. Комп'ютерне моделювання та статистична оптимізація пристроїв синхронізації з адаптивними властивостями / Тези доповідей VII Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», 21-22 квітня 2016 р. Кам'янець-Подільський національний

університет ім. Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2016 – С.98-100. *(Здобувачем розроблено систему синхронізації з адаптивними властивостями на основі пристроїв автоматики з фазовою автопідстройкою частоти, проведено аналіз оптимальних за швидкодією режимів перехідних процесів з використанням принципу максимуму).*

17. Koval V.V., Velichko O.N., Golovnia M.V., Dorogobed V.V., **Kalian D.O.**, Shkliarevskiy I.Y. Scientific and applied principles of creating united national synchroinformation system // Abstracts XXVII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 23-27 травня 2016: Тбілісі, Грузія, – 2016. - С. 96-98. *(Здобувачем визначено основні підходи щодо створення системи контролю якості транспортування синхроінформації та сигналів ПСЦС).*

18. Koval Valerii, Dorogobed Veronica, **Kalian Dmytro**, Khudyntsev Mykola, Koval Viktor. Optimizing dynamic of synchronization system with phase-locked loop for infocommunication networks // Abstracts XXVIII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 25-30 серпня 2016: Брно, Чехія, – 2016. - С.65. *(Здобувачем розроблено структури оптимального за швидкодією пристрою синхронізації з ієрархічним дворівневим регулятором).*

19. Коваль В.В., **Кальян Д.А.**, Шкляревский И.Ю. Использование мониторинга синхросигналов для повышения безопасности информационно-телекоммуникационных систем / Збірник матеріалів доповідей та тез II Наук.-практ конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем», 23-24 березня 2017 р. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2017 – С.123-127. *(Здобувачем розроблено схему автоматизованої системи поліканального моніторингу на основі ПФАПЧ з адаптивними властивостями і вбудованим генератором опорного сигналу).*

20. Koval Valerii, **Kalian Dmytro**, Khudyntsev Mykola, Lysenko Vitaliy,

Samkov Oleksandr, Shkliarevskiy Igor. Synchroninformation's 24x7 monitoring tool for modern digital networks decision making // Abstracts XXX International Conference "Problems of decision making under uncertainties PDMU-2017». 14-19 august 2017: Vilnius, Lithuania, – 2017. - С.75-76. *(Здобувачем розроблено на основі запропоновано методу багатоканального моніторингу показників якості структуру автоматизованого вимірювального пристрою).*

21. Koval V.V., Velychko O.M., Golovnya M.V., **Kalian D.O.**, Shkliarevskiy I.Y. Unified national synchro-information system – high-tech infrastructure for automated complexes // XXIV International Conference on automated control «Automatics-2017»: Kiev, Ukraine, september 13-15, 2017: proceedings. Kiev. 2017. P.8-9. *(Здобувачем запропоновано використання системи контролю показників якості синхросигналів в якості складової комплексу засобів національної синхроінформаційної системи).*

22. **Кальян Д.О.**, Коваль В.В., Самков О.В., Худинцев М.М. Оптимізація схем передавання сигналів точного часу від еталонів з використанням протоколу РТР згідно стандарту IEEE 1588 // Матеріали Сьомої Міжнар. наук.-практ. конф. "Технічне регулювання, метрологія, та інформаційні технології". 10-11 жовтня 2017 р. – Одеса: Одеська державна академія технічного регулювання та якості. - Одеса, Бондаренко М.О., 2017. – С.140-143. *(Здобувачем розроблено та оптимізовано схему пристрою синхронізації з адаптивними властивостями, отримано експериментальне підтвердження можливості використання розробленого пристрою на IP-мережах).*

23. Коваль В.В., Самков О.В., **Кальян Д.А.**, Дубович-Костецький В.Г. Засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів інформаційно-телекомунікаційних систем / Збірник матеріалів доповідей та тез І Міжнар. наук.-практ конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS), м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.; Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2018 – С.100-103. *(Здобувачем розроблено програмно-апаратні засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів з*

субнаносекундною точністю).

24. Vitaliy Lysenko, Valerii Koval, Oleksandr Samkov, **Dmytro Kalian**, Dmytro Komarchuk. Computer-integrated Systems for Information Support and Automatization of the Complicated Objects // Abstracts XXX International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2018». PDMU-2018, Prague, Czech republik, – 2018. – p.p.45-51. *(Здобувачем проведено аналіз способів контролю ПСЦС, розроблено автоматизовану систему контролю з блоком БПП «TIMETER» та формалізовано вимоги до компонентів блоку з метою підвищення надійності прийняття рішення про наявність контрольованого сигналу, отримано аналітичні залежності температурної нестійкості тривалості перехідного процесу).*

Матеріали наукових доповідей, включених до зарубіжної наукометричної бази Scopus:

25. 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. *(Здобувачем проведено аналіз способів процесу контролю ПСЦС, розроблено автоматизовану систему контролю, до складу якої входять діючий лабораторний макет блоку БПП «TIMETER» і програмне забезпечення P4000winXP, отримано кількісну оцінку точності цифрової передачі синхросигналу).*

26. 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: НУ «Львівська політехніка». – 2017. – С.22-25. *(Здобувачем розроблено пристрій синхронізації з адаптивним цифровим фазовим дискримінатором для*

забезпечення мінімальної тривалості перехідного процесу згідно встановленого оптимального за швидкодією закону керування).

27. **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.

28. V.V. Koval, V.P. Lysenko, **D.O. Kalian**, M.V. Golovnya, O.V. Samkov, O.M. Piskun, M.S. Medina, I.Y. National Time Scale Transmitting Through the Integrated Power Networks of SMART Technologies / International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T-2018). 9 - 12 October 2018: Kharkiv National University of Radio Electronics / Conference Proceedings. – p.p.89-94. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632078> (Здобувачем проведено вимірювання і аналіз залежності ТІЕ від часу сигналу, що формується розробленим адаптивним пристроєм синхронізації інформаційної системи передавання, отримано кількісні оцінки показників якості).

29. Valerii Koval, Nadiia Kazakova, **Dmytro Kalian**, Dmytro Komarchuk, Vitaliy Lysenko, Oleksandr Samkov. The use of advanced information and communication technologies to monitor the quality of synchronization signals of IoT terminal devices / 3st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019), Lviv, Ukrain, 2-6 july 2019. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2019. – С.22-25. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8847894> (Здобувачем проведено аналіз способів контролю показників якості в умовах технічної експлуатації і виробництва ПСЦС, розроблено на основі запропоновано методу багатоканального контролю показників якості діючий лабораторний макет БПП «TIMETER» та ПЗ P4000winXP, отримано та проаналізовано данні вимірів, які використовуються для прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу).

30. Valerii Koval, **Dmytro Kalian**, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov,

Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - pp.269-276. *(Здобувачем проведено аналіз способів підвищення продуктивності комп'ютерно-інтегрованої системи діагностики засобів синхронізації часу, розроблено багатоканальні цифрові блоки вимірювання параметрів синхросигналів та оптимальну ієрархічну систему автоматичного керування з фазовим автонідстроюванням частоти опорного генератора, отримано результати імітаційного моделювання та лабораторних досліджень перехідних процесів).*

Рекомендації:

31. В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**, В.В. Осипенко, О.В. Самков. Рекомендації з створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням IP-мереж на основі протоколу прецизійного часу РТР. Для підприємств і організацій України / НАН України, Ін-т електродинаміки. Національний університет біоресурсів і природокористування (НУБІП) України. Укл. Коваль В.В. та інші. – Київ, 2017. 47 с. *(Здобувачем проведено аналіз та зазначена необхідність підвищення якості контролю параметрів синхросигналів, як складової управління ЄНСС).*

ЗМІСТ

ВСТУП	23
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ЧАСТОТНО-ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В УМОВАХ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ГНУЧКОГО ІНТЕГРОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА	32
1.1. Аналіз характеристик пристроїв синхронізації з урахуванням умов їх багатомітенклатурного виробництва	32
1.1.1. Часові характеристики сигналів пристроїв синхронізації	35
1.1.2. Оцінка частотних характеристик стабільності пристроїв синхронізації цифрових сигналів	36
1.1.3. Аналіз робочих характеристик та режимів роботи пристроїв синхронізації цифрових сигналів	37
1.2. Аналіз методів розрахунку та способів оцінки показників якості ПСЦС з урахуванням умов їх багатомітенклатурного виробництва та експлуатації у складі сучасних цифрових систем	39
1.2.1. Оцінка частотних характеристик стабільності ПСЦС у часовій області	39
1.2.2. Оцінка часових характеристик стабільності ПСЦС у часовій області	43
1.3. Аналіз структури системи керування гнучких інтегрованих систем багатомітенклатурного виробництва ПСЦС як об'єкту автоматизації	47
1.4. Аналіз підсистеми контролю та вимірювань показників якості ПСЦС	54
1.5. Аналіз особливостей процесу контролю показників якості ПСЦС на етапі введення їх в експлуатацію та в процесі технічного обслуговування на об'єктах цифрових телекомунікацій й цифрових підстанцій енергетичних мереж SMART Grid технологій	62
1.6. Мета та задачі досліджень	70
1.7. Основні результати та висновки до розділу 1	71
Список використаних джерел	73
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА СТРУКТУР АСК, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ, ШВИДКОДІЇ ТА НАДІЙНОСТІ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПСЦС.	85
2.1. Формування технічних вимог до розробки засобів контролю та вимірювань багатомітенклатурного виробництва ПСЦС гнучких інтегрованих систем	85
2.2. Аналіз методів первинного перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал та розроблення структури оригінального адаптивного цифрового фазового дискримінатора з використанням ПЗ Quartus Prime Lite Edition	87
2.3. Розроблення схеми формування опорного сигналу з використанням підсистеми фазового автопідстроювання частоти	92

2.4. Формування вихідної множини альтернатив схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК	94
2.5. Розроблення структури пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти	97
2.6. Аналіз впливу структури і умов функціонування блоку контролю періодичності на якість прийняття рішення в АСК	99
2.7. Розроблення теоретико-ймовірнісного методу дослідження температурної нестійкості ТПП зразкового сигналу блоку контролю періодичності	105
2.7.1. Статистичний аналіз температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу мультівібратора БКП	105
2.7.2. Визначення впливу статистичних характеристик електричних компонентів на температурну нестійкість ТПП зразкового сигналу блоку контролю періодичності	107
2.8. Розроблення алгоритму обробки результатів автоматизованого багатоканального контролю синхросигналів та візуалізації результатів вимірів характеристик синхросигналів в реальному часі	114
2.9. Розроблення блоку первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК параметрів якості ПСЦС	114
2.10. Основні результати та висновки до розділу 2	119
Список використаних джерел	121
РОЗДІЛ 3. ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАВДАНЬ КЕРУВАННЯ, ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ПІДСИСТЕМИ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ АСК	129
3.1. Аналіз особливостей керування та розроблення багатофункціональної підсистеми автопідстроювання частоти генератора, що керується напругою	129
3.2. Динамічне моделювання підсистеми фазового автопідстроювання частоти генератора АСК	131
3.3. Оптимізація за швидкодією ПФАПЧ генератора, що керується напругою	136
3.4. Синтез алгоритму та структури оптимальної за швидкодією підсистеми автопідстроювання з адаптивним цифровим фазовим дискримінатором на основі методу імітаційного моделювання	141
3.5. Моделювання та експериментальні дослідження підсистем автопідстроювання частоти з необмеженою смугою пропускання ФНЧ	148
3.6. Основні результати та висновки до розділу 3	154
Список використаних джерел	156
РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ТА АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПФАПЧ ГЕНЕРАТОРА ОПОРНОГО СИГНАЛУ АСК	161
4.1. Оптимізація за швидкодією ПФАПЧ генератора, що керується напругою, з інтегрувальною ланкою	161

4.2. Моделювання, експериментальні дослідження та синтез оптимальної за швидкодією підсистеми фазового автопідстроювання частоти АСК з інтегрувальною ланкою	170
4.3. Аналітичне визначення вимог до параметрів ПФАПЧ АСК з інтегрувальною ланкою і періодичною характеристикою ФД для реалізації оптимальних за швидкодією перехідних процесів	177
4.4. Синтез оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою	182
4.5. Основні результати та висновки до розділу 4	185
Список використаних джерел	186
РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ВИРОБНИЦТВА	190
5.1. Розроблення та виготовлення лабораторного зразка блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» з синтезованою оптимальною за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК	191
5.2. Експериментальні дослідження точності формування опорного сигналу АСК ПФАПЧ, що синхронізується від еталона частоти	193
5.3. Експериментальні дослідження точності формування опорного сигналу АСК ПФАПЧ, підключеної з використанням засобів IP-технологій до провідного джерела синхросигналу	198
5.4. Експериментальні дослідження швидкодії ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою	203
5.5. Результати досліджень продуктивності АСК показників якості ПСЦС в умовах багатономенклатурного виробництва	207
5.6. Основні результати та висновки до розділу 5	211
Список використаних джерел	212
ВИСНОВКИ	217
ДОДАТКИ	220
Додаток А. Акти впровадження	221
Додаток Б. Патенти на винахід і корисну модель	224
Додаток В. Елементи вихідної множини альтернатив схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК	226
Додаток Г. Математичні перетворення та спрощення представлення статистичних характеристик сумарного температурного коефіцієнту з'єднаних електричних компонентів БКП в ряд Тейлора	233
Додаток Д. Програмне забезпечення P4000winXP, що розроблено у середовищі Embarcadero RAD Studio XE2 2012	237
Додаток Е. Результати імітаційного моделювання схем досліджуваних підсистем ФАПЧ АСК з використанням програми Simulink пакету MATLAB	261
Додаток Ж. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	273

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. В сучасних цифрових інформаційно-комунікаційних системах, енергетиці, метрології використовуються пристрої синхронізації цифрових сигналів (ПСЦС). Зважаючи на значну складність ПСЦС, необхідність забезпечення ними заданих технічних вимог щодо точності, швидкодії та надійності, задача контролю показників якості є однією з найважливіших і актуальних.

Умови багатомоделного виробництва ПСЦС, більш суворе і складне нормування їх технічних характеристик обумовлюють постійний розвиток існуючих та створення нових методів контролю. Контроль показників якості ПСЦС в умовах багатомоделного гнучкого інтегрованого виробництва, а також у процесі їх технічної експлуатації в складі сучасних високотехнологічних систем вимагає широкомасштабної автоматизації з використанням засобів комп'ютерної техніки та ІР-технологій.

Для забезпечення якісного контролю ПСЦС необхідні високоточні та відповідно дорогі вимірювальні пристрої, проте необхідність контролю кожного зразка пристрою, що виникає у процесі його налаштування, введення в експлуатацію та обслуговування, зумовлює необхідність проведення безперервних тривалих (година, доба і навіть тижні) вимірювань. Підвищення продуктивності використання засобів вимірювань можливе за рахунок автоматизації, збільшення числа каналів вимірювань, універсалізації пристрою контролю та його оптимізації. Багатоканальність, крім того, забезпечує одночасність вимірів, що спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації можливості у “ручному режимі” приймати рішення щодо змін параметрів технологічного процесу.

Сформовані вимоги щодо прецизійності, багатоканальності і продуктивності автоматизованої системи контролю (АСК), в умовах одиничного та дрібносерійного багатомоделного гнучкого виробництва ПСЦС, обумовлюють необхідність вирішення задач апаратно-програмної реалізації з використанням новітніх мікроелектронних компонентів,

ефективних алгоритмічних та схемотехнічних рішень. Зважаючи на це актуальними є розробки і наукові дослідження як автоматизованої системи контролю в цілому, так і її складових: первинних перетворювачів (датчиків), пристрою і блока контролю періодичності, підсистеми фазового автопідстроювання частоти (ПФАПЧ) опорного генератора, блока первинного перетворювача, програмного забезпечення обробки результатів контролю та їх візуалізації.

Відомі АСК, які наведені деякими авторами, вирішують задачі контролю дослідного виробництва (Артюхіна Л.В.), але без врахування нових можливостей, які створюються завдяки реалізації концепції гнучких інтегрованих виробничих систем, а також можливості їх використання в процесах введення в експлуатацію та технічного обслуговування.

АСК ПСЦС з оптимальними за швидкістю ПФАПЧ опорного генератора, що функціонують в умовах одиничного та дрібносерійного багатомоделного, гнучкого, виробництва у відомій літературі не описані.

Вагомий вклад в дослідження автоматизованих виробничих систем внесли такі вчені: Невлюдов І.Ш., Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Волков В.Е., Ельперін І.В., Ямпольський Л.С., Бобух А.О., Біловол Г.В., Парахуда Р.Н., Невлюдова В.В., Шевцов В.І., Соловйов В.А., Лісовиченко О.І., Дзінько Р.І. Велику увагу розробці та дослідженню автоматичних систем керування та їх складових приділили такі вітчизняні та закордонні автори: Борщ В.І., Шахгільдян В.В., Стеклов В.К., Казаков Л.Н., Костик Б.Я., Коваль В.В., Sonneman R.W., Gupta S.C.

Отже, розробка методів підвищення продуктивності, швидкодії та надійності автоматизованого контролю ПСЦС є актуальною науково-прикладною задачею, яка визначає напрямок досліджень дисертаційної роботи.

Мета і завдання дослідження. Метою дослідження є підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатомоделного гнучкого автоматизованого виробництва за рахунок створення автоматизованої

системи контролю з використанням сучасних ІР-технологій та розробки програмного забезпечення і блока первинних перетворювачів контрольованих сигналів з ієрархічною системою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

9.Визначити основні підходи до забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю пристроїв синхронізації в умовах багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва.

10.Дослідити багатомономенклатурне виробництво ПСЦС як об'єкт автоматизації.

11.Провести на основі системного підходу аналіз способів підвищення продуктивності процесу контролю в умовах багатомономенклатурного виробництва.

12.Розробити апаратну структуру вимірювального блока автоматизованої системи контролю показників якості ПСЦС і програмне забезпечення для візуалізації та статистичної обробки отриманих цифрових даних.

13.Розробити структуру пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії процесу контролю.

14.Визначити на основі теоретико-ймовірнісного методу вимоги до блока контролю періодичності та його складових (електричних компонентів) з метою підвищення надійності його функціонування і, як наслідок, зменшення ризику прийняття хибного рішення оператором про наявність або відсутність контрольованого сигналу.

15. Дослідити підсистему фазового автопідстроювання частоти (ПФАПЧ) опорного генератора блока первинних перетворювачів АСК та здійснити її оптимізацію за швидкодією.

16. Розробити лабораторний макет АСК з блоком первинних перетворювачів контрольованих сигналів і програмним забезпеченням та провести експериментальні дослідження.

Об'єктом дослідження є процеси керування багатономенклатурним гнучким автоматизованим виробництвом конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

Предметом дослідження є автоматизована система контролю показників якості пристроїв синхронізації, що складається з програмного забезпечення та блока первинних перетворювачів контрольованих сигналів з підсистемою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора.

Методи дослідження. Для виконання роботи використано методи сучасної теорії автоматичного керування, імітаційного моделювання, елементи теорії оптимального керування, системний аналіз, статистичні методи обробки інформації, теоретико-ймовірнісні методи, методи прикладного програмування і методи експериментальних досліджень розробленого лабораторного макета автоматизованої системи контролю.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано метод створення автоматизованої системи керування виробництвом пристроїв синхронізації з використанням багатоканальної структури АСК показників якості, *що* забезпечує багаторазове підвищення продуктивності процесу контролю та *спрощує* візуалізацію й аналіз даних, які використовуються для прийняття рішень щодо змін параметрів технологічного процесу багатономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва.

2. Вперше формалізовано визначення температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу, що складається з впливів великої кількості фізичних і умовних електричних компонентів блока контролю періодичності. Це *дає змогу* проводити підсумовування цих впливів за правилами теорії ймовірностей, а не за «мінімаксим» методом і, як наслідок, підвищити якість прийняття рішення оператором щодо зняття невизначеності про наявність або відсутність контрольованого сигналу.

3. Вперше запропоновано для вибору варіанта побудови підсистеми фазового автопідстроювання частоти опорного генератора АСК в умовах

неповноти апріорної інформації щодо залежності технічних характеристик від структури підсистеми *застосування* методів системного аналізу, *що дало змогу* на етапі підготовки множини всіх уявних альтернатив сформувати вихідну множину варіантів за умови можливості їх реальної реалізації.

4.Набув подальшого розвитку метод перетворення похибки інтервалів часу в цифровий сигнал, з *використанням якого* розроблено структуру адаптивного цифрового фазового дискримінатора, *що забезпечує* можливість керованого формування статичної характеристики *залежно від режиму функціонування системи фазового автопідстроювання частоти*.

5.Вперше розроблено ієрархічну структуру ПФАПЧ опорного генератора з періодичностями керуючої дії в функції фазової координати та обмеженнями типу «насичення», *що забезпечує* адаптивне формування сигналу керуючої дії згідно з встановленим оптимальним за швидкодією законом керування на основі принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна і, як наслідок, зменшує тривалість перехідного процесу від 2,7 до 4 разів залежно від значення початкових умов.

6.Набув подальшого розвитку метод синтезу оптимальних за швидкодією систем, *що дало змогу* аналітично визначити граничні умови, за яких періодичність характеристики ФД за фазовою координатою в підсистемах фазового автопідстроювання частоти з інтегрувальною ланкою не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і виконуються умови теореми А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертація виконана у Національному університеті біоресурсів і природокористування України в рамках прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України за темами «Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій» (0115U003376, 2015-2016 рр.), «Управління споживанням та генерацією енергії на підприємствах агропромислового комплексу на основі концепції інтелектуальних технологій

(Smart Grid)» (0115U003356, 2015-2016 pp.), «Розроблення технології діагностики якості функціонування сільськогосподарських споживачів електричної енергії на основі використання IP-технологій» (0119U100829, 2019-2020 pp.), де здобувач був виконавцем.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено автоматизовану систему контролю показників якості багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації, яка пройшла дослідні випробування і використовувалась у процесі багатомономенклатурного гнучкого виробництва прецизійних ПСЦС різного призначення в ТОВ “Інформаційні системні технології”, що засвідчується довідкою (від 29.05.2020 р.).

Розроблено діючий лабораторний макет АСК з блоком БПП «TIMETER» і програмним забезпеченням P4000winXP, який впроваджений в МПП «Анігер» і використаний з метою оцінювання показників якості міток точного часу ЄВРП «Регіна-Ч», що експлуатуються на об’єктах Об’єднаної енергосистеми (ОЕС) України (акт впровадження науково-технічних робіт у виробництво від 19.05.2020 р.).

Запропонована автоматизована система захищена патентами України (113473 UA, МПК (2016.01) H 03 D 13/00, H 03 D 3/04 (2006.1); 116809 UA, МПК H 03 K 5/19 (2006.01). Її переваги над існуючими системами полягають у такому:

- збільшенні до чотирьох каналів вимірювань показників якості, що підвищує продуктивність, а також дає можливість проведення одночасного контролю, спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації у “ручному режимі” прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу одиничного та дрібносерійного багатомономенклатурного гнучкого виробництва прецизійних ПСЦС;

- зменшенні тривалості перехідного процесу від 2,7 до 4 разів залежно від значення початкових умов ПФАПЧ опорного генератора блока первинних перетворювачів контрольованих сигналів;

- підвищенні надійності та швидкодії контролю за рахунок оригінальної

структури пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, у якому рішення приймаються в кінці кожного періоду сигналу тактової частоти, який формується опорним генератором;

– сучасній системотехнічній реалізації апаратних складових системи, в тому числі й адаптивного цифрового фазового дискримінатора, що забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал, у вигляді програмного забезпечення середовища розробки Quartus Prime Lite Edition, яке використано для програмування програмованих логічних схем ALTERA EPM7128SLC84.

Підготовлено рекомендації для підприємств і організацій України, які затверджені вченою радою Інституту електродинаміки НАН України (протокол №6 від 27.04.2017 року), де вказується на необхідність підвищення якості контролю параметрів синхросигналів як складової управління ЄНСС. Запропонований системний підхід щодо підвищення продуктивності використання засобів вимірювань дає змогу застосовувати розроблену автоматизовану систему контролю як підсистему контролю у складі діючих інфокомунікаційних систем, електроенергетичних мереж та метрологічних систем частотно-часового забезпечення як в процесі введення їх в експлуатацію, так і під час технічного обслуговування.

Отримані в дисертації теоретичні й практичні результати використовуються у навчальному процесі під час викладання дисципліни «Спеціальні системи» у навчальному процесі кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБіП України.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійним науковим дослідженням. Здобувачеві належать постановка завдань і вибір методик дослідження, аналіз та узагальнення експериментальних результатів досліджень. З наукових праць, опублікованих у співавторстві, в дисертації використано лише положення, які є результатом особистої роботи здобувача.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення роботи та її результати доповідалися та обговорювалися на 17 міжнародних науково-

практичних конференціях, семінарах, симпозіумах: V Міжнародній науково-практичній конференції “Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості” (м. Одеса, 8-9 жовтня 2015 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції “Інфокомунікації – сучасність та майбутнє” (м. Одеса, 29-30 жовтня 2015 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК” (м. Київ, 17-19 грудня 2015 р.); XIV Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та інформатики» (TCSET'2016) (м. Львів-Славське, 23-26 лютого 2016 р.); VII Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації» (м. Кам'янець-Подільський, 21-22 квітня 2016 р.); XXVII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2016» (м. Тбілісі, Грузія, 23-27 травня 2016 р.); XXVIII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2018» (м. Брно, Чехія, 25-30 серпня 2016 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (м. Київ, 23-24 березня 2017 р.); II Міжнародній конференції з передових інформаційних та комунікаційних технологій (AICT-2017) (м. Львів, 4-7 липня 2017 р.); XXX Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2017» (м. Вільнюс, Латвія, 14-19 серпня 2017 р.); IEEE міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2017) (м. Одеса, 11-15 вересня 2017 р.); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «АВТОМАТИКА – 2017» (м. Київ, 13-16 вересня 2017 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS) (м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.); XIV Міжнародній конференції з передових тенденцій радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії (TCSET 2018) (м. Львів-Славське, 20-24 лютого 2018 р.); XXXII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2018» (м. Брно, Чехія, 23-31 вересня 2018 р.); IEEE науково-практичній конференції

«Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології» (PICS & T-2018) (м. Харків, 9-12 жовтня 2018 р.); III Міжнародній конференції з передових інформаційних та комунікаційних технологій (AICT-2019) (м. Львів, 2-6 липня 2019 р.); XV Міжнародній конференції з передових тенденцій радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії (TCSET 2020) (м. Львів-Славське, 25-29 лютого 2020 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 31 науковій праці, з яких п'ять статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, два патенти України на винахід і корисну модель, чотири монографії, рекомендовані вченою радою НУБіП України, 11 матеріалів і тез наукових доповідей та шість наукових доповідей, включених до зарубіжної наукометричної бази Scopus, одна рекомендація для підприємств і організацій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота, викладена на 284 сторінках комп'ютерного тексту, складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 168 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 2 таблицями та 75 рисунками. Список використаних джерел налічує 232 найменування.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ЧАСТОТНО-ЧАСОВИХ ПОКАЗНИКІВ ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ В УМОВАХ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ГНУЧКОГО ІНТЕГРОВАНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Аналіз характеристик пристроїв синхронізації з урахуванням умов їх багатоміністерського виробництва

В сучасних цифрових інформаційно-телекомунікаційних системах та мережах, енергетиці, метрології широкого розповсюдження знайшло використання пристроїв синхронізації цифрових сигналів (ПСЦС). Це положення пояснюється техніко-економічними обґрунтуваннями, за результатами яких виявляється більш ефективнішими, надійнішими і, що дуже важливо, дешевшими варіанти побудови засобів високих технологій є ті варіанти, в яких використовується принцип синхронізації. Можна навести багато прикладів, в яких пристрої синхронізації забезпечують організацію і виконання відповідних процесів в системі, а також створюють умови для її взаємодії з іншими системами, що скоординовані у часі.

Пристрої синхронізації призначені для формування відповідних синхросигналів, що використовуються для керування послідовністю операцій [1]. В цифрових інформаційно-телекомунікаційних системах, метрологічних засобах, на цифрових підстанціях енергетичних мереж SMART Grid технологій синхронізація має забезпечувати генерування високоякісної сітки частот з можливістю контролю та керування (якістю формування та передавання сигналів, обробкою несправностей, конфігурацією, безпекою тощо) [1-9].

Якість роботи пристроїв синхронізації визначає якість роботи телекомунікаційної системи, метрологічних засобів, енергетичних мереж і, перш за все, такі показники як продуктивність, достовірність отриманої інформації, швидкість входження в зв'язок. Це обумовлює необхідність пошуку

рішень щодо задоволення потреб в розробці ПСЦС з більш суворим і складним нормуванням їх технічних характеристик.

Найбільш важливими показниками якості пристроїв синхронізації (або, що те саме якості синхросигналів на виході), які використовуються в практичних застосуваннях, є характеристики точності та стабільності. Згідно Міжнародного словника по метрології [10] під стабільністю вимірювального приладу розуміють його здатність підтримувати свої метрологічні характеристики постійними у часі. Зважаючи на зазначене під поняттям **стабільність** пристрою синхронізації будемо розуміти наступне.

Означення 1. «*Стабільність пристрою синхронізації* – це його здатність формувати інтервал часу (наприклад, період) з постійним значенням (це значення може відрізнятися від номінального, але повинно залишатися постійним на протязі усього життєвого циклу пристрою синхронізації з орієнтовним терміном служби у 20 років)» [11]. Для малих інтервалів спостереження широко використовують термін короткотривалу, в іншому випадку говорять про довготривалу стабільність інтервалів часу або частоти. Границя між цими поняттями залежить від конкретного практичного застосування.

Згідно означення точності, що наведено в Міжнародному словнику по метрології [10], як міри близькості результату виміру до істинного значення величини, що вимірюється аналогічно можна рахувати, що точність ПСЦС – це міра відповідності його шкали часу шкалі міжнародного скоординованого часу (UTC). Натомість в інформаційних і телекомунікаційних технологіях під точністю ПСЦС розуміють наступне.

Означення 2. «*Точність пристроїв синхронізації* – це максимальна похибка часу або частоти синхросигналів на його виході, яку можна виміряти на протязі визначеного терміну служби, якщо інший термін не вказано» [11].

З метою формалізації показників якості, які будуть використовуватись в процесі досліджень, проектування, розробки, виробництва та введення в експлуатацію високоякісних ПСЦС виконаємо математичний аналіз сигналів

синхронізації, що формуються ними. Насамперед розглянемо автономний ПСЦС, на виході якого сигнал синхронізації формується у формі інтервалів часу, які запускаються деяким періодичним фізичним явищем, що протікає незалежно від зовнішніх впливів. Натомість, ведені ПСЦС призначені для формування генератором коливань синхросигналу, придатного для зміни інтервалів часу, наприклад, в режимі фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) від опорного (синхронізуючого) сигналу [1, 12].

Покладемо, що синхросигнал на виході ПСЦС описується рівнянням:

$$s(t) = A(t) \times \sin \Phi(t), \quad (1.1)$$

де $A(t)$ - миттєва амплітуда синхросигналу;

$\Phi(t)$ – повна фаза синхросигналу.

У разі побудови ПСЦС з використанням цифрових технологій можна також припустити постійність амплітуди синхросигналу, що дає можливість стверджувати про те, що інформаційним параметром часових характеристик сигналу $s(t)$ є повна фаза $P(t)$. Відомий зв'язок миттєвого значення частоти $\omega(t)$ з повною фазою $P(t)$ описується залежністю [1]

$$\omega(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dP(t)}{dt}. \quad (1.2)$$

Враховуючи те, що початкова частота ω_0 генератора ПСЦС визначається як алгебраїчна сума саме номінального значення частоти ω_n та зміщення частоти $\Delta\omega$, яке може мати місце на початковий момент часу, можна записати

$$\omega_0(t) = \omega_n(t) + \Delta\omega(t). \quad (1.3)$$

Випадкові відхилення миттєвого значення фази $p(t)$ та миттєвого значення частоти $p'(t)$, які використовуються для моделювання джерел фазового шуму генератора ПСЦС, за умови відсутності дрейфу частоти та початкового зміщення частоти $\Delta\omega$, обумовлюють наступний запис рівняння для визначення випадкової складової загальної миттєвої частоти [1]:

$$\omega_m(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{dp(t)}{dt}. \quad (1.4)$$

Надалі під поняттям точності частоти синхросигналу ПСЦС будемо

розуміти значення максимальної похибки частоти $\Delta\omega_{\max}$ відносно її номінального значення ω_n .

Для визначення випадкових флуктуацій частоти та часу синхросигналу ПСЦС використовуються дві функції $x(t)$ та $y(t)$, які пов'язані відповідно з відхиленням миттєвого значення фази $p(t)$ та частоти $p'(t)$ [1]:

$$y(t) = \frac{1}{2\pi\omega_n} \frac{dp(t)}{dt}, \quad (1.5)$$

$$x(t) = \frac{p(t)}{2\pi\omega_n}. \quad (1.6)$$

Проведений аналіз публікацій показує, що ці дві функції $x(t)$ та $y(t)$ покладено в основу цілого ряду функцій, які використовуються у математичних дослідженнях та статистичних обрахунках часових характеристик сигналів синхронізації ПСЦС.

1.1.1. Часові характеристики сигналів пристроїв синхронізації. Розглянемо функцію часу $T(t)$ сигналу синхронізації ПСЦС, яку визначають в книзі [1] через повну фазу $P(t)$ з рівняння

$$T(t) = \frac{P(t)}{2\pi\omega_n}, \quad (1.7)$$

а також функцію похибки часу $TE(t)$ як різницю між $T(t)$ і опорним (еталонним) сигналом $T_{\text{оп}}(t)$

$$TE(t) = T(t) - T_{\text{оп}}(t). \quad (1.8)$$

Функція інтервалу часу $TI_t(\tau)$ визначається виразом

$$TI_t(\tau) = T(t + \tau) - T(t), \quad (1.9)$$

котра «являє собою міру інтервалу часу τ , що починається у момент t , для досліджуваного сигналу (за умови, що є ідеальний опорний сигнал)» [1].

У разі вимірювання похибки часу на інтервалі τ , починаючи з моменту t , використовують функцію, яку називають функцією похибки інтервалу часу $TIE_t(\tau)$, що має наступне математичне визначення:

$$\begin{aligned} TIE_t(\tau) &= TI_t(\tau) - TI_{оп}(\tau) = [T(t + \tau) - T(t)] - [T_{оп}(t + \tau) - T_{оп}(t)] = \\ &= [T(t + \tau) - T_{оп}(t + \tau)] - [T(t) - T_{оп}(t)] = TE(t + \tau) - TE(t). \end{aligned} \quad (1.10)$$

У разі наявності ідеального опорного генератора останнє рівняння спрощується і має вид $TIE_t(\tau) = TI_t(\tau) - \tau$.

1.1.2. Оцінка частотних характеристик стабільності пристроїв синхронізації цифрових сигналів. Стабільність ПСЦС оцінюють на основі використання математичного апарата випадкових процесів відповідних параметрів $p(t)$, $x(t)$, $TE(t)$, $y(t)$ або $\omega(t)$. В монографії [1] зазначено «показники стабільності частоти, як в частотній, так і в часовій областях можна обчислити на основі вихідних даних, що представлені у вигляді відліків похибки часу або миттєвої частоти».

Що стосується стабільності частоти в частотній області, то основним способом дослідження генераторів було аналогове вимірювання функції спектральної щільності потужності безпосередньо в частотній області, так званим методом спектрального аналізу. Пізніше, а саме після впровадження вимірювальної техніки з високою роздільною здатністю більш привабливими стали методи вимірювань у часовій області. Практично у сучасних наукових, публікаціях рекомендаціях та стандартах цифрових телекомунікацій використовують показники стабільності, які обчислюють на основі безпосередньо виміряних у **часовій** області вимірів дискретних відліків похибки часу [1, 4, 13-28].

Незважаючи на це, спектральний аналіз шумів генераторів все рівно залишається одним із важливих способів вимірювання і оцінки характеристик стабільності ПСЦС. В цьому випадку для обчислення спектральної потужності шумів використовують цифрові аналізатори спектра на основі швидкого перетворення Фур'є для обробки отриманих в результаті вимірів в **часовій** області дискретних відліків даних за допомогою спеціалізованих часових лічильників [1].

1.1.3. Аналіз робочих характеристик та режимів роботи пристроїв синхронізації цифрових сигналів. Для опису робочих характеристик та режимів роботи ПСЦС необхідно спочатку встановити робочі границі змін частоти вхідного для пристрою синхросигналу. Ці границі, у разі використання в ПСЦС системи ФАПЧ, можна описати такими основними характеристиками, формулювання яких подано згідно прийнятих позначень в рекомендаціях МСЕ-Т [14-19]. Варто зауважити, що в стандартах і рекомендаціях для провідних ПСЦС містяться технічні вимоги лише для деяких характеристик.

Почнемо з характеристики $\Delta\omega_{H1}$ - полоса статичного стеження - це найбільші зміщення частоти вхідного опорного сигналу $\sin(t)$. Згідно визначення, наведеного в монографії [1] – «це найбільші зміщення частоти вхідного опорного сигналу $\sin(t)$ відносно номінальної частоти (приблизно частоти вільних коливань генератора), при яких ведений пристрій синхронізації продовжує залишатися в режимі стеження при дуже повільній зміні частоти (більш точно, за умови $d\omega_{in} / dt \rightarrow 0$) в усьому діапазоні частот».

Друга характеристика $\Delta\omega_{po}$ - полоса динамічного стеження. Також згідно визначення [1] – «це найбільш зміщені частоти ω_m вхідного опорного сигналу $\sin(t)$ відносно номінальної частоти (приблизно частоти вільних коливань генератора). В цій полосі ведений пристрій синхронізації продовжує залишатися в режимі стеження незалежно від швидкості зміни вхідної частоти в усіх діапазонах частот».

Третя характеристика $\Delta\omega_{L1}$ - полоса синхронізації. Аналогічно попередньому визначенню «це найбільші зміни частоти ω_m вхідного опорного сигналу відносно номінальної частоти (приблизно частоти вільних коливань генератора). В цій смузі ведений пристрій синхронізується» [1]. Остання, четверта характеристика, визначає полосу захвату $\Delta\omega_{p1}$, котра згідно вже цитованої монографії вказує «найбільше зміщені частоти ω_m вхідного опорного сигналу відносно номінальної частоти (приблизно частоти ω вільних

коливань генератора), за яких ведений ПСЦС входить в режим стеження незалежно від швидкості захвату вхідного сигналу» [1].

В залежності від характеристик вхідного синхронізуючого сигналу розрізняють три режими роботи ведених ПСЦС.

Перший режим - режим стеження або його ще називають режимом синхронізації, у цьому разі ведений ПСЦС знаходиться в синхронізмі та відстежує частоту вхідного синхросигналу. Частота в цьому режимі роботи ПСЦС знаходиться в межах смуг частот статичного і динамічного стеження ($\omega_n < \Delta\omega_{PO} < \Delta\omega_{HI}$). Важливим є те, що ведений ПСЦС може залишатися в режимі стеження ($\Delta\omega_{PO} < \omega_m < \Delta\omega_{HI}$), навіть тоді коли його частота виходить за межі динамічного стеження але швидкість такої зміни частоти не достатня для виходу з зазначеного режиму (зриву синхронізму).

Другий режим - режим вільних коливань ПСЦС. В цей режим він може перейти, коли вхідний синхросигнал втрачений або його частота вийшла за межі смуги статичного стеження. Тоді внутрішній генератор ПСЦС починає працювати автономно. У цьому випадку внутрішній генератор ПСЦС формує частоту вільних коливань ω_F бо є відсутнім вплив належної керуючої дії.

Третій режим - режим утримання частоти або його ще називають режимом роботи з «запам'ятованим» значенням частоти і фази. В цьому режимі, як у режимі вільних коливань, ПСЦС починає працювати автономно з частотою та фазою синхросигналу власного генератора, за рахунок збереження на вході керування генератора «запам'ятованого» останнього значення величини керуючої дії, яке було сформовано до зазначеної ситуації.

Як бачимо з описаних в даному підрозділі, характеристик точності, стабільності та можливих режимів роботи, в своїй більшості прецизійних багатоміноміклатурних пристроїв синхронізації, а також часові, частотні характеристики їх сигналів вимагають для проведення повноцінного й достовірного контролю якості ПСЦС оцінок значної кількості показників.

Оскільки, показники якості визначаються за результатами вимірів сигналів, що формуються пристроями синхронізації, надалі слід провести аналіз методів розрахунку та способів їх оцінок.

1.2. Аналіз методів розрахунку та способів оцінки показників якості ПСЦС з урахуванням умов їх багатомономенклатурного виробництва та експлуатації у складі сучасних цифрових систем

До початку аналізу відмітимо те, що у сучасних цифрових інформаційно-телекомунікаційних системах, цифрових підстанціях електроенергетичних систем мають справу в основному з часовими відхиленнями на заданому інтервалі спостереження. Зважаючи на те, що нестабільність генераторів ПСЦС, а саме параметри фаза і частота, мають часові зміни, то відповідно оцінка у часовій області параметрів синхросигналів полягає у тому, щоб виміряти зміни, які виникають на визначеному інтервалі часу τ . З урахуванням того, що фаза і частота реальних генераторів є випадковими величинами, то для статистичної інтерпретації результатів вимірювань їхні значення повинні бути усереднені за часом [1].

1.2.1. Оцінка частотних характеристик стабільності ПСЦС у часовій області. Визначені у рівняннях (1.4) і (1.5) відповідно значення миттєвої частоти $\omega(t)$ і відносної частоти $y(t)$ спостерігати практично неможливо. Будь яке вимірювання частоти генератора виконується за обмежений часовий інтервал. Середнє значення частоти, яке вимірюється на інтервалі спостереження τ – це величина, що безпосередньо відноситься до результатів експерименту. Усереднені відліки нормованої або відносної частоти $y(t)$ визначають використовуючи наступний вираз [1]:

$$\bar{y}_k(\tau) = \langle y(t_k) \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k+\tau} y(t) dt, \quad (1.11)$$

де t_k – момент початку вимірів. У формулі (1.11) кутові дужки означають усереднення за ансамблем дискретних значень відповідних відліків $y(t_k)$.

З рівняння (1.5) можна отримати наступний вираз:

$$\bar{y}_k(\tau) = \frac{\varphi(t_{k+\tau}) - \varphi(t_k)}{2\pi\nu_n\tau} = \frac{x(t_{k+\tau}) - x(t_k)}{\tau}. \quad (1.12)$$

Зрозуміло, що перша різниця y_k послідовності відліків $\{x_k\}$, яка отримана в процесі вимірів з періодом дискретизації T_D , має вигляд:

$$y_k = \frac{x_{k+1} - x_k}{T_D}. \quad (1.13)$$

Очевидно, що вона в дискретному часі може представляти першу похідну $y(t) = x'(t)$ у неперервному часі. Відповідно друга різниця z_k має вигляд:

$$z_k = \frac{y_{k+1} - y_k}{T_D} = \frac{x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k}{T_D^2}. \quad (1.14)$$

Очевидно, що вона в дискретному часі також може представляти собою другу похідну $z(t) = y'(t) = x''(t)$.

Відповідно до методів статистичного аналізу статистичною оцінкою нестабільності сигналу ПСЦС може бути обрана класична дисперсія σ^2 , а також стандартне відхилення σ . У разі ергодичності $y(t)$ з нульовим середнім, її дисперсія дорівнює:

$$\sigma^2[\bar{y}_k] = \langle \bar{y}_k^2 \rangle. \quad (1.15)$$

Для M -вибіркової дисперсії виконується усереднення ансамблю з кінцевого числа M відліків \bar{y}_k ($k = 1, 2, \dots, M$), котрі визначено раніше. Відлік вимірюють починаючи з моменту t . Відліки вимірюють через рівні проміжки часу дискретизації $T_D : t_{k+1} = t_k + T_D$.

Запропонована Аланом у 1966 році [1] вибіркова дисперсія обчислюється за двома суміжними відліками з нульовим "мертвим часом" $T - \tau = 0$. Дисперсію Алана (ADEV) визначають наступною математичною залежністю від періоду спостереження τ :

$$\langle \sigma_y^2(2, \tau, \tau) \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^2 \left(\bar{y}_i - \frac{1}{2} \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j \right)^2 \right\rangle. \quad (1.16)$$

Двовибіркова дисперсія Алана має більш компактний вигляд [1]:

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \right\rangle \quad (1.17)$$

За скінченим числом відліків \bar{y}_k , котрі отримано скінчений час можна отримати лише оцінку $\sigma_y^2(\tau)$. Це означає, що вона статистично не визначена.

Широке застосування отримала наступна оціночна формула [1]:

$$\sigma_y^2(\tau, N) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2. \quad (1.18)$$

Варто зауважити на те, що виходячи з практичних міркувань стосовно вимірювання стабільності частоти ПСЦС телекомунікаційних систем процеси $TE(t)$ та $x(t)$ ототожнені [1]. Відліки похибок часу $TE(t_k)$ розглядають як відліки випадкового відхилення часу $x(t_k)$. На основі послідовності із отриманих N відліків, що виміряні з наперед заданим періодом дискретизації τ_0 на інтервалі виміру $T_B = (N-1)\tau_0$ за початкового значення моменту часу спостереження t_0 , величина похибок часу $TE(t_k)$ визначається наступним рівнянням:

$$x_k = x(t_0 + (k-1)\tau_0), \quad (1.19)$$

де $k = 1, 2, \dots, N$.

Отже, з врахуванням прийнятого ототожнення, визначення дисперсії Алана ADEV може бути виконано згідно наступної аналітичної залежності:

$$ADEV(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2\tau^2} \left\langle [x(t+2\tau) - 2x(t+\tau) + x(t)]^2 \right\rangle}. \quad (1.20)$$

Можна оцінити дисперсію Алана ADEV за результатами вимірювань N рівномірно розташованих дискретних відліків $x(t)$ величиною, що залежить від періоду спостереження τ за допомогою формули для ADEV($n\tau_0$) [1]:

$$ADEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^2\tau_0^2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i)^2}, \quad (1.21)$$

де $n = 1, 2, \dots, \left\lceil \frac{(N-1)}{2} \right\rceil$;

$x(t)$ – функція похибки у часі;

$\{x_i=x(i\tau_0), i=1,2,\dots,N\}$ – послідовність N рівномірно розташованих дискретних відліків $x(t)$;

τ_0 – період дискретизації;

$\tau=n\tau_0$ – період спостереження.

Розглянемо ще одну аналітичну залежність, котра використовується для статистичної обробки вимірювань характеристик синхросигналів ПСЦС, а саме модифіковану дисперсію Алана (MDEV):

$$\begin{aligned} \text{Mod}\sigma_y^2(n\tau_0) &= \frac{1}{2} \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_{i+n} - \bar{y}_i) \right]^2 \right\rangle = \\ &= \frac{1}{2n^2\tau_0^2} \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{j+2n} - 2x_{j+n} + x_j) \right]^2 \right\rangle, \end{aligned} \quad (1.22)$$

де τ_0 - період дискретизації, інтервал спостереження рівний $\tau = n\tau_0$, а відліки випадкового відхилення часу $x(t_k)$ позначені x_k [1].

Мотивом розробки модифікаційної дисперсії Алана стала відносно слабка розрахункова здатність дисперсії Алана по відношенню до білого фазового шуму і фазовому фліккер-шуму [1]. Визначення для дисперсії Алана $ADEV$ матиме вид наступної аналітичної залежності:

$$MDEV(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{2(n\tau_0)^2} \left\langle \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle}. \quad (1.23)$$

Можна оцінити модифіковану дисперсію Алана MDEV за результатами вимірювань N рівномірно розташованих дискретних відліків $x(t)$ величиною, що залежить від періоду спостереження τ та n за допомогою формули для MDEV($n\tau_0$):

$$MDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{2n^4\tau_0^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, \quad (1.24)$$

де $n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor$ [1].

Для оцінки стабільності часу безпосередньо в одиницях часу, а не в

безрозмірному представленні, була запропонована дисперсія часу, яка пов'язана з $MDEV(n\tau_0)$ й більш відома під назвою TVAR:

$$\sigma_x^2(\tau) = \frac{\tau^2}{3} Mod \sigma_y^2(\tau). \quad (1.25)$$

Очевидно, що корінь квадратний з дисперсії часу TVAR - це $\sigma_x(\tau)$, яка має назву девіація часового інтервалу (*Time Deviation* - *TDEV*). Девіація *TDEV* визначається наступною аналітичною залежністю від періоду дискретизації τ_0 та n :

$$TDEV(n\tau_0) = \sqrt{\frac{1}{6n^2} \left\langle \left[\sum_{i=1}^n (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2 \right\rangle}. \quad (1.26)$$

Можна оцінити девіацію часового інтервалу (*TDEV*) за результатами вимірювань N рівномірно розташованих дискретних відліків $x(t)$ величиною, що залежить від періоду спостереження τ_0 та n за допомогою формули:

$$TDEV(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{6n^2(N-3n+1)} \sum_{j=1}^{N-3n+1} \left[\sum_{i=j}^{n+j-1} (x_{i+2n} - 2x_{i+n} + x_i) \right]^2}, \quad (1.27)$$

де $n = 1, 2, \dots, \left\lfloor \frac{N}{3} \right\rfloor$ [1].

Важливим є те, що девіація часового інтервалу (*TDEV*) враховує всі головні типи шумів, які впливають на реальні сигнали синхронізації ПСЦС.

1.2.2. Оцінка часових характеристик стабільності ПСЦС у часовій області. Відомою аналітичною залежністю статистичної обробки результатів вимірювань характеристик синхросигналів ПСЦС є середньоквадратична помилка часового інтервалу (*TI Erms*), яку визначають за аналітичною залежністю:

$$TIErms(t; \tau) = \sqrt{E \{ [TE(t + \tau) - TE(t)]^2 \}}, \quad (1.28)$$

де оператор очікування $E \{ [TE(t + \tau) - TE(t)]^2 \}$ означає усереднення за ансамблем [1, 4, 9, 11, 12].

Середньоквадратичну помилку $TI_{E rms}$ сигналу ПСЦС визначають за наступною аналітичною залежністю від періоду спостереження τ :

$$TI_{E rms}(\tau) = \sqrt{\left\langle [x(t + \tau) - x(t)]^2 \right\rangle}. \quad (1.29)$$

Середньоквадратичну помилку $TI_{E rms}$ сигналу ПСЦС можна оцінити за допомогою аналітичної залежності від періоду дискретизації τ_0 та n за формулою:

$$TI_{E rms}(n\tau_0) \cong \sqrt{\frac{1}{N-n} \sum_{i=1}^{N-n} (x_{i+n} - x_i)^2}, \quad (1.30)$$

де $n = 1, 2, \dots, (N - n)$ [1].

Важливою залежністю статистичної обробки результатів вимірювань сигналу ПСЦС є максимальне відхилення часового інтервалу (Maximum time interval error - $MTIE$), котру визначають за допомогою формули

$$MTIE(\tau) = \max_{-\infty \leq t_0 \leq \infty} \left(\max_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [x(t)] - \min_{t_0 \leq t \leq t_0 + \tau} [x(t)] \right), \quad (1.31)$$

а її оцінку $MTIE$ можна зробити за наступною формулою:

$$MTIE(n\tau_0) \cong \max_{1 \leq k \leq N-n} \left(\max_{k \leq i \leq k+n} [x_i] - \min_{k \leq i \leq k+n} [x_i] \right), \quad (1.32)$$

де $n = 1, 2, \dots, (N - 1)$ [1, 4, 9, 11, 12].

Потрібно враховувати важливу особливість вимірювань показників якості синхросигналів ПСЦС, яка полягає у тому, що вони повинні виконуватись за тривалий інтервал часу. Підтвердженням цієї тези може бути, наприклад, нормована величина на показник $MTIE$ за стандартом ETS 300 462-2, яка визначається за інтервал вимірювань включно до 100000 секунд, що приблизно складає одну добу [19]. Очевидно такі вимірювання повинні виконуватись автоматично або автоматизовано за допомогою засобів комп'ютерної техніки.

Підсумовуючи результати проведеного аналізу можна заключити наступне.

1. Оцінка часових характеристик стабільності ПСЦС виконується у **часовій** області (формули для розрахунку TIE_{rms} та $MTIE$).
2. Оцінка частотних характеристик стабільності ПСЦС виконується також у **часовій** області (формули для розрахунку $ADEV$, $MDEV$ та $TDEV$).

В монографії [1] вказано на те, що «Оцінка стабільності частоти в частотній області, згідно сучасних рекомендацій та стандартів для цифрових інформаційно-телекомунікаційних систем виконується на основі показників, які обчислюють на основі безпосередньо виміряних у **часовій** області вимірів дискретних відліків похибки часу». У цьому разі пропонується наступний алгоритм. Після старту починаються виміри ТЕ, з інтервалом дискретизації τ_0 на інтервалі вимірів $T = (N-1)\tau_0$, починаючи з моменту часу t_0 . Виконується накопичення послідовності даних, яка має вид $x_k = x(t_0 + (k-1)\tau_0)$ для $k=1,2,\dots,N$. Опісля завершення вимірювань рекомендується обчислювати показники стабільності за допомогою чисельних оцінок які встановлені у рекомендаціях МСЕ-Т (ITU-T) [15-18] і стандарті ETSI [19]. Такий підхід забезпечує уніфікацію характеристик та однозначність у порівнянні результатів проведених вимірювань і виконаних обчислень.

Зазначеними рекомендаціями МСЕ-Т і стандартом ETSI визначено п'ять показників, що розраховуються за відповідними формулами. З цієї множини використовують лише два показника, а саме $TDEV$ і $MTIE$, які мають нормовані значення, що залежать від часу.

Узагальнюючи проаналізовані способи оцінки показників якості ПСЦС з урахуванням умов їх багатоміноміклатурного виробництва та експлуатації у

складі цифрових інформаційно-телекомунікаційних, електроенергетичних, метрологічних систем [1, 3, 4, 11, 12, 14-19, 29-34] можна зробити наступні висновки.

По-перше, для визначення показників якості та робочих характеристик ПСЦС необхідно виконувати на основі безпосередньо виміряних у часовій області дискретних відліків похибки часу похибок часу $TE(t_k)$. По-друге, в процесі визначення показників якості обчислювальні засоби повинні забезпечувати розрахунки значень TIE , TIE_{rms} , $MTIE$, $ADEV$, $MDEV$ та $TDEV$, а також характеристики миттєвого значення частоти її флуктуації та режиму роботи ПСЦС. По-третє, визначення показників якості полягає у необхідності проведення автоматичних або автоматизованих довготривалих вимірювань ПСЦС, що вимагає застосування сучасних засобів комп'ютерної техніки та IP-технологій.

На основі вищенаведеного аналізу показників якості та робочих характеристик ПСЦС можна зробити висновок, що первинними їх показниками є безпосередньо виміряні у часовій області значення дискретних відліків похибки часу. Оскільки, показники якості ПСЦС, які контролюються в умовах експлуатації у складі сучасних цифрових інформаційно-телекомунікаційних, метрологічних, електроенергетичних систем, що вимагає широкомасштабної автоматизації з застосуванням сучасних засобів комп'ютерної техніки та IP-технологій, а також з урахуванням особливостей їх виробництва, яке обумовлено багатомовністю ПСЦС, надалі слід розглянути структури системи керування гнучких інтегрованих виробничих систем.

1.3. Аналіз структури системи керування гнучких інтегрованих систем багатомоделного виробництва ПСЦС як об'єкту автоматизації

Враховуючи особливості побудови ПСЦС сучасних інформаційно-телекомунікаційних метрологічних, електроенергетичних та інших високотехнологічних систем, а також вимоги до їх показників якості, з метою підвищення ефективності багатомоделного виробництва пристроїв синхронізації, за доцільне є використання автоматизації циклу "дослідження - проектування - технологічна підготовка - виробництво". Така послідовність, в концепції гнучких інтегрованих систем (ГІС), забезпечує нові емерджентні властивості, обумовлені організацією взаємодії дослідника, конструктора і технолога на основі загальної бази знань, що забезпечується засобами ІТ-технологій, обчислювальної техніки. ГІС виступає основою поєднання «системи автоматизованого проектування (САПР) і автоматизованої системи технологічної підготовки виробництва (АСТПВ), що забезпечує інтеграцію предметних галузей виробів і самого виробничого середовища» [35].

В кожній з підсистем ГІС діють, в основному, закони управління зі зворотним зв'язком. Функціонування підсистем спрямоване на досягнення бажаних динамічних і економічних показників виробництва. Отже, «взаємодія автоматизованих підсистем та їх функціонування пов'язане з процесами передавання інформації, а саме інформаційні потоки, що виходять від верхніх ієрархічних рівнів спрямовані до нижніх рівнів, містять директиви управління, виконання яких елементами і підсистемами призводить до бажаних цілеспрямованих змін станів обладнання і матеріальних потоків» [35]. Інформаційні потоки, що виходять від нижніх ієрархічних рівнів спрямовані до верхніх рівнів, переносять сигнали зворотного зв'язку про хід виробництва, про оцінки характеристик функціонування елементів і підсистем, про стан матеріальних потоків і обладнання [35]. Узагальнена схема організації багаторівневої ієрархічної системи керування ГІС наведена на рис. 1.1.

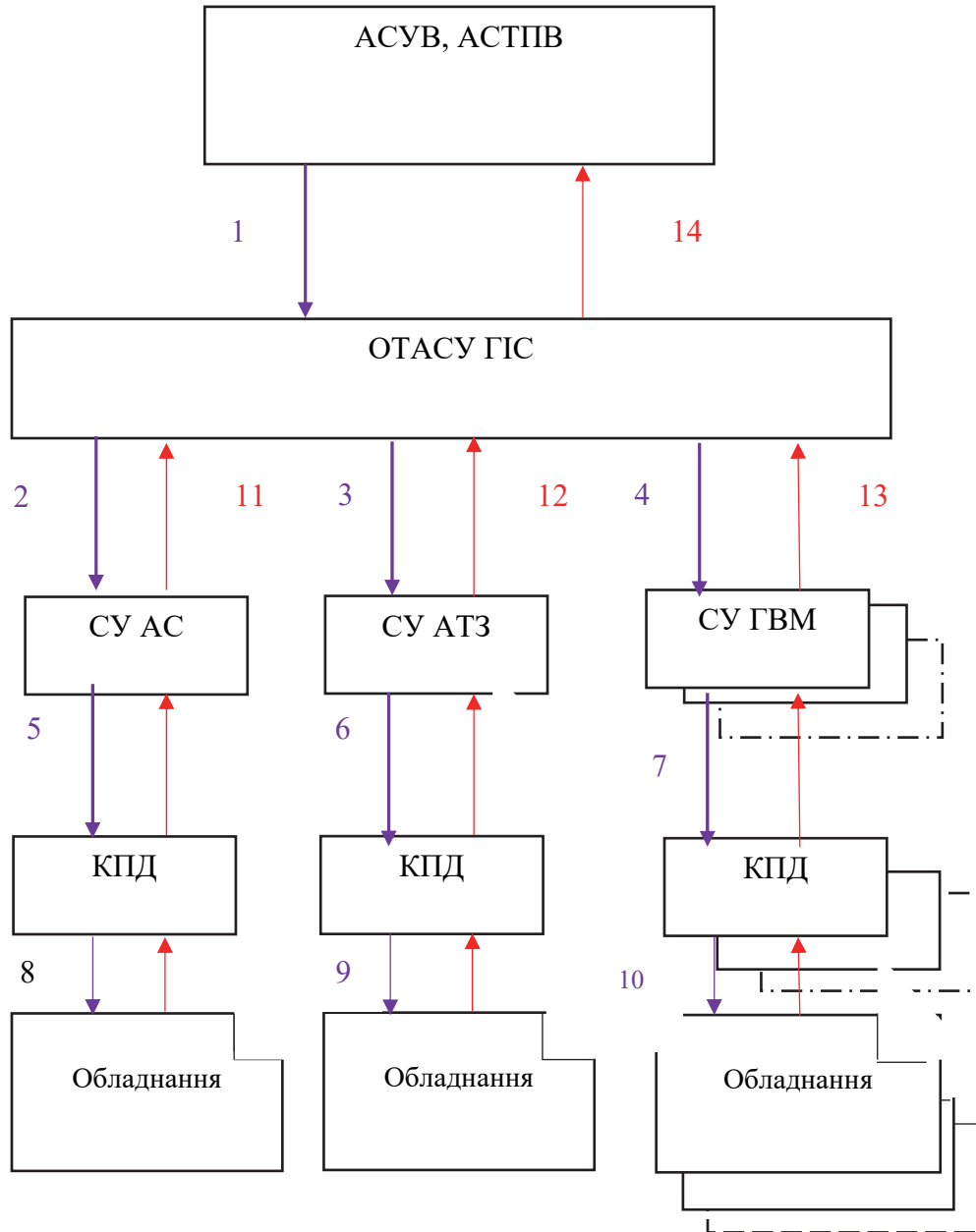


Рис. 1.1. Узагальнена схема організації багаторівневої ієрархічної системи керування ГІС

АСУВ – автоматизована система управління виробництвом;
 АСТПВ – автоматизована система технологічної підготовки виробництва;
 ОТАСУ ГІС - організаційно-технологічна автоматизована система управління гнучких інтегрованих систем;
 ГВС – гнучка виробнича система;
 СУ АС - система управління автоматизованим складом;
 СУ АТЗ - система управління автоматизованими транспортними засобами;
 СУ ГВМ - система управління гнучкими виробничими модулями;
 КПД – керуючі пристрої і датчики.

Лінія зворотного зв'язку від СУ ГВМ ієрархічної системи керування ГІС, що позначена цифрою 13, відображає по суті потік інформації, що стосується стану виконання виробничої програми, обладнання та ін. Інформація зворотного зв'язку, що формується в СУ ГВМ надходить до організаційно-технологічної автоматизованої системи управління ГІС. Лінія зв'язку, що позначена цифрою 14, також зворотного – це інформація, що надходить від організаційно-технологічної автоматизованої системи управління до АСУВ, про виконання технологічного завдання, стан елементів і підсистем ГВС.

Інші інформаційні лінії (лінії інформаційного зв'язку, що позначені цифрами 5, 6, 7) деталізують передані команди управління і представляють собою програми для мікроконтролерів керуючих пристроїв (МКП). Декодовані МКП керуючі команди (лінії інформаційного зв'язку, що позначені цифрами 8, 9, 10) поступають до виконавчих механізмів відповідного обладнання. В результаті, як це зазначається в підручнику [35], «вказані зв'язки та інформаційні потоки, які циркулюють в ГІС використовуються для створення замкнутих контурів керування, підсистем збору (вимірювань), обробки, транспортування (передавання) і відображення (візуалізації) інформації, а також підсистем, що включають автоматизовані робочі місця диспетчерів, технологів і навіть економістів, що організовують виробництва».

Система оперативного управління (ОУ) є невід'ємною частиною гнучкої інтегрованої системи. В структурі ГІС система ОУ міститься в якості підсистеми [36], як це показано на фрагменті узагальненої структурної схеми, що наведена на рис. 1.2. В дисертаційній роботі [36] також зазначається, що «основним керуючим компонентом ГІС є система оперативно-технологічного контролю та автоматичного керування, яку можна розділити за задачами, що вирішуються на систему ОУ та систему автоматизованого керування технологічним процесом. Відповідно керуючою структурою в ГІС є система оперативно-диспетчерського керування, що реалізує принцип керування за зворотним зв'язком».

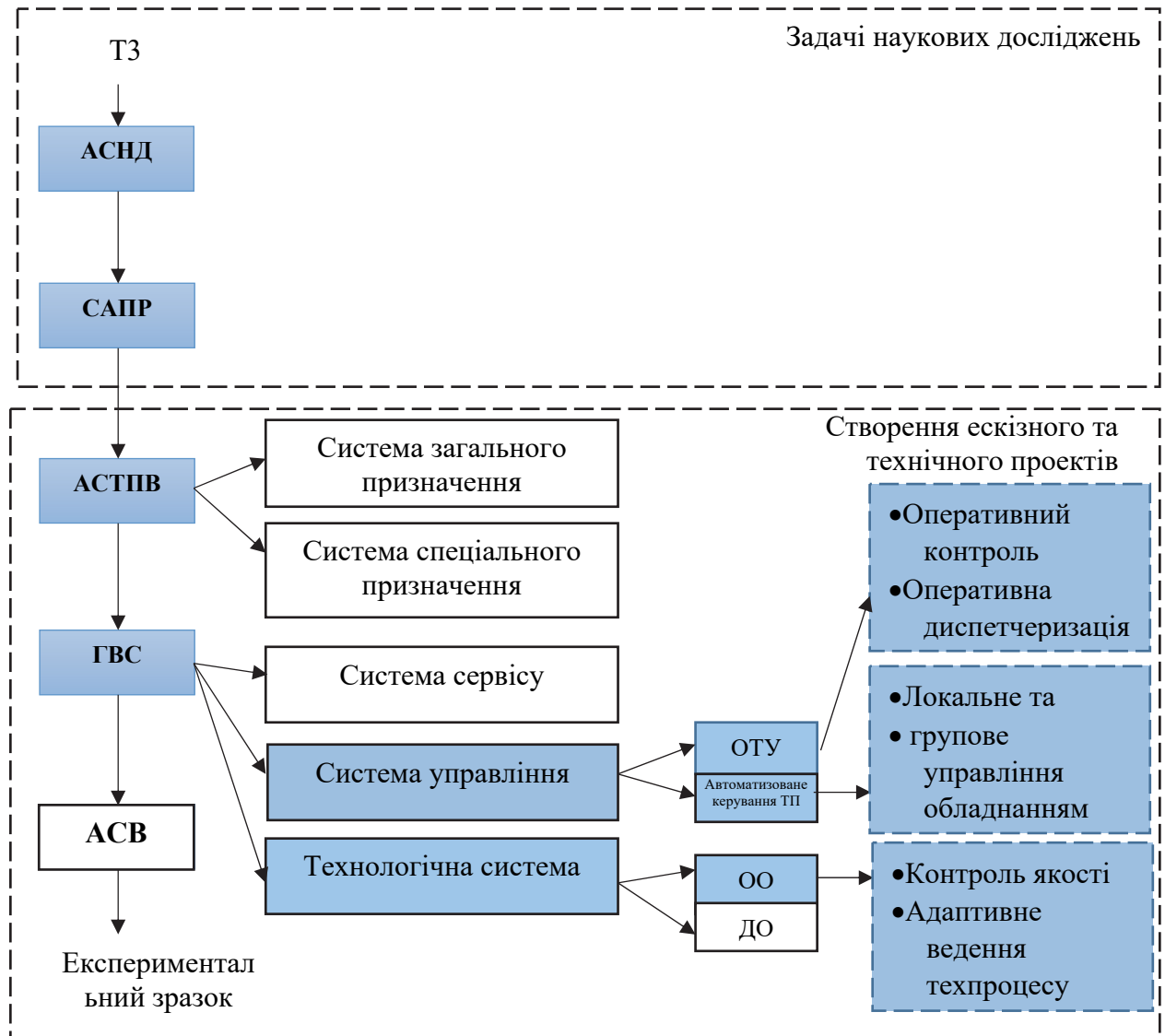


Рис. 1.2. Контроль якості в узагальненій структурі ГІС

- АСНД - автоматизована система наукових досліджень;
 САПР – система автоматизованого проектування;
 АСТПВ – автоматизована система технологічної підготовки виробництва;
 ГВС – гнучка виробнича система;
 ОТУ – організаційно-технологічне управління;
 АСУ ТП - автоматизована система управління технологічними процесами;
 ОО – основне обладнання;
 ДО - допоміжне обладнання;
 АСВ - автоматизована система керування виробництвом.

Зазначена система ОУ є складним програмно-апаратним комплексом, функціонування якого відбувається в масштабах всього виробництва, а також в межах його окремих підрозділів.

Автоматизована система керування технологічним процесом (ТП) - це «автоматизована система, яка являє собою комплекс програмних і технічних засобів і призначена для вироблення та реалізації керуючої дії на технологічний об'єкт керування згідно з прийнятими критеріями керування» [38-43].

Технологічним об'єктом керування в ГПС є технологічні процеси переробки вихідної сировини, проміжного продукту в готовий продукт [39-44]. До складу автоматизованої системи керування ТП належать підсистеми, які призначені для керування неперервним виробництвом, автоматизованими поточними лініями, комплексними лініями агрегатів, системи з числовим програмним управлінням, які об'єднуються в модулі і разом з транспортувальними системами утворюють гнучкі виробничі системи (ГВС) [39, 40]. Загалом автоматизована система керування ТП це «сукупність апаратно-програмних засобів, які здійснюють контроль і керування технологічними процесами; підтримують зворотний зв'язок; впливають на хід процесу при відхиленні його від заданих параметрів; забезпечують регулювання і оптимізацію керованого процесу» [43].

Інформаційні функції автоматизованої системи керування – це «функції системи по збору, транспортуванню (передаванню), обробці й наданню інформації про стан керування технологічним об'єктом операторові або на наступну обробку в блок формування керуючих впливів» [40, 45, 46].

Автоматизована система керування забезпечує оперативний контроль та регулювання ходу виробництва (диспетчеризація), а також вона повинна носити і попереджувальний характер [35]. Отже до функцій диспетчеризації входять задачі виявлення і прогнозування можливих відхилень на основі оперативної інформації результатів контролю.

В процесі оперативного контролю здійснюється вимірювання показників якості пристроїв, оцінюється працездатність технологічного обладнання,

контролюється правильність виконання тестувань і налагодження пристроїв та інше. Для діагностування стану пристроїв, що виробляються, а також виробничого обладнання використовується в основному цифрова інформація, що отримана від різних первинних перетворювачів, які виконують функції цифрових датчиків. Отримана цифрова інформація передається і порівнюється із заздалегідь заданими критичними значеннями, наприклад, шаблонами відповідних стандартів. Заздалегідь встановлені технічні вимоги можуть бути представлені у вигляді зразкового (гіпотетичного) сигналу або у вигляді переліку певних показників та їх номінальних (конкретних) значень із зазначенням граничних меж допуску, можливо з заданою ймовірністю. Граничні значення областей стану контрольованого параметра, прийнято називати нормами. У разі перевищення зазначених норм або видається повідомлення оператору, або аварійно припиняється робота технологічного обладнання [47].

До комплексу технічних засобів оперативного контролю показників якості пристроїв синхронізації обов'язково входять вимірювальні прилади, включно високоточні. На основі оперативної інформації, що отримується від цих приладів, формується відповідна множина дій, які необхідно реалізувати для виправлення дефектів в процесі виробництва пристроїв синхронізації.

Варто зауважити, що в умовах серійного виробництва основними параметрами у разі диспетчеризації служать терміни запуску і випуску партії пристроїв, рівень запасів і рівень забезпеченості виготовлення, натомість, в одиничному і дрібносерійному виробництві контролюються терміни виконання відповідних етапів робіт, а також оперативна підготовка саме до виконання [35].

Дослідженню і синтезу багатоміжкласових технологічних систем високої продуктивності, який створює умови для подолання протиріччя між продуктивністю та гнучкістю таких систем на основі формалізованих алгоритмічних процедур, присвячена дисертаційна робота [48]. В цій роботі для забезпечення продуктивності багатоміжкласових механообробних

виробництв виявлено множини способів підвищення продуктивності та створено на цій основі метод спрямованого синтезу технологічних способів для таких виробництв.

Автоматизації досліджень і контролю параметрів п'єзокерамічних резонансних датчиків в технологічному процесі їх дослідного виробництва присвячена дисертаційна робота [49], а технологічне забезпечення якості гнучких структур у виробках електронної техніки досліджується в роботі [50].

На підставі виконаного аналізу є доцільним проведення досліджень щодо підвищення продуктивності, швидкодії та надійності технологічного процесу контролю показників якості одиничного та дрібносерійного багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів, що знайшли широке застосування в пристроях електронної техніки.

В даному підрозділі були розглянуті структурні особливості системи керування ГІС та автоматизованої системи керування технологічним процесом, а також інформаційні функції автоматизованої системи керування ТП по збору (з використанням вимірювальних засобів), передаванню, обробці й формуванню вхідних даних, на базі яких приймаються рішення з оперативного управління виробничим процесом.

Як бачимо з описаного в даному розділі, інформаційні функції ГІС варіюються в залежності від принципу та способу керування, кількості підсистем, рівнів підпорядкованості та виду виробництва. Розгляд абсолютно всіх інформаційних функцій вимагає проведення широкого комплексу досліджень, що виходить далеко за межі однієї дисертаційної роботи, тому в даній роботі вирішено накласти деякі обмеження на область досліджень, а саме:

– розглядатимуться інформаційні функції автоматизованої системи керування ТП пов'язані з цифровим вимірюванням, комп'ютерною обробкою даних з використанням ІР-технологій та контролем показників якості;

– проведення досліджень вестиметься в рамках одиничного та дрібносерійного виробництва ПСЦС як найбільш поширеного і використовуваного на сьогодні.

В зв'язку з вищеописаними обмеженнями, можна зменшити кількість задач, що розглядатимуться в даній роботі до задач дослідження інформаційних функцій ГІС, які забезпечуються підсистемою вимірювань та контролю показників якості багатомономенклатурного виробництва ПСЦС. Задачі підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості є актуальними для одиничного та дрібносерійного багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації.

1.4. Аналіз підсистеми контролю та вимірювань показників якості ПСЦС

Важливою складовою автоматизованого керування технологічними процесами багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації в концепції гнучких інтегрованих систем є процеси контролю та вимірювань показників якості синхросигналів [3, 5, 8, 9, 35, 37, 44, 51]. У разі практичної реалізації зазначених заходів постає задача проведення великої кількості вимірювань. Зазначене обумовлює проблемну ситуацію, яка пов'язана з розробкою засобів вимірювань, що дають змогу отримувати інформацію про результати вимірювань без участі оператора або диспетчера, тобто в автоматичному режимі.

Автоматизація процесу вимірювань забезпечує суттєві переваги, серед яких можна виділити наступні: виконання тривалих, багаторазових вимірів; одночасне вимірювання значного числа величин, вимірювання показників швидкоплинних процесів, вимірювання показників якості, що характеризуються великими масивами інформації з подальшою статистичною обробкою [5]. В книзі [52] зазначається на те, що: «Автоматизація вимірювань підвищує продуктивність операторів, вимагає від них більш високого рівня знань не тільки засобів вимірювальної техніки, а й тих завдань, які вирішуються

при прийомі і обробці вимірювальної інформації, вміння закласти оптимальну програму вимірювань і дати правильне тлумачення результатів вимірювання».

Під терміном «автоматизація» розуміється сукупність методичних, технічних і програмних засобів, що забезпечують проведення процесу вимірювання без безпосередньої участі людини [51, 53, 54]. Натомість вимірювання, за яких зворотний зв'язок керування зазначеним процесом здійснюється без участі людини називають автоматичним. Якщо оператор є однією з ланок у ланцюзі отримання вимірювальної інформації - мова йде про автоматизовані виміри [51]. В нормативному документі [55] під автоматизованою системою розуміється «організаційно-технічна система, що реалізує інформаційну технологію і об'єднує обчислювальну систему, фізичне середовище, персонал та інформацію, яка обробляється». Щодо автоматизованої системи керування, то ДСТУ 2226-93 [56] визначає її як «автоматизовану систему, що призначена для автоматизації процесів збирання та пересилання інформації про об'єкт керування, її перероблення та видачі керівних дій на об'єкт керування».

Автоматизована система керування ТП у своїй структурі передбачає використання автоматизованої підсистеми контролю й випробувань, яка згідно ДСТУ 2226-93 призначена для «автоматизації проведення випробувань промислової продукції та контролю її показників на відповідність нормативно-правовим документам» [56].

Спочатку розглянемо комбіновану аналого-цифрову інформаційну структуру автоматизованої системи керування ТП, яка визначається функціональним призначенням самої системи і характером зв'язків між підсистемами. Зазначені підсистеми вирішують загальну задачу керування об'єктом щодо досягнення поставленої цілі. На рис. 1.3 представлена інформаційна структура аналого-цифрової автоматизованої системи керування, де можна виділити як аналогові, так і цифрові потоки інформації, що генеруються в автоматичному режимі [39]. Цифрою 1 та 2 на рис. 1.3 позначені аналогові сигнали, а цифрові сигнали, що використовуються для взаємодії,

позначено цифрою 3. Двосторонній обмін інформацією для взаємодії між оператором-технологом та інформаційно-вимірювальною і керуючою підсистемами позначено цифрами 4 і 5, а взаємодія оператора-технолога з об'єктом керування в ручному режимі - цифрою 6.

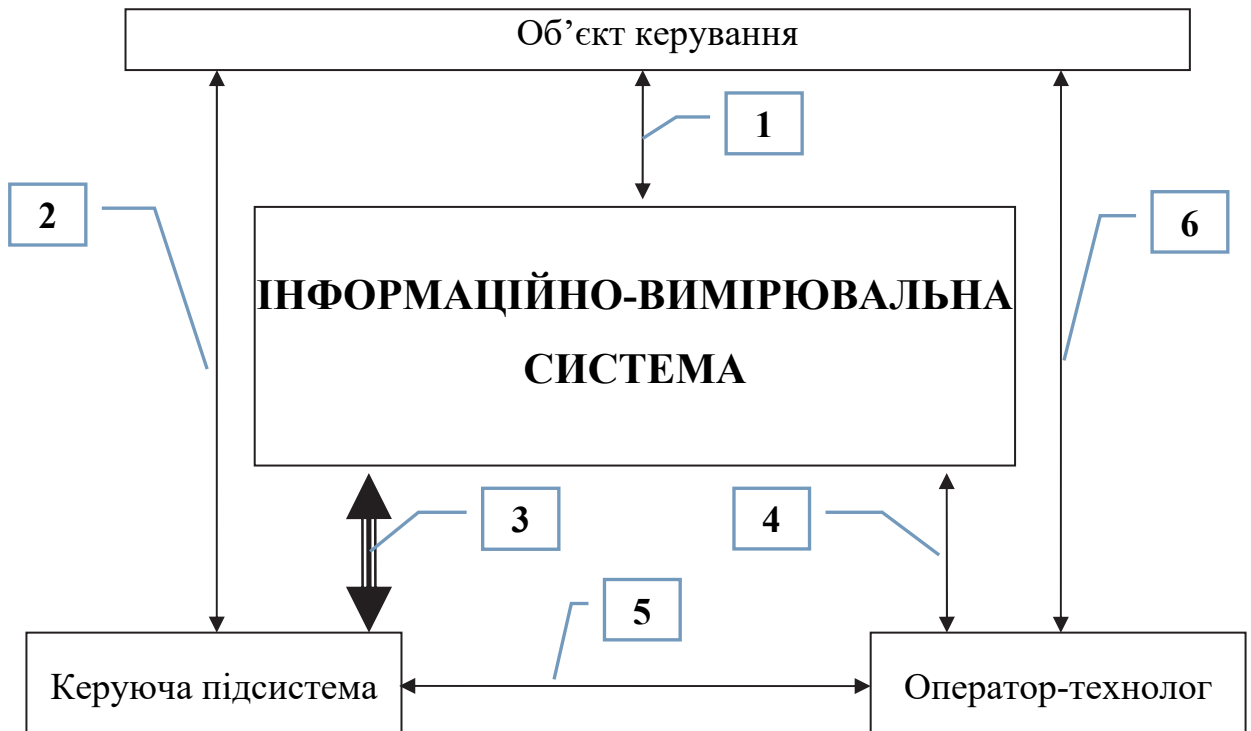


Рис. 1.3. Структура потоків інформації комбінованої аналого-цифрової автоматизованої системи керування

Узагальнену структурну схему автоматизованої системи керування багатономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва ПСЦС з використанням різних засобів вимірювань наведено на рис. 1.4. Процес керування організовано зі зворотним зв'язком з використанням цифрових технологій. У цьому разі, з позиції інформаційного функціонування, процес керування може бути представлено як процес формування даних, їх переміщення та обробки. Отже, функціональний склад інформаційної частини системи керування багатономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва ПСЦС може бути представлений наступними підсистемами:

вимірювальна (пристрої збору інформації), обробки інформації (обчислення, зберігання, прийняття рішень і формування керуючих дій) та передавання.

Особливими складовими автоматизованої системи керування багатомономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва ПСЦС є засоби прийняття рішень. До їх складу, як суб'єкта керування, входить ряд фахівців та сукупність знань, компетентностей, методів, якими вони володіють.

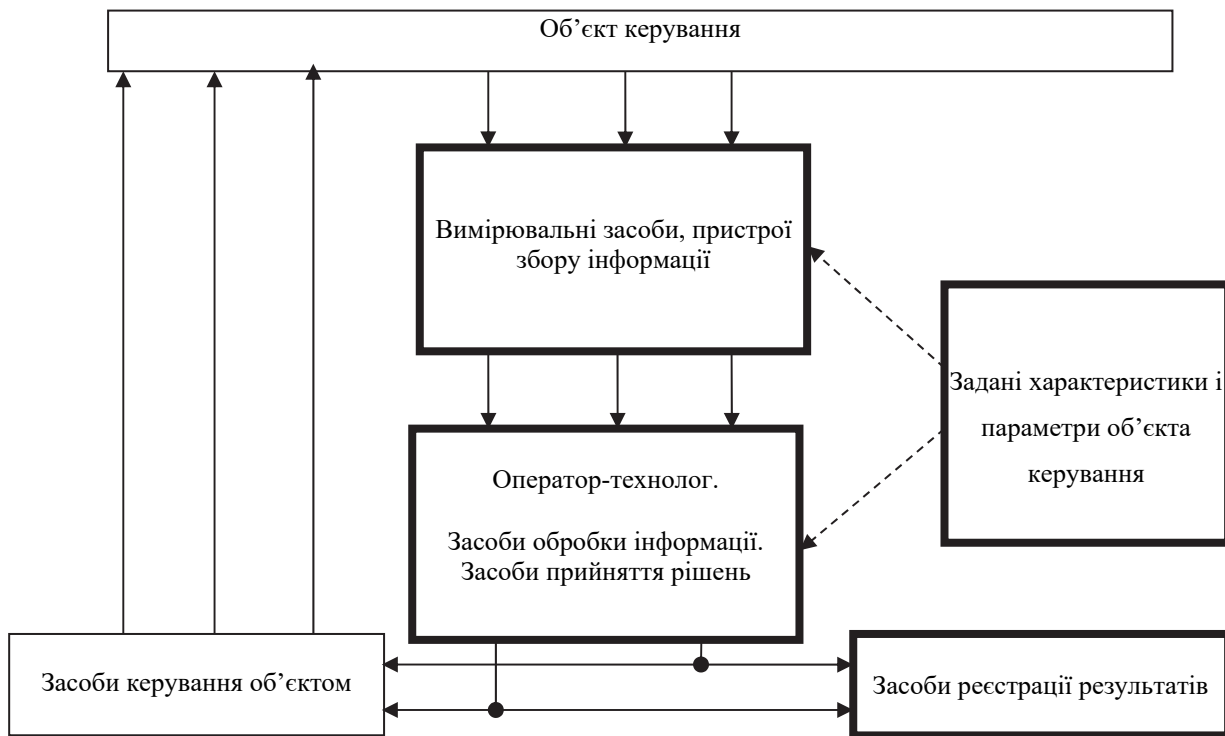


Рис. 1.4. Узагальнена структурна схема автоматизованої системи керування

У складі сучасних інтелектуальних автоматизованих комп'ютерно-інтегрованих систем (КІС) керування ТП є датчики, як вимірювальні перетворювачі, що перетворюють фізичні величини в цифрові електричні сигнали. Вони стали найважливішими елементами інформаційно-вимірювальних систем (ІВС). У багатьох випадках це складні пристрої, створені із застосуванням навіть сигнальних процесорів [52, 57-59].

Типова схема автоматизованих вимірювань зображена на рис. 1.5 [3]. Об'єкт керування (вимірювань) - пристрій синхронізації або інший пристрій, в процесі функціонування якого використовуються періодичні або

квазіперіодичні сигнали. Величина, що вимірюється - часові (фазові) співвідношення між опорним і контрольованим сигналом. Вказані часові (фазові) співвідношення сприймається датчиками (сенсорами, первинними перетворювачами ПП), з виходів яких електричні сигнали підлягають подальшій обробці.

Якщо схему (рис. 1.5) доповнити цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) і аналоговими засобами керування об'єктом, то вона перетворюється в інформаційно-керуючу систему з зворотним зв'язком. Така структура характерна для більшості сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами [3, 52, 59].

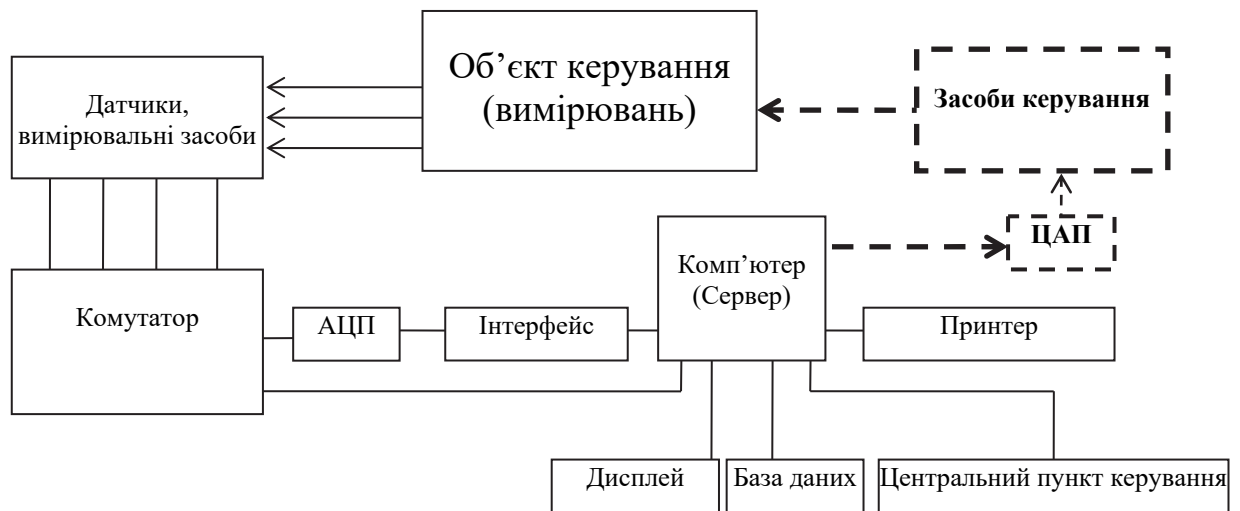


Рис. 1.5. Типова схема автоматизованих вимірювань

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач.

У разі використання цифрових технологій обробки даних конвертація показників, що представлені в аналоговому, дискретному та цифровому вигляді, забезпечується завдяки використанню спеціалізованих аналогово-цифрових пристроїв - пристрої зв'язку з об'єктами (ПЗО) [40].

На рис. 1.6 представлено схему процесу автоматизації виробництва з використанням промислового комп'ютера, цифрових інтерфейсів, інфокомунікаційних мереж, включно і з IP-технологіями, а також ПЗО [40].

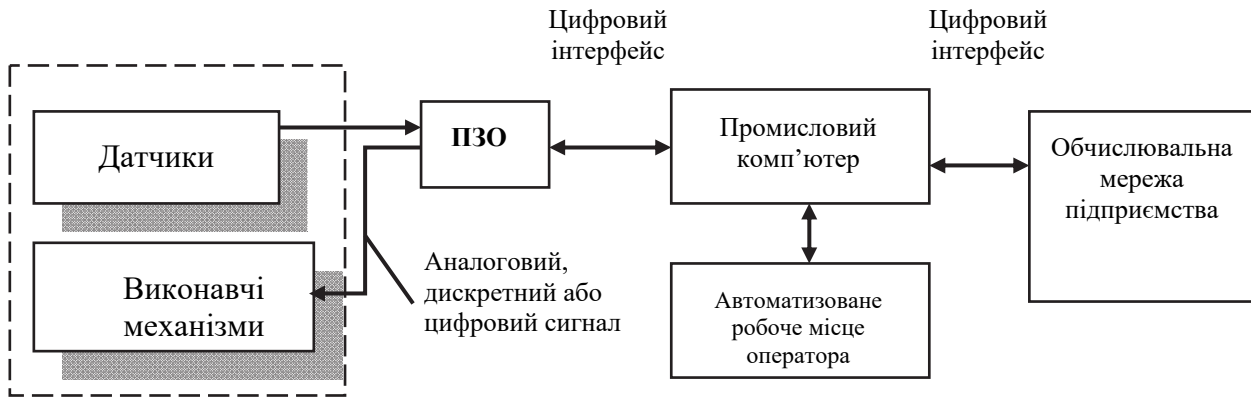


Рис. 1.6. Схема процесу автоматизації виробництва з використанням ПЗО

Згідно пропонованого у виданні [40] визначення, інформаційно-вимірювальна система – «це сукупність функціонально об'єднаних вимірювальних, обчислювальних та інших допоміжних технічних засобів для одержання вимірювальної інформації, її перетворення, переміщення (транспортування) засобами телекомунікацій, обробки з метою подання у необхідному виді або автоматичному здійсненні логічних функцій контролю, діагностики, ідентифікації та інших операцій». Отже, ІВС поставляє споживачеві інформацію відповідно до її призначення, а отже поряд з вимірюванням забезпечує все необхідне інформаційне обслуговування контрольованого об'єкта, включаючи автоматичний збір, подання, передавання, запам'ятовування, реєстрацію й обробку вимірювальної інформації. Узагальнюючи можна стверджувати, що очевидним є зростання питомої ваги цифрових технологій в автоматизованих системах керування ТП. В структурі керування ТП виробництва пристроїв синхронізації, в процесі їх впровадження та технічній експлуатації на передній план виходить автоматизована система контролю (АСК) показників якості, як центральний компонент, що забезпечує вимірювання, а також передавання, обробку та запам'ятовування отриманих даних.

Зазначимо, що процес вимірювання зводиться до порівнюють з одиницею

певної фізичної величини з метою отримання кількісної інформації, а при контролі фізичний параметр порівнюють з його нормою з метою визначення відхилень даного параметра (якісна характеристика об'єкта - "придатний" - "непридатний", що відповідно спрощує процес прийняття рішення оператором).

По суті контроль полягає в проведенні двох основних операцій:

- отримання інформації про фактичний стан об'єкта, про ознаки і показники його властивостей (первинна інформація);
- зіставлення первинної інформації з заздалегідь встановленими вимогами, нормами, критеріями (вторинна інформація) [60].

Значна увага при зіставленні первинної інформації з заздалегідь встановленими вимогами приділяється формі подання, яка повинна бути легкою, як правило, до візуального сприйняття, сприятливою для прийняття рішень. З цією метою інформація про стан виробництва надходить на екран у вигляді динамічних або статичних графіків, мнемонічних символів, яскравість та колір яких може змінюватись згідно відомого для оператора правила. Також формується сигнальна інформація та кількісні показники результатів контролю. Обов'язково передбачається інтерактивний режим роботи оператора, наприклад, він може сформулювати відповідний запит або команду [35].

Проведений на основі системного підходу аналіз процесу контролю якості ПС в умовах багатомовного виробництва обумовлює доцільність застосування методу створення автоматизованої системи керування виробництвом ПСЦС з використанням багатоканальної структури автоматизованої системи контролю (АСК) показників якості, котрий забезпечує багатократне підвищення продуктивності процесу контролю та спрощує візуалізацію й аналіз даних, що використовуються для прийняття рішень щодо змін параметрів технологічного процесу гнучкого інтегрованого виробництва.

Вперше запропоновано і розроблено багатоканальну автоматизовану систему контролю показників якості, яка забезпечує збільшення до чотирьох каналів вимірювань показників якості, що підвищує продуктивність використання засобів вимірювань в 4 рази, а також дає можливість проведення

одночасного контролю, спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації у “ручному режимі” прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу одиничного та дрібносерійного багатомономенклатурного гнучкого виробництва прецизійних ПСЦС.

Організаційна структура підсистеми автоматизованого контролю та вимірювань показників якості ПСЦС гнучкої інтегрованої системи наведена на рис. 1.7.

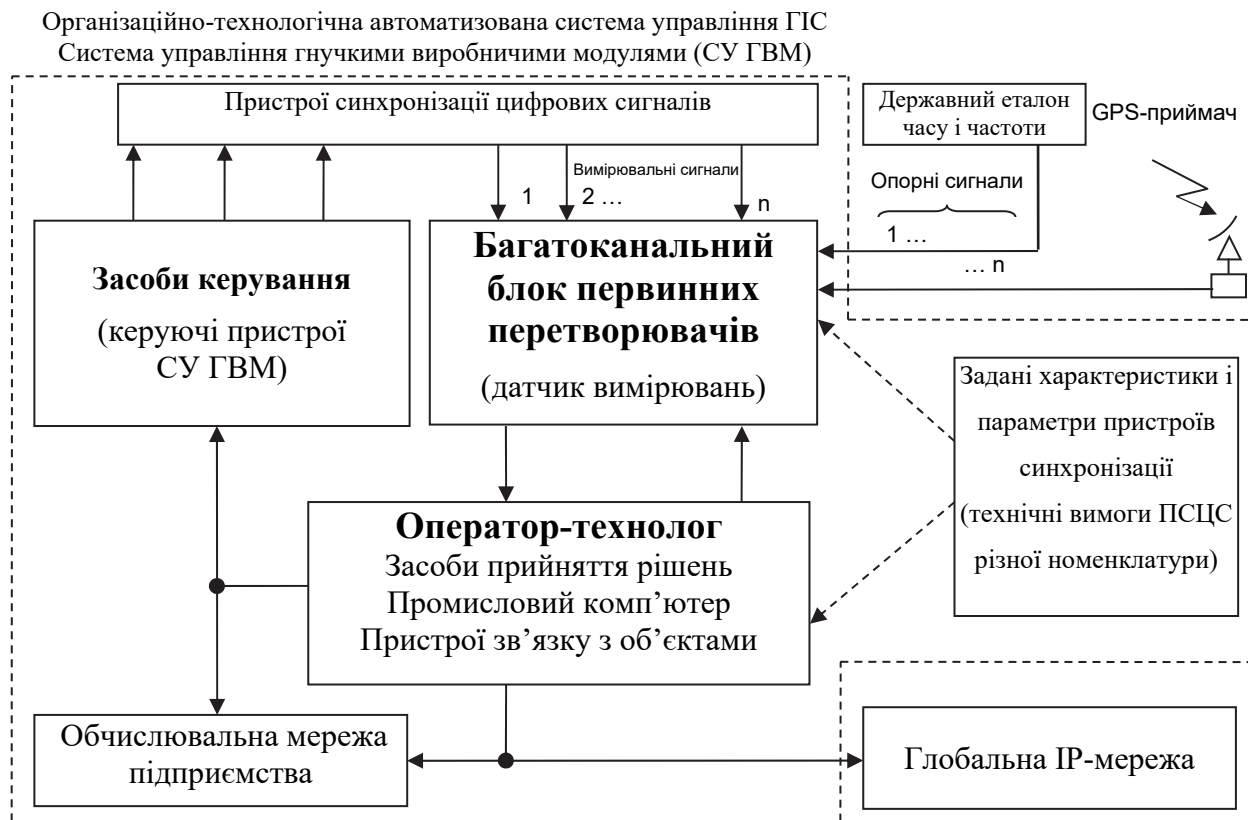


Рис. 1.7. Організаційна структура підсистеми автоматизованого контролю та вимірювань показників якості ПСЦС гнучкої інтегрованої системи

Підсумовуючи можна сказати, що, процес контролю частотно-часових показників пристроїв синхронізації за умов багатомономенклатурного виробництва зводиться до перевірки відповідності їх характеристик встановленим технічним вимогам. На підставі отриманих за допомогою автоматизованої системи керування ТП даних і здійснюється оперативно-технологічне керування.

В даному підрозділі було проаналізовано функції підсистеми контролю та вимірювань показників якості багатомономенклатурного виробництва ПСЦС. Визначено процес контролю частотно-часових показників ПСЦС, як процес перевірки відповідності їх характеристик встановленим технічним вимогам. Причому, інформація про стан контрольованих ПСЦС повинна 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 оперативно-технологічне керування ТП ГС на етапах виробництва.

Враховуючи те, що підвищення продуктивності використання засобів вимірювань можливе також за рахунок універсалізації пристрою контролю, тобто можливості подвійного його використання в якості підсистеми контролю системи технічної експлуатації сучасних високотехнологічних систем, то в наступному підрозділі доцільно проаналізувати особливості процесу контролю показників якості ПСЦС при введенні їх в експлуатацію та в процесі технічного обслуговування на об'єктах цифрових телекомунікацій й цифрових підстанціях енергетичних мереж SMART Grid технологій.

1.5. Аналіз особливостей процесу контролю показників якості ПСЦС на етапі введення їх в експлуатацію та в процесі технічного обслуговування на об'єктах цифрових телекомунікацій й цифрових підстанціях енергетичних мереж SMART Grid технологій

Наявні на сьогодні підходи до розв'язання задач контролю показників якості ПСЦС на етапі введення їх в експлуатацію на об'єктах, як в галузях телекомунікацій, так і електроенергетики не відповідають сучасним вимогам до функціональних можливостей технічної експлуатації ПСЦС і мережі синхронізації.

Існуючі в Україні технічні засоби не мають єдиної системи передавання сигналів точного часу від еталонів і, відповідно, не можуть задовольнити

вимоги усіх споживачів частотно-часової інформації [61], а тому в публікаціях останнього часу приділяється увага актуальним дослідження нових рішень для передавання шкали часу з використанням ІР-технологій [5, 12, 22, 61-71], вимірюванням та контролю синхросигналів які використовуються для забезпечення безперервного моніторингу стабільності параметрів обладнання сучасних високотехнологічних цифрових систем.

Аналіз особливостей процесу контролю показників пристроїв синхронізації доцільно розпочати з розгляду задач, які на них покладаються. ПСЦС забезпечують формування синхросигналів, які використовуються для синхронізації роботи засобів цифрових телекомунікацій або виконання синхронізації операцій над різними процесами шляхом узгодження їх часових шкал [1, 9]. В реальних умовах експлуатації на об'єктах цифрових телекомунікацій виникають зміни періоду (частоти і фази) синхросигналів, причинами яких є як особливості алгоритмів їх функціонування, так і вплив зовнішніх дестабілізуючих факторів. Зазначене призводить до того, що теоретичні розрахунки і моделі в багатьох випадках не відповідають реальним процесам, які протікають на діючих телекомунікаційних системах та мережах. Тому на різних етапах життєвого циклу засобів цифрових телекомунікацій однією з найважливіших фаз технічної експлуатації є вимірювання параметрів синхросигналів, які передаються на різних ділянках. Проведення збору й аналізу отриманої інформації та ідентифікація існуючих проблем є необхідними для діагностики стану обладнання. Виявлення проблемних ділянок і вузлів неможливо без отримання достовірної та актуальної інформації про кількісні і якісні характеристики синхросигналів.

За результатами виконаного аналізу особливостей введення в експлуатацію ПСЦС та технічної експлуатації мереж синхронізації встановлено, що формування з заданою точністю і надійністю високоякісних синхросигналів в цифрових телекомунікаціях неможливе без використання контролю показників якості ПСЦС [1, 9, 23, 25, 31, 62, 67, 70].

Технічна експлуатація у частині технічного обслуговування повинна

забезпечувати виконання сукупності робіт з підтримки працездатності мережі синхронізації цифрових телекомунікацій. Загалом у рамках технічного обслуговування передбачається проведення експлуатаційного контролю за допомогою вбудованих в апаратуру засобів вимірювань, що забезпечують постійний контроль, аналіз робочих характеристик і видачу відповідних аварійних повідомлень при перевищенні встановлених границь [1].

Відомо, що вимірювання кількісних характеристик синхросигналів потребує спеціальних приладів, складних методик. Враховуючи це, реальне проведення безпосереднього контролю параметрів синхронізації в усіх точках мережі дуже обмежений. Крім того, як правило, вбудовані в телекомунікаційне обладнання пристрої синхронізації та деякі виокремлені пристрої синхронізації не контролюються самими системами управління мережами синхронізації, що також робить складним своєчасне виявлення проблем із синхронізацією [3-5, 71].

Встановлено, що потрібно досить тривалий час на проведення автоматизованих вимірювань часових інтервалів (блукання фази синхроінформації) з виконанням одночасних вимірювань декількох синхросигналів, накопиченням і зберіганням, архівуванням результатів вимірювань та сумісною статистичною обробкою результатів із застосуванням спеціалізованого серверу автоматизованої централізованої системи управління [3, 8, 72-83].

При проведенні вимірювань часових інтервалів потрібно врахувати значну територію, на якій розміщено ПСЦС. У зв'язку з цим, розміщення об'єктів синхронізації передбачає об'єднання їх у вузли мережі синхронізації (МС). Це дозволяє значно спростити можливість проведення вимірювань з безпосередньою їх прив'язкою до відповідного джерела еталонного часу або частоти. Також з метою економії ресурсів контроль якості забезпечується вбудованими в обладнання синхронізації вимірювальними пристроями. В цьому випадку об'єктами вимірювання є вхідні та вихідні синхросигнали ПСЦС.

Для контролю якості сигналів ПСЦС вищого рівня ієрархії необхідні прецизійні і відповідно дорогі вимірювальні пристрої, наприклад, атомні стандарти частоти. Датчики контролю нижчих рівнів можуть бути менш точними, вартість їх відповідно істотно нижча. Таким чином, комбінуючи різні типи датчиків залежно від постановки задачі і фінансових ресурсів, можна будувати автоматизовані системи контролю різного масштабу.

Розглянемо КІС контролю синхросигналів телекомунікаційної мережі, до складу якої входять наступні функціональні блоки (рис. 1.8) [84, 85]: сервер, блок датчика БД-1 на кожен об'єкт, що контролюється, який включає приймач GPS з антенним комплектом. Для зв'язку БД-1 з сервером використовуються послідовні порти, які організовуються відповідними технічними засобами.

Відомо, що блок датчика БД-1 використовується для контролю часових характеристик тактового синхросигналу по параметру відхилення часового інтервалу (Time Interval Error - TIE). Фактично блок датчика БД-1 є вимірювачем TIE опорного (від зовнішнього стандарту частоти на основі GPS + рубідієвий генератор) і контрольованого сигналів. З метою забезпечення невисокої вартості і можливості контролю параметрів з необхідною точністю метрологічні характеристики БД-1, а саме внутрішній фазовий шум вибирається з розмахом в декілька наносекунд.

Система має наступні сервісні можливості [84]:

- візуальне відображення в режимі реального часу поточного стану заданої кількості об'єктів (зображення - індивідуально для кожного об'єкту);
- візуальне відображення відповідності всіх характеристик шаблонам, яке оновлюється (зображення - по МВЧІ і ДЧІ окремо з групою графіків на кожному зображенні);
- відображається наявність/відсутність аварійних повідомлень (тобто випадків невідповідності сигналів шаблонам) за встановлений період часу, поточний стан (наявність/відсутність аварії в даний момент), а також загроза аварійного стану (поява тенденції наближення контрольованих характеристик до рівня шаблону) [84].

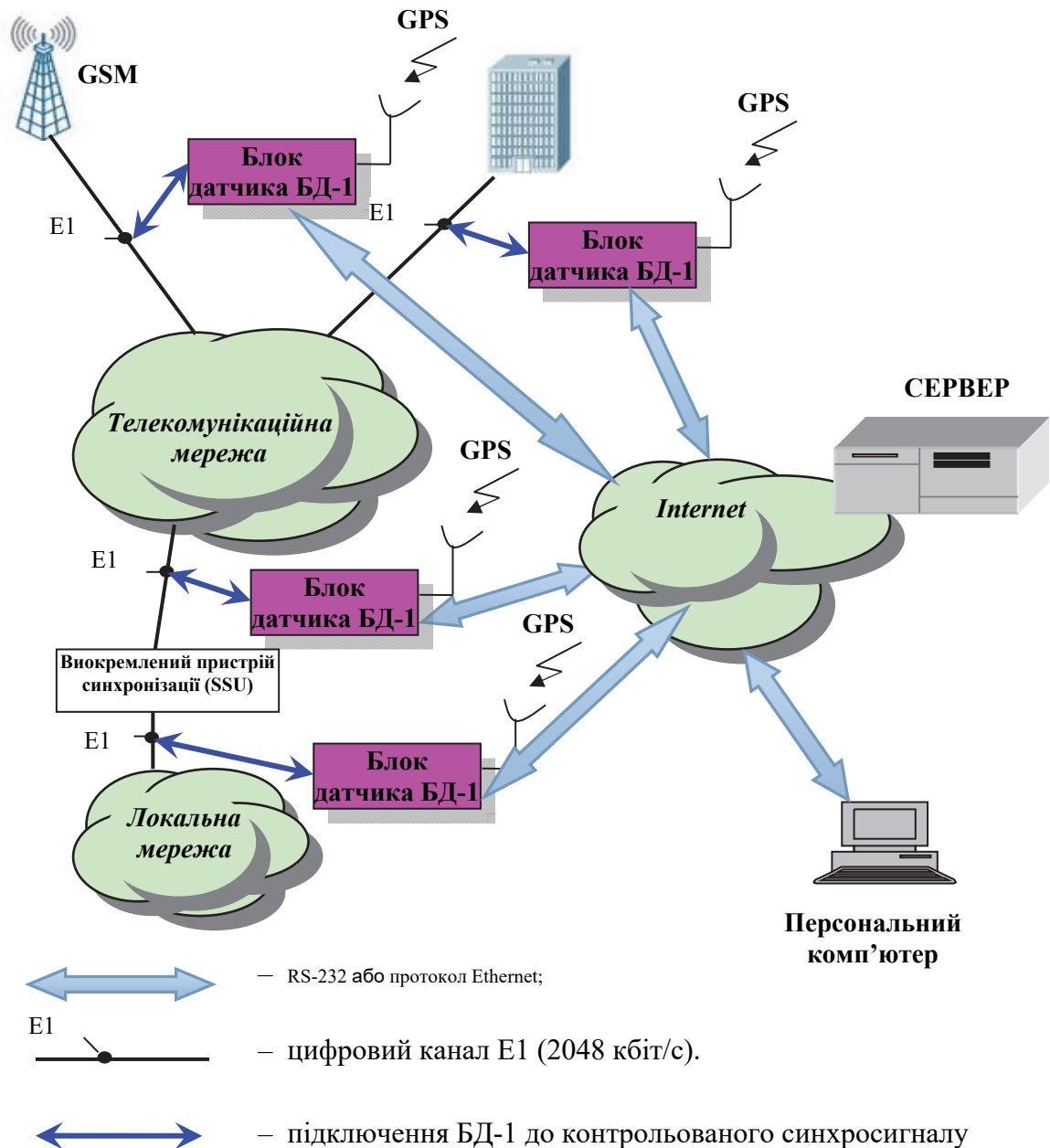


Рис. 1.8. Структура КІС контролю якості синхросигналів телекомунікаційної мережі

Окрім описаного процесу візуалізації КІС забезпечує можливість статистичної обробки результатів вимірювань (наприклад, виконувати усереднення вимірювань за попередній період, накопичувати усереднені значення за наперед заданий період, обробляти періоди з аварійними ситуаціями, архівувати і зберігати результати з можливістю обробки запитів),

конфігурувати режими вимірювань та інше.

В сучасних електроенергетичних мережах актуальним є забезпечення зниження аварійності за рахунок підвищення якості та надійності формування мітки часу для безперервного моніторингу стабільності параметрів електромережі з прив'язкою до реального часу і, як наслідок, підвищення їх енергоефективності [61, 86-90].

Існуючі в Україні технічні засоби не мають єдиної системи передавання сигналів точного часу від еталонів і, відповідно, не можуть задовольнити вимоги усіх споживачів частотно-часової інформації [61], а тому в публікаціях останнього часу приділяється увага актуальним дослідження нових рішень для передавання шкали часу з використанням IP-технологій [61, 62-65], вимірюванням та контролю синхросигналів які використовуються для забезпечення безперервного моніторингу стабільності параметрів обладнання цифрових підстанцій інтелектуальних енергосистем SMART-технологій.

Відомо, що джерелом сигналу точного часу можуть служити супутникові навігаційні системи GPS, ГЛОНАСС, державні еталони частоти і часу або служби точного часу, які підтримують координовану національну шкалу часу [61].

На цифрових підстанціях електроенергетичних мереж SMART Grid технологій, де використовується, в якості опорного синхросигналу, тільки сигнал від одної супутникової навігаційної системи GPS є проблематичним організація процесу контролю синхросигналів. Відсутність достатньої надійності в забезпеченні опорних синхросигналів, призводить до зниження інформаційної достовірності самого процесу безперервного моніторингу обладнання електроенергетичних мереж.

Для забезпечення контролю опорних синхросигналів на об'єктах електроенергетики доцільне використання сигналів національної шкали часу, що формуються Державним еталоном часу і частоти та передаються з використанням цифрових інфокомунікацій, наприклад з використанням IP-мереж [61].

Для підвищення якості та надійності формування опорних синхросигналів пропонується використання КІС контролю якості синхросигналів, яка аналогічна до системи, що використовується на мережі телекомунікацій. Такий підхід створить умови диверсифікації у процесі забезпечення опорними синхросигналами засобів контролю якості та призведе до зменшення вірогідності виникнення аварій в інтелектуальних електроенергосистемах і, як наслідок, сприятиме підвищенню їх енергоефективності.

Для реалізації КІС контролю якості синхросигналів необхідно забезпечити виконання ряду вимог, головною з яких можна вважати розробку організаційно-технічних заходів, які забезпечать здійснення одночасних багатоканальних вимірювань контрольованих синхросигналів на об'єктах електроенергетики та алгоритмічне оброблення та візуальне представлення результатів контролю в реальному часі у зручному для оператора форматі. Підвищення ефективності у реалізації зазначених вимог може бути досягнуто за рахунок використання ІР-технологій, як для передавання сигналів синхронізації, так і для переміщення даних вимірювань.

Формалізовані задачі щодо забезпечення одночасних вимірювань контрольованих синхросигналів на об'єктах електроенергетики обумовлюють структуру автоматизованої системи багатоканального контролю якості синхросигналів з використанням ІР-технологій, яка зображена на рис. 1.9.

З метою розширення функціональних можливостей технічної експлуатації мережі синхронізації у частині технічного обслуговування запропоновано спосіб багатоканального моніторингу часових інтервалів синхросигналів [82], технічною реалізацією якого є КІС з географічно розподіленими блоками контролю (БК) показників якості синхросигналів (рис. 1.9). Варто зауважити, що зазначена автоматизація дасть змогу обґрунтованого прийняття рішення щодо якості синхросигналів на об'єктах електроенергетики.

Запропонований автоматизований контроль **якості** синхросигналів базується на основі багатоканальних територіально розподілених, по об'єктах,

блоків контролю (апаратного засобу), що виконують одночасно безперервні тривалі вимірювання (дні, тижні) кількох синхросигналів. Результати контролю оброблюються та передаються по IP-мережі на сервер централізованої системи керування (рис. 1.9). Сервер здійснює додаткову обробку результатів вимірювань, в тому числі статистичну, та формує данні в зручному для оператора форматі. На основі сформованих актуальних даних в централізованому пункті керування приймається рішення по формуванню необхідних керуючих дій.

Блок контролю (рис. 1.9) у своєму складі має прецизійний генератор опорного сигналу з системою автопідстроювання та відповідні секції контролю. Прецизійний генератор опорного сигналу побудовано на принципі фазового автопідстроювання частоти термостатованого кварцового генератора з керуванням за відхиленням та адаптивним цифровим фазовим дискримінатором (АЦФД) [91]. Генератор опорного сигналу безпосередньо або за рахунок процесу автопідстроювання частоти від зовнішніх джерел, формує опорні (еталонні) відліки часу, відносно яких в секціях контролю виконуються виміри часових інтервалів контрольованих синхросигналів.

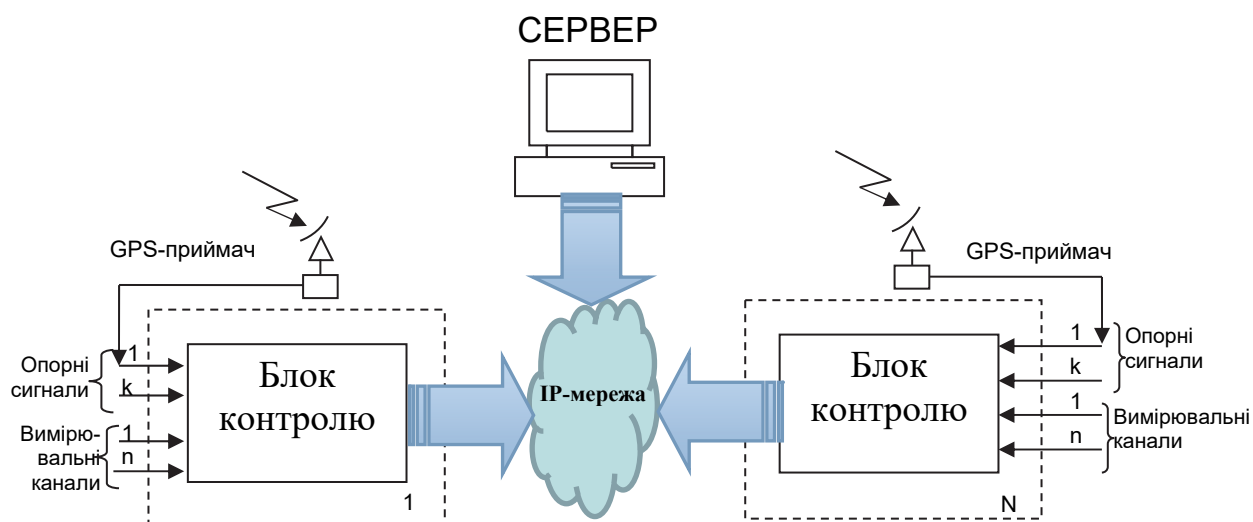


Рис. 1.9. КІС багатоканального контролю часових інтервалів синхросигналів

З наведеного вище, на основі системного аналізу встановлена можливість підвищення продуктивності використання засобів вимірювань за рахунок їх використання в якості підсистеми контролю системи технічної експлуатації сучасних високотехнологічних об'єктів з урахуванням особливості процесу розподілу синхроінформації між розосередженими по мережі пристроями синхронізації, багаторівневістю та ієрархічністю її топологічної структури.

1.6. Мета та задачі досліджень

Метою даної дисертаційної роботи є підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва за рахунок створення автоматизованої системи контролю з використанням сучасних ІР-технологій та розробки програмного забезпечення і блоку первинних перетворювачів контрольованих сигналів з ієрархічною системою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Визначити основні підходи до забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю пристроїв синхронізації в умовах багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва.
2. Дослідити багатомономенклатурне виробництво ПСЦС як об'єкт автоматизації.
3. Провести на основі системного підходу аналіз способів підвищення продуктивності процесу контролю в умовах багатомономенклатурного виробництва.
4. Розробити апаратну структуру вимірювального блоку автоматизованої системи контролю показників якості ПСЦС і програмне забезпечення для візуалізації та статистичної обробки отриманих цифрових даних.
5. Розробити структуру пристрою контролю періодичності імпульсної

послідовності тактової частоти, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії процесу контролю.

6. Визначити на основі теоретико-ймовірнісного методу вимоги до блоку контролю періодичності та його складових (електричних компонентів) з метою підвищення надійності його функціонування і, як наслідок, зменшення ризику прийняття хибного рішення оператором про наявність або відсутність контрольованого сигналу.

7. Дослідити підсистему фазового автопідстроювання частоти (ПФАПЧ) опорного генератора блоку первинних перетворювачів АСК та здійснити її оптимізацію за швидкістю.

8. Розробити лабораторний макет АСК з блоком первинних перетворювачів контрольованих сигналів і програмним забезпеченням та провести експериментальні дослідження.

1.7. Основні результати та висновки до розділу 1

Проведено аналіз ряду робочих характеристик ПСЦС та акцентовано на їх складність, прецизійність, наявність багатьох режимів роботи. Встановлено, що для виконання повноцінного й достовірного контролю якості ПСЦС може використовуватись значна кількість показників. Проведено аналіз методів розрахунку та способів оцінки показників якості ПСЦС з урахуванням умов їх багатомітенклатурного виробництва та експлуатації, за результатами якого зроблені наступні висновки:

1. Визначення показників якості та робочих характеристик ПСЦС необхідно виконувати упорядковано за рівнями ієрархії.

2. Розрахунки та оцінки показників якості ПСЦС доцільно проводити на основі безпосередньо вимірюваних у часовій області дискретних відліків похибки часу, які утворюють базовий, перший рівень.

3. Наступні рівні ієрархії процесу визначення показників якості повинні забезпечувати розрахунки TE , TIE , TIE_{rms} та $MTIE$, характеристики миттєвої частоти, флуктуації частоти, режими роботи ПСЦС.

4. Визначення показників якості полягає у необхідності проведення автоматичних або автоматизованих довготривалих (сотні, тисячі секунд і більше) вимірювань ПСЦС, що в умовах багатомініклатурного виробництва вимагає застосування сучасних засобів комп'ютерної техніки та ІР-технологій.

Досліджено виробництво ПСЦС як об'єкт автоматизації. За результатами аналізу структурних особливостей системи управління ГІС, а також її функцій по збору, передаванню, обробці й формуванню даних, визначена актуальність дослідження інформаційних функцій ГІС, які забезпечуються підсистемою вимірювань та контролю показників якості. Проаналізовано функції підсистеми контролю та вимірювань показників якості багатомініклатурного виробництва пристроїв синхронізації. Визначено процес контролю частотно-часових показників ПСЦС, який зводиться до перевірки відповідності їх характеристик встановленим технічним вимогам. Причому, інформація про стан виробництва повинна надходити на екран дисплея у вигляді мнемонічних символів, яскравість та колір яких може асоціюватися зі ступенем актуальності даного повідомлення для оператора. Також на екран дисплея надходить сигнальна інформація та важливі кількісні показники. Обов'язково передбачається інтерактивний режим роботи оператора, за допомогою якого на основі даних контролю здійснюється оперативно-технологічне керування ТП ГІС.

Проведений на основі системного підходу аналіз щодо можливості підвищення продуктивності використання засобів вимірювань за рахунок подвійного їх використання в якості підсистеми контролю системи технічної експлуатації сучасних високотехнологічних систем з урахуванням особливості процесу розподілу синхроінформації між розосередженими по мережі ПСЦС, багаторівневістю та ієрархічністю її топологічної структури.

Підсумовуючи можна сказати, що розроблена багатоканальна структура автоматизованої системи контролю, новизна якої полягає у збільшенні числа каналів та одночасному виконанні вимірів показників якості, забезпечує підвищення у разі продуктивності контролю, спрощує візуалізацію та аналіз

даних, які використовуються для реалізації можливості у “ручному режимі” приймати рішення щодо змін параметрів технологічного процесу багатомономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва ПСЦС, а також в процесі їх технічної експлуатації у складі підсистем сучасних високотехнологічних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи: Пер с англ. – М.: Мир, 2003. – 456с.
2. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр. :Пер. с англ. – М. : Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
3. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с.
4. Бакланов И.Г. Технологии измерений в современной телекоммуникации. / И.Г. Бакланов – М.: Эко-Трендз, 1998. – 264 с.
5. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням ІР-мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, О.В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с.
6. Величко О.Н., Головня М.В. Вторичный эталон единиц времени и частоты как источник сигналов синхронизации и времени // Электросвязь, 2013, № 2. – С. 22–25.
7. Стогній Б.С. Системи синхронізованих вимірів в електроенергетиці. Підвищення точності та метрологічне забезпечення / Б.С. Стогній, М.Ф. Сопель, Г.М. Варський, І.В. Яковлєва // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. - 2013. - Вип. 35. - С.37-47.
8. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.

9. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с.

10. Международный словарь по метрологии: основные и общие понятия и соответствующие термины: пер. с англ. и фр. / Всерос. науч.-исслед. ин-т метрологии им. Д. И. Менделеева, Белорус. гос. ин-т метрологии. Изд. 2-е, испр. – СПб.: НПО «Профессионал», 2010. – 82 с.

11. Рыжков А. В. Частота и время в инфокоммуникациях XXI века. М.: МАС, 2006. – 320 с.

12. Рыжков А.В. Частотно-временное обеспечение в сетях электросвязи: Учебное пособие для вузов. М.: Эко-Трендз, 2018. – 244 с.

13. Ратхор Т.С. Цифровые измерения. Методы и схемотехника/ Т.С. Ратхор — М.: Техносфера, 2004. — 376 с

14. G.811, Timing characteristics of primary reference clocks. - [Чинний від 1997-9]. - Geneva, Switzerland, Sept. 1997. (Рекомендація ITU-T).

15. ITU-T Rec. G.703 Physical / Electrical Characteristics of Hierarchical Digital Interfaces. Geneva, Oct. 1998.

16. ITU-T Rec. G.803. Architecture of Transport Networks Based on the Synchronous Digital Hierarchy. (SDH). Sec. 8. Geneva, June 1997.

17. ITU-T Rec. G.823. Controlled slip rate objectives on an international digital links.

18. ITU-T Recommendation G.781(09/08) Synchronization layer functions

19. Transmission and multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks. - [Чинний від 1996-5]. - ETS 300 462-2 1997. (Стандарт ETSI).

20. Кальян Д.О., Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецкий. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/>

view/10897/9540

21. Dmytro Kalia, Nadiia Kazakova, Boris Kravchenko, Valerii Koval. Automated system for Monitoring Synchronizing precise time signals at SMART-GRID power plants. Projectowanie, badania, i eksploatacja. Tom 1. - Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej. Bielsku-Bialej, Poland. 2019. - P.155-160. <http://www.engineerxxi.ath.eu/book/designing-researches-and-exploitation-2019-vol-1/>

22. Коваль В.В., Кальян Д.О., Мовчан С.А., Шкляревський І.Ю. Дослідження якості переміщення синхроінформації з використанням протоколу прецизійного часу стандарту IEEE 1588-2008 // Матеріали П'ятої Міжнар. наук.-практ. конф. "Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості". 8-9 жовтня 2015 р. – Одеса: Одеська державна академія технічного регулювання та якості, 2015. – С.94-95.

23. Koval Valerii, Kalia Dmytro, Khudyntsev Mykola, Lysenko Vitaliy, Samkov Oleksandr, Shkliarevskiy Igor. Synchroinformation's 24x7 monitoring tool for modern digital networks decision making // Abstracts XXX International Conference "Problems of decision making under uncertainties PDMU-2017». 14-19 august 2017: Vilnius, Lithuania, – 2017. - С.75-76.

24. Vitaliy Lysenko, Valerii Koval, Oleksandr Samkov, Dmytro Kalia, Dmytro Komarchuk. Computer-integrated Systems for Information Support and Automatization of the Complicated Objects // Abstracts XXX International Conference "Problems of decision making under uncertainties PDMU-2018». PDMU-2018, Prague, Czech republik, – 2018. – p.p.45-51.

25. Koval V.V., Kalia 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.

26. V.V. Koval, V.P. Lysenko, D.O. Kalia, M.V. Golovnya, O.V. Samkov,

O.M. Piskun, M.S. Medina, I.Y. National Time Scale Transmitting Through the Integrated Power Networks of SMART Technologies / International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T-2018). 9 - 12 October 2018: Kharkiv National University of Radio Electronics / Conference Proceedings. – p.p.89-94. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632078>

27. Valerii Koval, Nadiia Kazakova, Dmytro Kalian, Dmytro Komarchuk, Vitaliy Lysenko, Oleksandr Samkov. The use of advanced information and communication technologies to monitor the quality of synchronization signals of IoT terminal devices / 3st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019), Lviv, Ukrain, 2-6 july 2019. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2019. – С.22-25. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8847894>

28. Valerii Koval, Dmytro Kalian, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov, Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - pp.269-276.

29. Информационно-измерительная техника и электроника:/Г.Г. Раннев, В.А. Суроги́на, В.И. Калашников: под ред. Г.Г. Раннева.-М.: изд. центр «Академия», 2007. - 512с.

30. Аппаратура для частотных и временных измерений/ Под ред. А.П.Горшкова. Изд-во «Советское радио», 1971, 336 с.

31. Тактовая синхронизация в интегральных цифровых сетях электросвязи / В.И. Борщ, В.П. Гайдар, В.В. Коваль, И.П. Лесовой. – К.: Наукова думка, 1998. – 202 с.

32. Борщ В.І., Коршун Є.І., Туманов Ю.Г., Чумак О.М. Синхронізація й синхронізація в телекомунікаційних системах. – К.: Наукова думка, 2004. – 128с.

33. Давыдкин П.Н., Колтунов М.Н., Рыжков А.В. Тактовая сетевая синхронизация. М.: Эко-Трендз, 2004. – 205 с.

34. Иносэ Х. Интегральные цифровые сети связи. Введение в теорию и практику: Пер. с англ. - М.: Радио и связь, 1982. - 320 с.

35. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: Підручник / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін, М.М. Поліщук, М.М. Ткач, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко.- Житомир: ЖДТУ, 2005.- 680 с.

36. Дзінько Р.І. Підвищення надійності систем оперативного управління гнучких виробничих систем. К.; КПІ, Дис. к.т.н. 2016. – 160 с.

37. Соловьев В.А. Системы оперативного управления. – 2015. – 188 с.

38. ДСТУ 2709-94. Державна система забезпечення єдності вимірювань. Автоматизовані системи керування технологічними процесами. Метрологічне забезпечення. Основні положення.

39. Бобух А.О. Автоматизовані системи керування технологічними процесами: Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2006. – 185 с.

40. Автоматизовані системи управління технологічного процесу в хімічних виробництвах: курс лекцій / Укладач Л.В. Борисова. – Х.: НУЦЗУ, 2015. – 98 с.

41. Ладанюк А.П., Трегуб В.Г., Ельперін І.В. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості. Підручник для студентів. - К.: Аграрна освіта, 2001,. – 224 с.

42. Ладанюк А.П. Комплексування методів теорії керування в системах автоматизації технологічних об'єктів. Частина 1 / А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Я.В. Смітюх, Д.А. Шумигай // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – Київ : НУХТ. – 2017. – № 4. – С. 8-16.

43. Лекція 1. Загальна характеристика автоматизованих систем

управління / [Електронний ресурс] // http://www.d-learn.pu.if.ua/data/users/9645/Lecture1_ISU.pdf

44. Невлюдов І.Ш. Організаційно-технічні основи виробництва електронних апаратів: навч. посібник / І.Ш. Невлюдов, О.В. Тучин, Г.В. Карпов; МО і Науки України, Харк. держ. техніч. ун-т радіоелектроніки. – Харків: ХТУРЕ, 2001. – 112 с.

45. Волков В.Э. Информационные технологии: прошлое, настоящее, будущее // Автоматизация технологических и бизнес-процессов, 2014. – №20, декабрь 2014. – С. 5-15.

46. Проблемы коэволюции и социотехническое управление: научно-учебное пособие /Б.В. Егоров, И.Н. Буценко, А.А. Шевченко, А.В. Коваленко, В.Э. Волков, И.И. Яровой, Г.В. Ангелов – Одесса: КП ОГТ, 2010. – 624с.

47. Ладанюк А.П., Заєць Н.А., Власенко Л.О. Сучасні технології конструювання систем автоматизації складних об'єктів (мережеві структури, адаптація, діагностика та прогнозування): монографія. – К.: Видавництво Ліра-К, 2016. – 312с.

48. Біловол Г.В. Забезпечення продуктивності багатомноменклатурних механообробних виробництв на основі синтезу структур технологічних систем [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2011. – 20с. <http://archive.kharkiv.org/View/36717/>

49. Автоматизация исследований и контроля параметров пьезокерамических резонансных датчиков в технологическом процессе их опытного производства: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. 05.13.06 / Лидия Викторовна Артюхина; Науч. рук. д.т.н., проф. Б. М. Кербель; Северский государственный технологический институт, Отделение проблем информатизации Томского научного центра СО РАН. - Томск, 2002. - 184[13] с.

50. Невлюдова В.В. Технологічне забезпечення якості гнучких структур у виробках електронної техніки. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія,

обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017.

51. Парахуда Р.Н., Шевцов В.И. Автоматизация измерений и контроля. Санкт-Петербург. 2002. <https://studfiles.net/preview/2832661/>

52. Схемотехника измерительных устройств / В. Б. Топильский. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. — 232 с.

53. Автоматизация измерений и контроля электрических и неэлектрических величин: Учебное пособие для вузов/ Под ред. А. А. Сазонова. - М. :Изд-во стандартов, 1987. – 328 с.

54. Малышев В. М., Механников А. И. Гибкие измерительные системы в метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1988. – 176 с.

55. НД ТЗІ 1.1-003-99. Термінологія в галузі захисту інформації в комп'ютерних системах від несанкціонованого доступу.

56. ДСТУ 2226-93. Автоматизовані системи. Терміни і визначення.

57. Сопряжение датчиков и устройств ввода данных с компьютерами IBM PC: пер. с англ./Под ред. У. Томпкинса, Дж. Уэбстера. - М.: Мир,1992. – 592 с.

58. Левшина Е.С., Новицкий П. В. Измерение физических величин: Измерительные преобразователи. - Л.:Энергоатомиздат, 1983.

59. Малышев В. М., Механников А. И. Гибкие измерительные системы в метрологии. - М.: Изд-во стандартов, 1988. – 176 с.

60. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

61. Величко О.М., Коваль В.В., Самков О.В., Шкляревський І.Ю. Сучасні протоколи передачі шкали часу інтелектуальних електроенергетичних систем зі зниженою аварійністю // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2016. – Вип.242. – С.41-50.

62. Управління споживанням та генерацією енергії на підприємствах агропромислового комплексу на основі концепції інтелектуальних технологій (Smart Grid): Звіт про НДР за державним замовленням / НУБіП України; Номер

державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

63. 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.

64. 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.

65. 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.

66. Shkliarevskyi I., «Precision Time Protocol in different applications: profile comparative analysis», T-Comm, v.8, #11, 2014, pp.116-120.

67. Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням IP-технологій: Звіт про НДР за державним замовленням / НУБіП України; Номер державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

68. V.P. Lysenko, V.V. Koval, K.V. Nakonechna, D.O. Kalian. Modern information technologies in the control systems for complex biotechnical objects of agricultural appointment // Information and Telecommunication Sciences, Volume 9, Number 2(15), July-December 2017, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.38-43. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/119897>

69. Kalian D. Optimizing circuits for self-tuning in devices for synchronization system for transmitting reference time and frequency signals from reference source. / 2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017): Odesa, Ukraine, 11-15 september, 2017 / Materials of scientific and technical conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – p.p.179-183.

70. В.В. Коваль, Д.О. Кальян, В.В. Осипенко, О.В. Самков. Рекомендації з

створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням IP-мереж на основі протоколу прецизійного часу РТР. Для підприємств і організацій України / НАН України, Ін-т електродинаміки. Національний університет біоресурсів і природокористування (НУБІП) України. Укл. Коваль В.В. та інш. – Київ, 2017. 47 с.

71. Дробик А.В. Формирование синхросигналов цифровой сети выделенными устройствами синхронизации / А.В. Дробик, В.В. Коваль, Б.Я. Костик, Ю.О. Бабич, І.Я. Яницький // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій: наук.-метод. конф. 28-30 жовтня 2008: матеріали. – Львів (Україна), – 2008. – С.71-73.

72. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Кальян Д.О., Твердохліб А.В., Худинцев М.М. Автоматизована система багатоканального моніторингу синхроінформації цифрових телекомунікацій / Матеріали п'ятої міжнародної наук.-пр. конф. “Інфокомунікації – сучасність та майбутнє”, м. Одеса 29 – 30 жовтня 2015 р.: в 3 ч. Ч.3. - Одеса: ОНАЗ, 2015. – С.40-43.

73. 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.

74. Koval V.V., Velichko O.N., Golovnia M.V., Dorogobed V.V., Kalian D.O., Shkliarevskiy I.Y. Scientific and applied principles of creating united national synchroinformation system // Abstracts XXVII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 23-27 травня 2016: Тбілісі, Грузія, – 2016. - С. 96-98.

75. Коваль В.В., Теплюк В.М., Кальян Д.О., Мовчан С.А., Величко О.М. Інтегровані системи електропостачання Smart-технологій з високонадійною системою формування міток часу безперервного моніторингу / Доповідь на IV Міжнар. наук.-практ. конф. “Проблеми та перспективи розвитку енергетики,

електротехнологій та автоматики в АПК”, м.Київ 21-22 листопада 2016 р., Київ, Україна. – К.: НУБіП України, 2016.

76. Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій: Звіт про НДР за державним замовленням / НУБіП України; Номер державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

77. Коваль В.В., Кальян Д.А., Шкляревский И.Ю. Использование мониторинга синхросигналов для повышения безопасности информационно-телекоммуникационных систем / Збірник матеріалів доповідей та тез II Наук.-практ конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем», 23-24 березня 2017 р. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2017 – С.123-127.

78. 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: НУ «Львівська політехніка». – 2017. – С.22-25.

79. Koval Valerii, Kalian Dmytro, Khudyntsev Mykola, Lysenko Vitaliy, Samkov Oleksandr, Shkliarevskyi Igor. Synchroinformation's 24x7 monitoring tool for modern digital networks decision making // Abstracts XXX International Conference "Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 14-19 august 2017: Vilnius, Lithuania, – 2017. - С.75-76.

80. Koval V.V., Velychko O.M., Golovnya M.V., Kalian D.O., Shkliarevskyi I.Y. Unified national synchro-information system – high-tech infrastructure for automated complexes // XXIV International Conference on automated control «Automatics-2017»: Kiev, Ukraine, september 13-15, 2017: proceedings. Kiev. 2017. P.8-9.

81. Коваль В.В., Кальян Д.О., Самков О.В., Худинцев М.М. Система передавання синхроінформаційних сигналів з використанням сучасних телекомунікацій / Матеріали сьомої міжнародної науково-практичної

конференції “Інфокомунікації – сучасність та майбутнє”, м. Одеса, 26 – 27 жовтня 2017 р.: в 3 ч.. Ч.3. - Одеса: ОНАЗ, 2017. – С.60-63.

82. V.V. Koval, D.O. Kalian, M.M. Khudyntsev, V.P. Lysenko, O.V. Samkov, I.J. Shkliarevskiy. Automated 24x7 monitoring of synchroinformation in modern digital networks // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки. - 2017. - Випуск №2. - С.88-94. Режим доступу до статті: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1824870

83. Коваль В.В., Самков О.В., Кальян Д.А., Дубович-Костецький В.Г. Засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів інформаційно-телекомунікаційних систем / Збірник матеріалів доповідей та тез I Міжнар. наук.-практ конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS), м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.; Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2018 – С.100-103.

84. Коваль В.В., Кравець О.А., Бабіч Ю.О. Системи контролю синхросигналів телекомунікаційних мереж // Тези доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції студентства та молоді “Світ інформації та телекомунікацій – 2008”. - К. - 2008. – С.90-91.

85. Статистичні дослідження виділених пристроїв синхронізації та розробка методики експлуатації системи контролю мережі синхронізації транспортної мережі СЦІ ВАТ «Укртелеком»: Звіт про НДР (проміжн.) / Державний. ун-т інф.-ком. технологій (ДУІКТ). - №ДР 0105U001671. – К., 2006.

86. Величко О.Н., Коваль В.В, Кальян Д.О., Мовчан С.А., Шкляревський І.Ю. Інтелектуальні електроенергетичні системи зі зниженою аварійністю та передачею шкали часу IP-мережею / Збірник матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції «Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні '2016», 23-24 червня 2016 р., НУБіП України, Київ. – Немішаєве: НМЦ «Немішаєве», 2016. – С.128-130.

87. Коваль В.В., Теплюк В.М., Кальян Д.О., Мовчан С.А., Величко О.М.

Інтегровані системи електропостачання Smart-технологій з високонадійною системою формування міток часу безперервного моніторингу / Доповідь на IV Міжнар. наук.-практ. конф. “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК”, м.Київ 21-22 листопада 2016 р., Київ, Україна. – К.: НУБіП України, 2016.

88. Koval V.V., Lysenko V.P., Kalian D.O. Technologies for distributing time scale for decision making support system to reduce the accident rate in smart power grid // Abstracts XXIX International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2017». 10-13 may 2017. Mukachevo, Ukrain, K.: «МП Леся», 2017. - С.64.

89. Кальян Д.О., Коваль В.В., Самков О.В., Шкляревський І.Ю. Підвищення енергоефективності інтегрованих систем електропостачання Smart-технологій шляхом високонадійного синхроінформаційного забезпечення / Матеріали XVIII міжнародної науково-практичної конференції “Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті”, м. Київ, НТУУ «КПІ», Інститут відновлювальної енергетики НАНУ, 27 – 29 вересня 2017 р.- К: Поліграфічна компанія ТОВ «КАЛЕНДАРЬ», 2017. – С.139-142.

90. Коваль В.В., Кальян Д.О., Максименко Ю.А., Самков О.В. Оптимальне за швидкодією фазове автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу інтегрованих систем електропостачання Smart-технологій // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2018. – Вип.283. – С.89-98.

91. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 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.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДІВ ТА СТРУКТУР АСК, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ, ШВИДКОДІЇ ТА НАДІЙНОСТІ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПСЦС

2.1. Формування технічних вимог до розробки засобів контролю та вимірювань багатомономенклатурного виробництва ПСЦС гнучких інтегрованих систем

За результатами виконаного в першому розділі аналізу, очевидним є зростання питомої ваги інформаційних потоків в системі контролю та вимірювань показників якості багатомономенклатурного гнучкого виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів (ПСЦС), а також в процесі їх технічної експлуатації у складі сучасних високотехнологічних систем, що виводить на передній план автоматизовану інформаційну систему контролю, як центральний компонент, що забезпечує вимірювання, передавання, обробку та збереження даних про якість ПСЦС [1-13].

Зазначимо, що процес вимірювання зводиться до порівняння з одиницею певної фізичної величини з метою отримання кількісної інформації, а за умов контролю фізичний показник порівнюють з його нормою з метою визначення відхилень даного показника (якісна характеристика об'єкта - "придатний" - "непридатний", що відповідно спрощує процес прийняття рішення оператором) [14].

По суті задачі системи контролю, згідно стандарту, «полягають в проведенні двох основних операцій:

- отримання інформації про фактичний стан об'єкта, про ознаки і показники його властивостей (первинна інформація);
- зіставлення первинної інформації з заздалегідь встановленими вимогами, нормами, критеріями (вторинна інформація)» [14].

Отже, процес контролю об'єкта зводиться до перевірки відповідності ознак і показників його властивостей встановленим технічним вимогам [13, 14].

На підставі отриманих за допомогою АСК даних і здійснюється оперативно-технологічне керування процесом багатомноменклатурного виробництва ПСЦС в концепції гнучких інтегрованих систем [13, 15, 16]. Відомо, що процес керування в системах зі зворотнім зв'язком організовується відповідно до програми керування, котра задана для всіх моментів часу або відома тільки для поточних моментів часу. Цей процес полягає у визначенні відхилень поточного стану (часові (фазові) співвідношення між опорним і контрольованим сигналом) від стану, передбачуваного на даний момент часу відповідно до програми формування закону керування в системі (задаються технічними умовами, нормами, шаблонами тощо), з метою забезпечення заданої якості за умови виконання обмежень на залучені ресурси та обов'язкового забезпечення прийнятних показників ефективності керування [13, 15-17].

На основі проведеного аналізу можна стверджувати, що ефективність та надійність керування технологічним процесом виробництва ПСЦС прямим чином залежить від точності та своєчасності отриманої інформації, зібраної за результатами вимірювань засобами інформаційно-керуючої системи контролю, та переданої оператору-технологу керуючого центру для здійснення власне функцій керування. Сучасні керуючі системи оперативного керування є складними апаратно-програмними комплексами, які прийнято розділяти на апаратну та інформаційну підсистеми, що особливо важливо в контексті досліджень АСК, як складових виробничого технологічного процесу, а також в процесі їх технічної експлуатації у складі сучасних високотехнологічних систем відповідних галузей економіки країни [1-3, 4, 5, 13, 15-18].

Для забезпечення виконання сформульованих задач АСК показників якості ПСЦС повинна мати наступні сервісні можливості [4, 5, 13]. По-перше, вона повинна візуально відображати в режимі реального часу поточний стан усіх каналів у текстовому форматі (цифровому виді), а також для заданої кількості каналів будувати динамічний графік (зображення - індивідуально для

кожного графіку). Обов'язково повинно бути забезпечено автоматичне оновлення візуального відображення. По-друге, АСК повинна відображати наявність/відсутність аварійних повідомлень (тобто випадків невідповідності показників контрольованих синхросигналів встановленим критеріям) щодо поточного стану (наявність/відсутність аварії в даний момент часу). Окрім візуалізації повинна бути забезпечена можливість проведення спеціалізованої обробки результатів вимірів, а також децентралізоване зберігання даних за фіксований проміжок часу. По-третє, АСК повинна забезпечувати безпосередні і достовірні результати контролю якості сигналу синхронізації з централізованим накопиченням даних і візуальним представленням характеристик сигналу у реальному часі в центральному пункті керування [4, 5, 13]. Разом з цим, повинна бути передбачена можливість доступу до даних про результати вимірів за минулі періоди, а також можливість "зшивання" окремих масивів вимірювань.

2.2. Аналіз методів первинного перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал та розроблення структури оригінального адаптивного цифрового фазового дискримінатора з використанням ПЗ Quartus Prime Lite Edition

До складу сучасних систем контролю та вимірювань параметрів якості ПСЦС автоматизованих систем керування ТП гнучких інтегрованих систем входять датчики, як первинні перетворювачі, що здійснюють перетворення електричних величин в електричні цифрові сигнали, представлені у виді цифрових даних результатів вимірювань [4, 5, 13]. ПСЦС, в основі функціонування яких використовуються квазіперіодичні сигнали для оцінки якісних показників потребують проведення вимірювань часових або фазових співвідношень між опорним і контрольованим сигналом [4, 5, 13].

Традиційно основними вимірювальними приладами і засобами вимірювань часових співвідношень є осцилографи, приймачі сигналів

еталонних частот, цифрові вимірювачі інтервалів часу. Використовуються методи порівняння, у яких проводиться порівняння вимірюваного періоду або частоти з еталонною частотою джерела зразкових коливань [19]. Очевидно, що для їх реалізації необхідний еталонний генератор більш високої точності, тому в ідеалі, апаратура для частотно-часових вимірів повинна утворювати єдиний комплекс приладів забезпечуючи можливість проведення вимірювань з безпосередньою їх «прив'язкою» до Державного стандарту частоти і часу. В такому випадку всі ці методи можуть забезпечувати мінімальну похибку і навіть теоретично відсутність систематичної похибки [19]. Умови настання такої події для кожного з методів свої, але в їх основі лежить наявність високоточного опорного (еталонного, зразкового, провідного) сигналу на основі якого проводяться виміри.

Розглянута методологія вимірювання застосовувалася головним чином тоді, коли використовувалися вимірювальні комплекси параметрів синхронізації, що складаються з деякої кількості стандартних дорогих вимірювальних приладів [19]. Поява сучасних спеціалізованих і недорогих інтегральних мікросхем для вимірювання параметрів синхросигналів змінила ситуацію на користь останніх. Наприклад, прецизійний вимірювач часових інтервалів реалізований у вигляді мікросхеми пропонується компанією Asat mess electronic GmbH, Німеччина [5]. Даний виробник пропонує, можна сказати, нетрадиційний підхід до обробки сигналів з використанням аналогово-цифрового перетворення. В основі вимірювальних схем Asat лежить метод перетворення цифрових електричних сигналів в часовий інтервал та вимірювання цих інтервалів за допомогою сучасних (COMS) часо-цифрових перетворювачів (ЧЦП) з використанням відповідних запатентованих алгоритмів обробки отриманих результатів вимірювань.

Сучасна технологія COMS забезпечує можливість конструювання за єдиною технологією ЧЦП з використанням ліній затримки сигналів. Зазначена технологія у комбінації з мікропроцесором дало змогу компанії Asat створити

недорогі, компактні ЧЦП з субнаносекундною роздільною здатністю. В основі принципу роботи ЧЦП покладено метод, згідно якого виконується підрахунок абсолютної кількості фронтів сигналу через зазначені лінії затримки.

Недоліком даного методу є вплив температури на час проходження сигналу через лінію затримки. Очевидно, що такі ЧЦП вимагають додаткового калібрування до початку вимірювань. Алгоритмом роботи ЧЦП передбачається проведення калібрувальних вимірювань одного або двох періодів відносно зразкового сигналу, який формується додатковим зовнішніми або вбудованими лініями затримки. В табл. 2.1 наведено результати аналізу основних параметрів ЧЦП компанії Asam.

Таблиця 2.1 – Основні параметри часо-цифрових перетворювачів

Назва	Кількість каналів	Роздільна здатність	Максимальний діапазон вимірювань
TDC-F1	4, 8	60 пс, 120 пс	7,8 мкс
TDC-GPX	2, 8	10 пс, 27 пс, 41 пс, 81 пс	10 мкс
TDC-GP2	2	65 пс	5 мкс

З наведеного результату аналізу ЧЦП компанії Asam можна зробити висновок, що дійсно дані мікросхеми являються прецизійними, недорогими, компактними пристроями з високою роздільною здатністю, що відносить їх до пристроїв пікосекундного діапазону. Проте їх застосування у складі системи контролю та вимірювань параметрів якості ПСЦС ускладнюється, зважаючи на те, що діапазон вимірювання даних ЧЦП значно менший того діапазону вимірювань, який необхідний для забезпечення достовірного результату контролю (максимальний діапазон вимірювань складає 10 мкс у TDC-GPX) [5].

Альтернативою розглянутих вимірювальних мікросхем побудованих за технологією COMS є асинхронний цифровий часовий дискримінатор, який відноситься до радіотехнічних, телекомунікаційних, інформаційних пристроїв

та може використовуватися для вимірювання часового розходження імпульсних послідовностей цифрових вимірювальних системах, систем синхронізації, автопідстроювання періоду, фази частоти [20].

Асинхронний цифровий часовий дискримінатор дає змогу асинхронно (в будь-який момент часу, без необхідності синхронізації процесів отримання цифрових значень вимірювального часового розходження між імпульсними послідовностями та їх зчитуванням) отримувати кодову комбінацію, яка визначає величину часового розходження між першою та другою імпульсними послідовностями, не більше ніж за половину інтервалу часу вимірювання, обмеженого тільки розрядністю лічильників імпульсів, статичних регістрів та комутатора [20]. У цьому разі, змінюючи розрядність лічильників імпульсів дискримінатора можна змінювати його діапазон вимірювань згідно встановлених технічних вимог.

До недоліку асинхронного часового дискримінатора належить відсутність керування станом лічильника імпульсів, відносно стану додаткового лічильника імпульсів, на початок періоду вимірювання, що не забезпечує формування достовірної кодової комбінації про величину похибки часу двох взаємно незалежних періодичних імпульсних послідовностей, а, отже, можливості виникнення помилок.

З метою усунення вказаних недоліків розроблено оригінальний пристрій - адаптивний цифровий фазовий дискримінатор (АЦФД), на який отримано патент України на винахід [21]. Пристрій забезпечує адаптивне кероване формування кодової комбінації про величину похибки інтервалу часу між двома взаємно незалежними квазіперіодичними імпульсними послідовностями та підвищення достовірності результатів вимірювань, котрі представлені у цифровому виді.

АЦФД може застосовуватись в автоматичі, комп'ютерних, інформаційних технологіях для порівняння фаз двох взаємно незалежних

коливань з метою вимірювання кута зсуву фази (часового інтервалу) між ними і представлення результату в цифровому виді [21].

На рис. 2.1 наведено схему часо-цифрового перетворення [20, 21], котра представлена у вигляді модуля zh023, який створено з використанням програмного забезпечення Quartus Prime Lite Edition. АЦФД має вхід CLK, на який подається сигнал першої вхідної імпульсної послідовності (опорний сигнал) та вхід C1, на який подається сигнал від другої вхідної імпульсної послідовності, а також вхід R, що забезпечує синхронне зчитування з 11 цифрових виходів пристрою D5...D15, на яких формується кодова комбінація, що відповідає часовій неузгодженості між першою і другою вхідними імпульсними послідовностями. Адаптивно-кероване формування кодової комбінації про величину похибки інтервалу часу між двома взаємно незалежними квазіперіодичними імпульсними послідовностями забезпечується завдяки каналу керування по входу W.

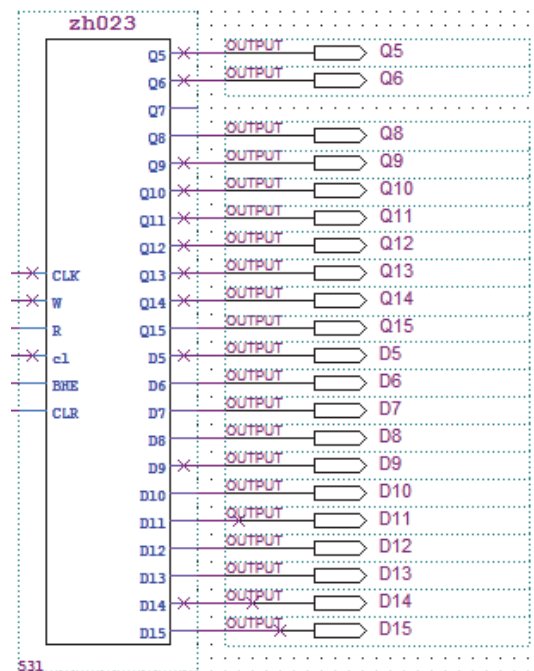


Рис. 2.1. Схема АЦФД, який представлено у вигляді модуля zh023

На рис. 2.2 наведена схема модуля zh023, що має у своєму складі типові цифрові елементи: AND2, NOT, 74163, 74374.

Технічне рішення винаходу забезпечує формування кодової комбінації з підвищеною достовірністю представлення результатів вимірів у цифровому виді та можливості адаптивно-керованого формування кодової комбінації.

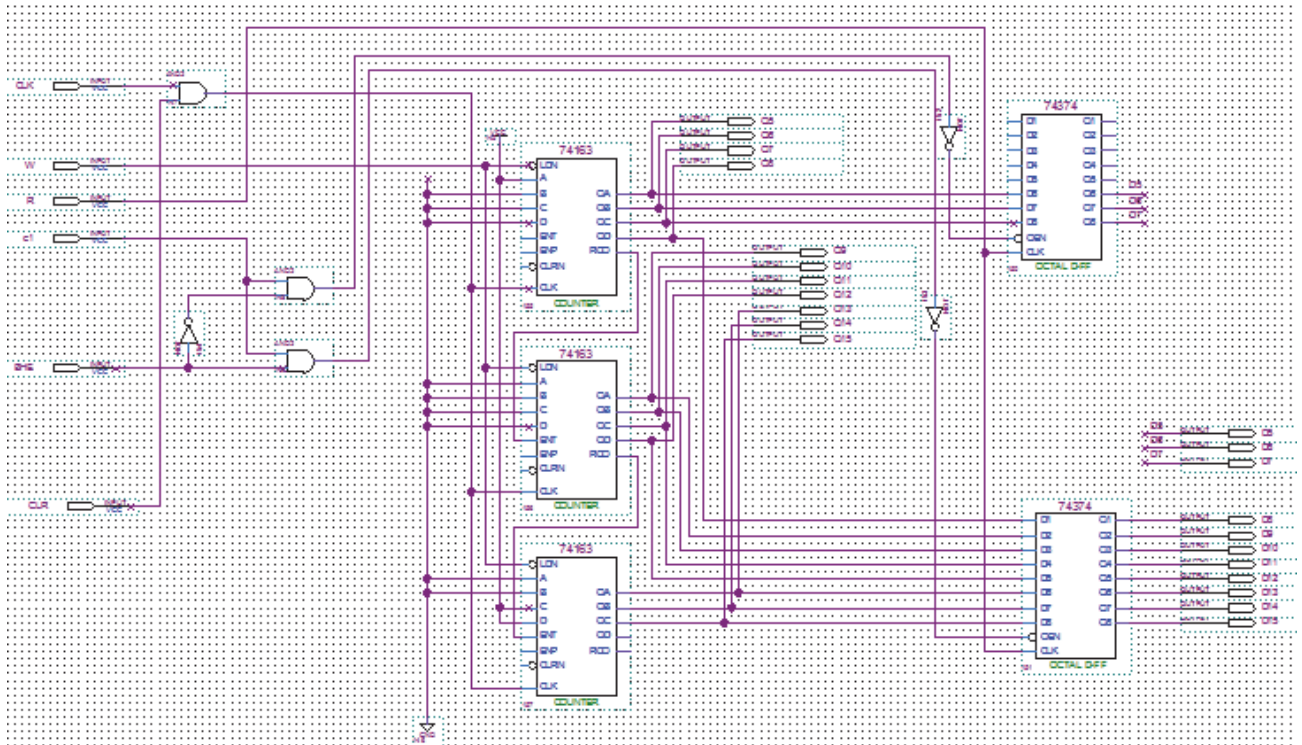


Рис. 2.2. Схема модуля zh023, що має у своєму складі типові цифрові елементи

2.3. Розроблення схеми формування опорного сигналу з використанням підсистеми фазового автопідстроювання частоти

Відомо, що первинне перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал ґрунтується на порівнянні інтервалу часу, що вимірюється з еталонною частотою або тривалістю періоду джерела зразкових коливань [4, 5, 21]. Звідси стає очевидним те, що для реалізації методу порівняння необхідний еталонний (опорний) генератор, що формує сигнал з високою точністю.

У формувачах опорного сигналу в якості опорного генератора використовується генератор, що керується напругою, яка формується в результаті роботи системи фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ). Система ФАПЧ у складі блоку первинних перетворювачів (БПП) виконує

функції підсистеми, задачею якої є формування високостабільного опорного цифрового сигналу з еталонним значенням тривалості тактового інтервалу (періоду) за рахунок фазової синхронізації від провідного генератора.

На рис. 2.3 наведена схема формування опорного сигналу БПП з використанням ПФАПЧ та можливості отримання синхронізуючого для неї сигналу від різних високостабільних джерел: системи GPS, прецизійного джерела частоти, обладнання для передачі даних, що передаються по IP-мережі за протоколом RTP [1-13]. Вибір того чи іншого сигналу, в якості синхронізуючого, забезпечується мультиплексором. У разі реалізації БПП з власним еталонним джерелом синхронізуючого сигналу може використовуватись автономний, вбудований у пристрій, високостабільний генератор. Прикладом такої реалізації є вимірювач параметрів синхронізації PJS-2000 з вбудованим атомним (рубідієвим) стандартом частоти фірми PLLB Electronica S.p.A. [23].

Розглянемо процес фазового автопідстроювання генератора, що керується напругою, за допомогою котрого виконується його синхронізація від провідного (еталонного) генератора. Цей процес можна реалізувати побудовою замкнутої системи автоматичного керування з фазовим автопідстроюванням частоти керованого генератора та використанням фазового дискримінатора (ФД). В системі ФАПЧ вхідний і вихідний сигнали синхронізуються за рахунок автоматичного процесу керування в кільці зворотного зв'язку на основі значення різниці фаз (похибки системи) поміж ними. Задача автоматичного керування формувача опорного сигналу (ФОС) полягає у відновленні прийнятого від провідного (еталонного) генератора синхронізуючого сигналу, його фільтрації і точного підстроювання в ПФАПЧ значущих моментів цифрового тактового синхросигналу.

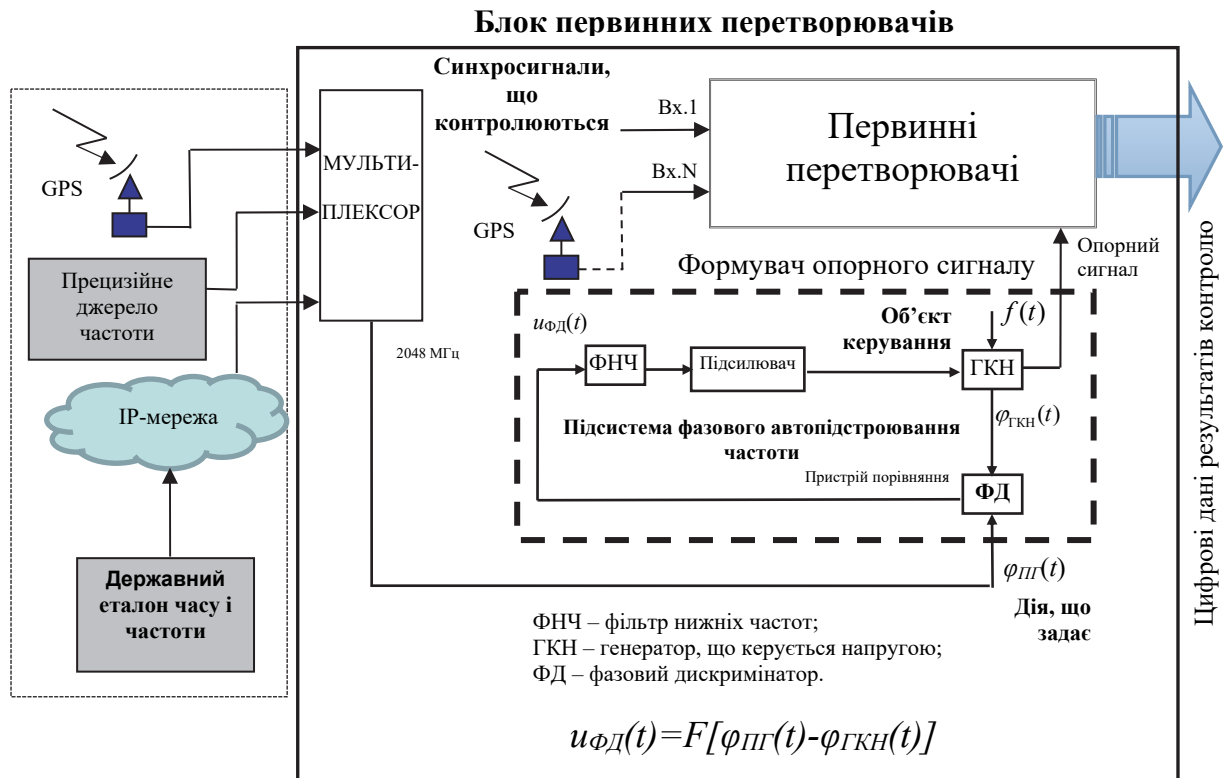


Рис. 2.3. Схема формування опорного сигналу з використанням ПФАПЧ

2.4. Формування вихідної множини альтернатив схмотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК

У загальному випадку процес формування вихідної множини альтернатив (ВМА) схмотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК описується алгоритмом, що включає два етапи: формування можливих альтернатив і перевірка їх на допустимість. У конкретних алгоритмічних схемах етапи формування ВМА можуть поєднуватися, оскільки в деяких випадках вони здійснюються за допомогою однієї і тієї ж процедури.

Варто зазначити на те, що основною задачею теорії прийняття рішень є розділення ВМА на декілька заздалегідь заданих упорядкованих груп (класів рішень). У реальних ситуаціях альтернативи схмотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК описуються багатьма різноманітними ознаками, і число таких ознак може бути дуже великим (десятки і сотні). У загальному випадку формування

ВМА схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК починається зі складання універсальної множини всіх теоретично можливих альтернатив. Якщо у разі вирішення сформульованої задачі враховувати всі обмеження щодо схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК, то така задача не завжди може бути розв'язаною. Звідси висновок, першою процедурою має бути визначення деякої області альтернатив схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК за умови можливості їх реальної практичної (натурної) реалізації.

У разі формування множини альтернатив схемотехнічної реалізації ПФАПЧ доцільно дотримуватися вже відомих і апробованих рекомендацій.

Шляхом аналізу всіх обмежень необхідно виділити множину допустимих рішень побудови систем автопідстроювання частоти ПСЦС. З множини допустимих рішень виключити варіанти «очевидно непридатні» з точки зору мети прийняття рішення. Серед решти альтернатив побудови систем автопідстроювання частоти ПСЦС слід виключити ті з них, які за всіма показниками «чи не краща» і хоча б за одним показником «гірша», ніж деяке допустиме рішення [24].

Зазначимо, що формування вихідної множини альтернатив реалізації ПФАПЧ БПП АСК будемо використовувати результати виконаних досліджень та класифікації, котра наведена в монографії [25]. Також потрібно зазначити, що для покращення технічних характеристик ПФАПЧ передбачається застосування додаткових електронних пристроїв, блоків і навіть мережі, наприклад, пристрій цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти [26], телекомунікаційна мережа синхронної цифрової ієрархії, IP-мережа [27].

В якості першого варіанту схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК розглянемо аналогову систему фазового автопідстроювання частоти з кільцем від'ємного зворотного зв'язку та способом керування за відхиленням [5, 25, 28], що може працювати в різних режимах (рис. 2.4).

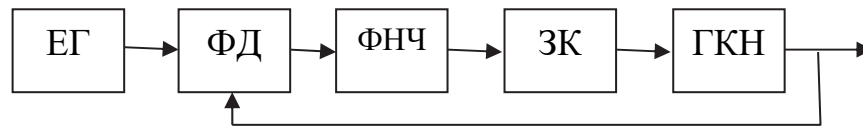


Рис. 2.4. Структурна схема аналогової ПФАПЧ БПП АСК [25]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФД – фазовий детектор;
 ФНЧ – фільтр низьких частот;
 ЗК – засіб керування;
 ГКН – генератор, що керується напругою.

В якості другого варіанта схемотехнічної реалізації ПФАПЧ розглянемо схему цифрової системи ФАПЧ, на основі якої розроблено значну кількість варіантів побудови оригінальних пристроїв [25]. Мабуть найпростішим варіантом реалізації цифрової ФАПЧ є схема, котра зображена на рис. 2.5.

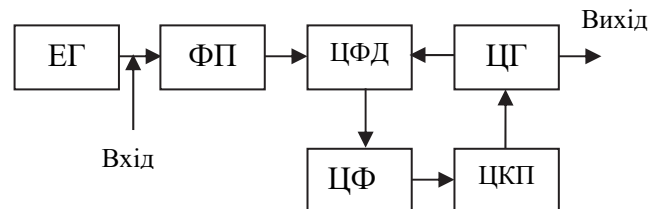


Рис. 2.5. Найпростіший варіант реалізації цифрової підсистеми фазового автопідстроювання частоти [25]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФП – формуючий пристрій;
 ЦФД – цифровий фазовий дискримінатор;
 ЦГ – цифровий генератор;
 ЦКП – цифровий керуючий пристрій;
 ЦФ – цифровий фільтр.

В Додатку В наведено ще десять схем ВМА (рис. В.1 - рис. В.10), з-поміж яких, на основі розв'язку задачі багатокритерійного прийняття рішення, робиться остаточний вибір ПФАПЧ БПП АСК з урахуванням особливостей кожної схемотехнічної реалізації. Зазначений вибір доцільно робити за допомогою багатокритерійних методів прийняття рішення, котрі описані у багатьох наукових публікаціях. Відомі методи необхідно застосувати, у кількості, яка достатньою мірою забезпечує повноту порівняння ВМА схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК.

2.5. Розроблення структури пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти [26]

Метою розроблення є підвищення надійності та швидкодії контролю періодичності імпульсної послідовності сигналу синхронізації [26]. «Сформульована мета досягається завдяки можливості здійснення контролю в кінці кожного періоду сигналу, який задається додатковим опорним генератором, і формується завдяки лічильникам, цикли роботи яких зміщені один щодо одного на тактовий інтервал. Таким чином, в кінці кожного циклу, що задається трьома тактовими інтервалами сигналу опорного генератора, на виході відповідного додаткового синхронного D-тригера формується інформація про контрольовану періодичність імпульсної послідовності тактової частоти (наявність необхідної кількості імпульсів тактової частоти або їх відсутність)» [26].

Запропонована структура пристрою, схема якого наведена на (рис. 2.6), дозволяє забезпечити можливість підключення основного, а також додаткового опорних сигналів відповідно до першої і третьої входної шини пристрою, на основі яких визначається наявність або відсутність імпульсів тактової частоти поданих на другу входну шину, що підвищує надійність контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти. У разі надходженні на лічильний вхід лічильника двох імпульсів протягом інтервалу часу, відведеного для підрахунку контрольованих імпульсів, на виході другого розряду даного лічильника формується сигнал "логічної 1", який свідчить про необхідну наявність контрольованих імпульсів тактової частоти. У випадку відсутності хоча б одного з цих двох імпульсів на виході другого розряду лічильника формується сигнал "логічного 0", який свідчить про відсутність періодичності імпульсної послідовності тактової частоти. Зазначені вихідні сигнали зчитуються до відповідних синхронних D-тригерів, виходи яких об'єднуються і на виході додаткового логічного елементу І формується вихідний сигнал пристрою.

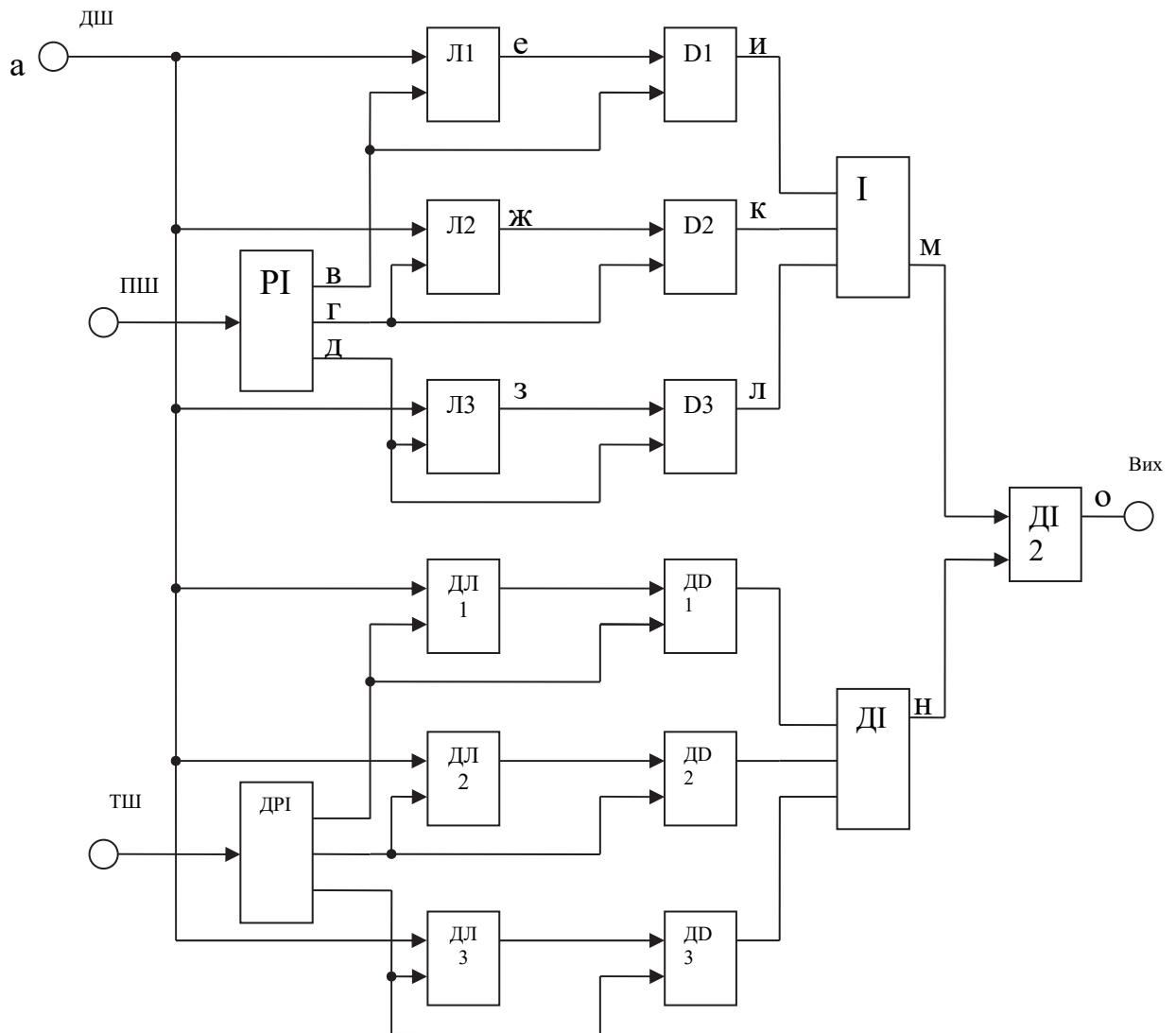


Рис. 2.6. Структура пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти

РІ - розподільувач імпульсів;

Л1, Л2, Л3 – відповідно перший, другий і третій лічильники;

І - логічний елемент І;

D1, D2, D3 - відповідно перший, другий і третій синхронний D-тригер;

ДРІ - додатковий розподільувач імпульсів;

ДЛ1, ДЛ2, ДЛ3 - відповідно додатковий перший, другий і третій лічильники;

ДІ - додатковий логічний елемент І;

ДД1, ДД2, ДД3, - відповідно додатковий перший, другий і третій синхронний D-тригер;

ДІ2 - другий додатковий елемент І;

ПШ - перша входна шина;

ДШ - друга входна шина;

ТШ - третя входна шина.

2.6. Аналіз впливу структури і умов функціонування блоку контролю періодичності на якість прийняття рішення в АСК

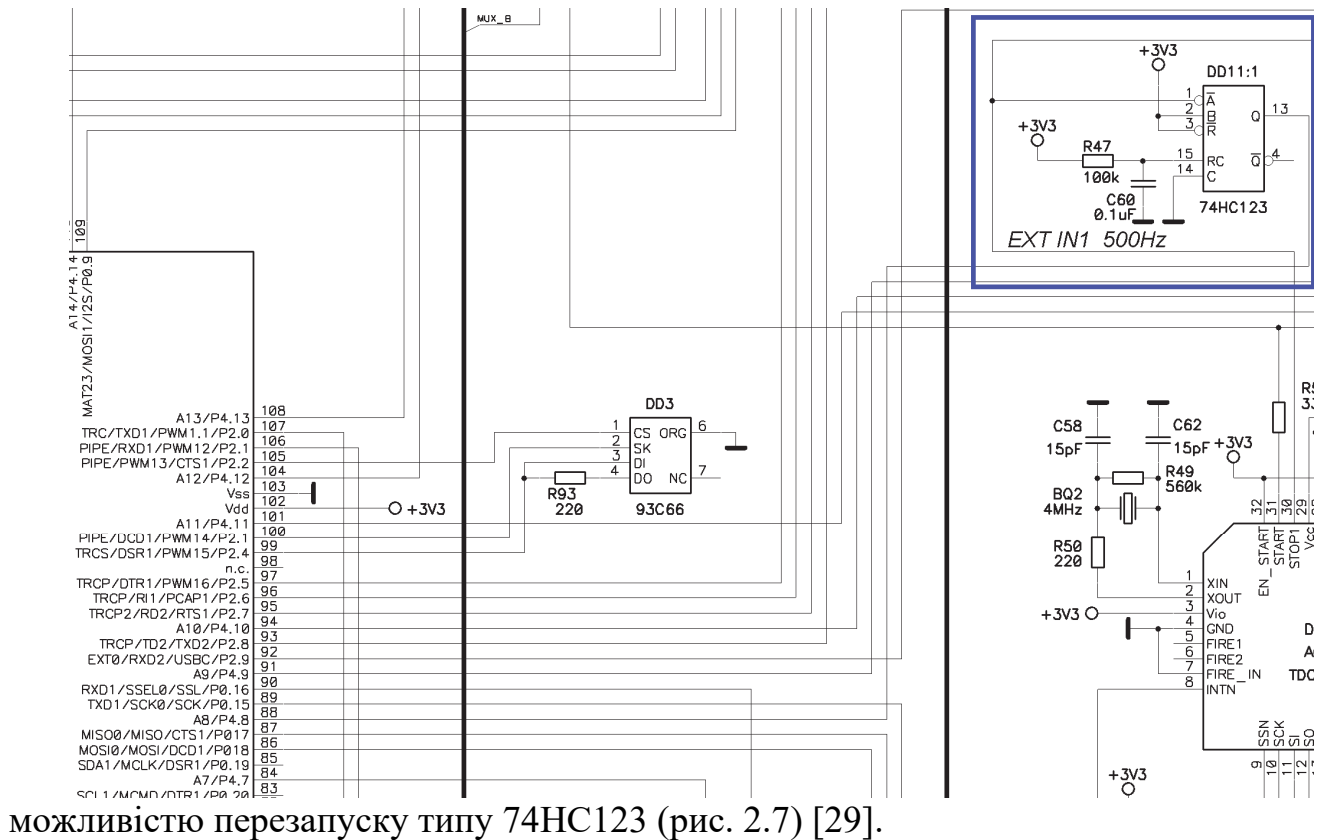
Блок контролю періодичності (БКП) забезпечує можливість оперативно усувати невизначеність про наявність або відсутність контрольованого цифрового синхросигналу з заданою тактовою частотою, за рахунок чого підвищується якість прийняття рішення в АСК. Найбільшу кількість однотипних блоків в АСК показників якості ПСЦС складають блоки контролю періодичності БКП [5, 13, 27, 28]. БКП побудовані на типових мікросхемах мультівібратора з чеканням та можливістю перезапуску типу 74НС123 виробництва багатьох відомих фірм, наприклад, Texas Instruments Incorporated [29], що мають широке розповсюдження, доступні для придбання і недорогі.

БКП дають можливість усувати невизначеність про наявність або відсутність контрольованого сигналу з заданою тактовою частотою та формою (в коді NRZ або HDB3). Оператор-технолог на основі аналізу сигналів, що надходять від БКП та даних результатів вимірювань, приймає рішення щодо результатів процесу контролю.

Фрагмент принципової схеми плати інтерфейсів АСК показників якості ПСЦС, на якому прямокутником з потовщеними лініями виділено БКП, наведений на рис. 2.7 (принципова схема розроблена з використанням програмного забезпечення P-CAD). Синхросигнал, що контролюється, подається на контакт 1 мікросхеми DD11:1 блоку контролю періодичності БКП. Вихідний сигнал БКП формується на контакті 13 мікросхеми DD11:1 і поступає на мікроконтролер LPC2378FBD144 (фрагмент мікроконтролер розташований у лівому нижньому квадранті на рис. 2.7), де оброблюється та разом з іншими цифровими даними надходить через конектор RJ-45(Ethernet) на робоче місце оператора-технолога.

Прийняття рішення про наявність або відсутність синхросигналу здійснюється на основі комплексного аналізу даних вимірювань та результатів порівняння в БКП тривалості його тактового інтервалу з зразковим часовим

інтервалом, що формується інтегруючою RC-ланкою. Зразковий часовий інтервал є перехідним процесом RC-ланки за умови дії імпульсу, котрий подається на інвертований вхід А мікросхеми мультивібратора з чеканням та

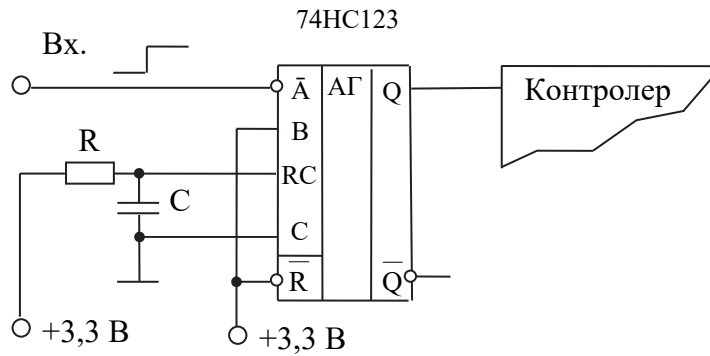


можливістю перезапуску типу 74HC123 (рис. 2.7) [29].

Рис. 2.7. Фрагмент принципової схеми плати інтерфейсів АСК показників якості ПСЦС з БКП, яка розроблена засобами P-CAD

Функціональна схема БКП, що розроблена на основі мікросхеми 74HC123, наведена на рис. 2.8.

Тривалість імпульсу на виході Q мікросхеми (див. рис. 2.8) визначається параметрами інтегруючої RC-ланки (резистор R і конденсатор C, які підключаються до виводів RC і C мікросхеми мультивібратора 74HC123). Запуск мультивібратора здійснюється після надходження фронту імпульсу на інвертований вхід А, в результаті чого на його виході Q формується вихідний імпульс з значенням логічної 1 (рис. 2.9) [29]. Значенню стану логічної 1 на виході БКП відповідає наявності періодичності в контрольованому сигналі, а



логічному 0 - відсутність періодичності.

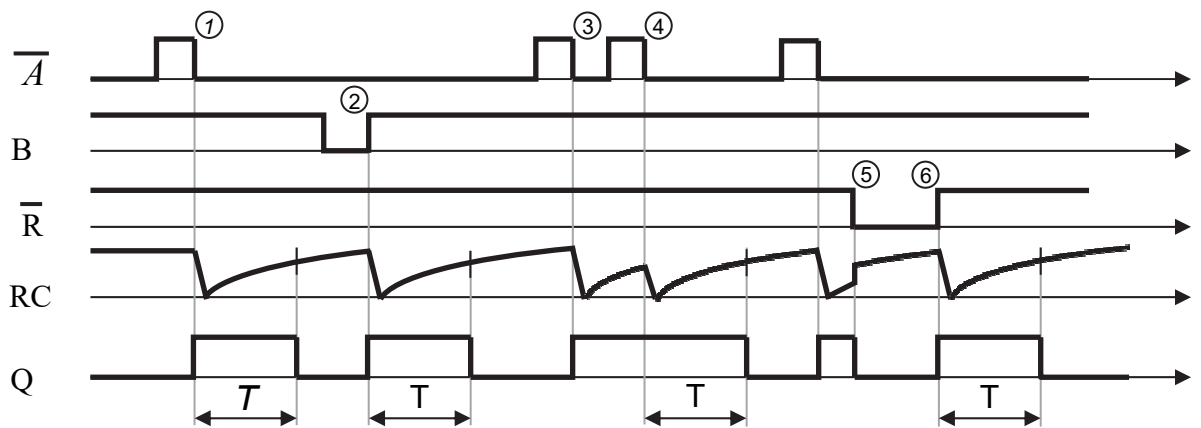
Рис. 2.8. Функціональна схема БКП

Тривалість імпульсу $T_{\text{БКП}}$ на виході Q мікросхеми визначається величиною τ , яка є тривалістю перехідного процесу в інтегруючій RC-ланці. За рахунок можливості перезавантаження мультивібратора, у разі надходженні наступного фронту контрольованого імпульсу на інвертований вхід A , тривалість вихідного імпульсу $T_{\text{БКП}}$ продовжується ще на величину τ . Отже, підтримується безперервне значення логічної 1 на виході БКП, за умови надходження наступного фронту контрольованого імпульсу за час менший τ , що відповідає наявності періодичності в контрольованому синхросигналі.

Якщо імпульс перезавантаження не надійде за час τ , то на виході БКП сформується вихідний імпульс з значенням логічного 0, що буде свідчити про відсутність періодичності у контрольованому синхросигналі. Отже, тривалість перехідного процесу в інтегруючій RC-ланці τ по суті виступає в якості зразкового часового інтервалу з яким порівнюються тривалості тактового інтервалу контрольованого синхросигналу. У разі не перевищення тривалості тактового інтервалу (включно і відсутності самого сигналу) над тривалістю зразкового часового інтервалу τ , на виході БКП формується вихідний імпульс з значенням логічного 0, що свідчить про відсутність періодичності у контрольованому синхросигналі.

На часових діаграмах (рис. 2.9) проілюстровано принцип роботи БКП.

Для виконання налаштування БКП під час його виготовлення, тобто за температури $t^o=20^oC$, а саме встановлення заданого номінального значення тривалості перехідного процесу в інтегруючій RC-ланці τ , використовується схема зі змінним опором $R_{нал}$ (рис. 2.10), або схема з зміною ємністю $C_{нал}$ (рис. 2.11). На схемах рис. 2.10 і рис. 2.11 відповідно показано послідовне і паралельне з'єднання електричних компонентів, що використовуються для налаштування, а також враховано паразитну ємність $C_{пар}$, яка обумовлена ємностями монтажу та вхідними ланцюгами мікросхеми мультивібратора.



1. Запуск по спаду позитивного імпульсу
2. Запуск по фронту негативного імпульсу
3. Запуск по спаду позитивного імпульсу
4. Перезапуск по спаду позитивного імпульсу
5. Очистка
6. Запуск

Рис. 2.9. Часові діаграми роботи БКП

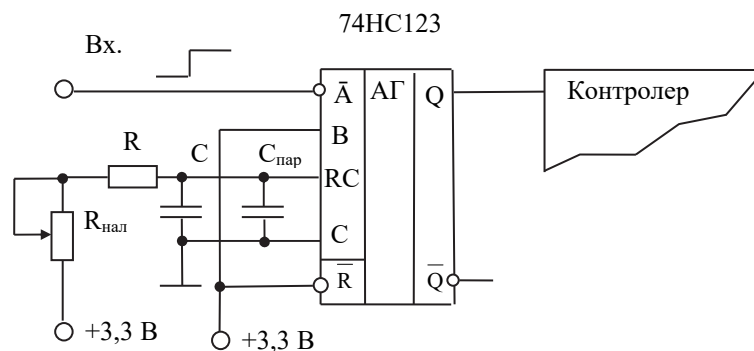


Рис. 2.10. Функціональна схема БКП зі змінним налагоджувальним опором $R_{нал}$

З аналізу наведених на рис. 2.10 та рис. 2.11 схем можна стверджувати, що інтегруюча RC-ланка з мікросхемою мультивібратора 74HC123 БКП складаються з великої кількості реальних або умовних електричних компонентів, кожна з яких в якійсь мірі впливає на температурну нестійкість тривалості перехідних процесів (ТПП) зразкового сигналу і, як наслідок, на правильність прийняття рішення про усунення невизначеності щодо наявності або відсутності контрольованого сигналу [5, 13, 27-29].

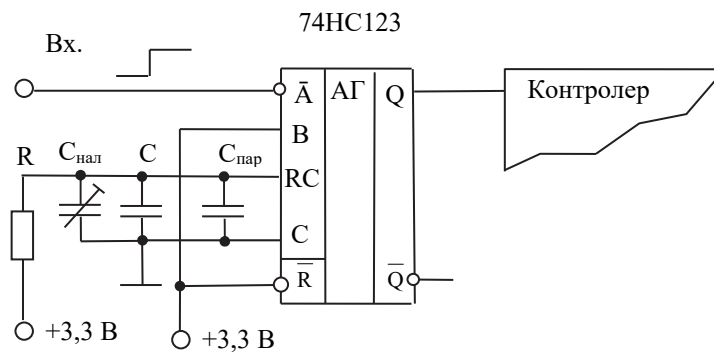


Рис. 2.11. Функціональна схема БКП зі змінною ємністю $C_{нал}$

Проаналізуємо, як відбувається вплив електричних компонентів БКП на температурну нестійкість ТПП. Очевидно, що для розрахунку температурної нестійкості ТПП БКП АСК необхідно мати характеристики кожного з складових його елементів у вигляді середнього значення (математичного очікування $M(\Delta\tau_1)$) і дисперсії $D(\Delta\tau_1)$ величини $\Delta\tau_1$ – відхилення тривалості перехідного процесу у разі зміни температури на 1°C [30-36].

В науково-технічній літературі досить детально висвітлені методи розрахунку ймовірнісних характеристик величини відхилення частоти сигналу $\Delta\omega_1$ для контурів LC, а саме математичного очікування $M(\Delta\omega_1)$. У найбільш систематизованому вигляді, наприклад, вони викладені в роботі С.С. Аршинова [37] стосовно до середніх значень температурного коефіцієнта частоти (ТКЧ).

Іноді застосовують метод розрахунку меж допусків на $TKЧ$ і через них – границь допуску на $\Delta\omega_1$ шляхом підстановки крайніх (максимальних або мінімальних) можливих значень параметрів кожного елемента коливального LC контуру в формули, виведені для середніх значень, причому в найбільш несприятливій комбінації. Проте такий метод є глибоко помилковим. Він не тільки дає завищені (ширші) границі допуску, ніж вони спостерігаються насправді, але і неправильно оцінює питому вагу неточності кожного елемента контуру в загальному полі допусків [30-33]. Не може виправити справу і множення отриманих завищених границь розкиду на коефіцієнт одночасності [30-33]. Таким чином, єдино правильними способами вирішення таких задач є використання методів теорії ймовірностей [30-36].

У разі використання крайніх максимальних або мінімальних значень в розрахунках тобто, так званого, «мінімаксного» підходу до визначення тривалості перехідного процесу зразкового сигналу мультівібратора БКП, то він передбачає у разі розрахунку допусків і точності електричних компонентів обов'язкове врахування відхилень кожної складової у сенсі прийняття їх найгірших значень з усіх можливих значень. А потім ще припускають те, що ці відхилення будуть складатися з самої гіршої мислимої комбінації. В результаті такий підхід має протиріччя, як самому собі, так і фактичному стану зазначеного перехідного процесу зразкового сигналу мультівібратора БКП. Він призводить до невиправданих підвищень технічних вимог до електричних компонентів БКП, та, в цілому, до збільшення вартості і зниження економічної ефективності пристрою [8].

Зважаючи на вищевикладене, актуальним є розробка теоретико-ймовірнісних методів розрахунку вимог до блоків контролю періодичності АСК, що забезпечують автоматизований контроль якості синхросигналів та їх складових – електричних компонентів.

2.7. Розроблення теоретико-ймовірнісного методу дослідження температурної нестійкості ТПП зразкового сигналу блоку контролю періодичності

2.7.1. Статистичний аналіз температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу мультівібратора БКП. Аналіз температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу виконаємо за умови лінійності температурних характеристик електричних компонентів мультівібратора БКП [8]. У цьому випадку математичне очікування $M(\Delta\tau_1)$ відхилення тривалості перехідного процесу у разі зміни температури на 1°C визначається рівнянням [30]

$$M(\Delta\tau_1) = \tau \cdot M(TKT), \quad (2.1)$$

де τ – номінальне значення тривалості перехідного процесу;

$M(TKT)$ – математичне очікування температурного коефіцієнта тривалості (TKT) перехідного процесу.

Що ж стосується розкиду величини який буде спостерігатися за умов реальної експлуатації певної кількості випущених гнучким інтегрованим виробництвом ПСЦС, то його розрахунку приділялася недостатня увага. Натомість, розрахунок саме розкиду величини має першочергове значення. Це пояснюється тим, що у разі температурної компенсації тривалості перехідного процесу мультівібратора БКП практично можливо отримати $M(TKT) = 0$, але у жодному разі неможливо ліквідувати розкид величини TKT . Буває навіть так, що у випадку термокомпенсації розкид величини TKT збільшується і стає домінуючим за умови оцінки впливу температури на нестійкість ТПП. Звідси робиться висновок, що для раціонального конструювання високостабільних пристроїв АСК дуже важливо вміти правильно оцінювати можливий розкид величини $\Delta\tau_1$ і особливо роль кожного елемента БКП АСК в створенні області різних значень $\Delta\tau_1$. В першу чергу це стосується БКП пристроїв синхронізації,

що використовуються для контролю сигналів, які резервуються і мають надто жорсткі вимоги до форми вихідного сигналу після переключення на резерв (наприклад, у разі резервування цифрового сигналу з частотою 2048 кГц величина спотворення на виході (розрив фази) повинна знаходитись в межах ± 3 нс [38]) та вхідних сигналів з частотами 1544 кГц, 2048 кГц, 5 МГц, 10 МГц й відповідними формами (NRZ, HDB3).

Для визначення температурного коефіцієнта тривалості перехідного процесу зразкового сигналу в інтегруючій RC-ланці мультівібратора БКП АСК можна використати відому формулу:

$$TKT = -\frac{1}{2}(\alpha_C + \alpha_R), \quad (2.2)$$

де α_C – температурний коефіцієнт ємності інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП;

α_R – температурний коефіцієнт опору інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП.

Звідси слідує що

$$\Delta\tau_1 = \tau \cdot TKT = -\frac{\tau}{2} \cdot (\alpha_C + \alpha_R). \quad (2.3)$$

Переходячи до математичного очікування $M(\Delta\tau_1)$ і дисперсії $D(\Delta\tau_1)$, отримуємо відповідно:

$$\left. \begin{aligned} M(\Delta\tau_1) &= -\frac{\tau}{2} [M(\alpha_C) + M(\alpha_R)]; \\ D(\Delta\tau_1) &= -\frac{\tau^2}{4} [D(\alpha_C) + D(\alpha_R)] \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

де $M(\alpha_R)$ і $D(\alpha_R)$ – відповідно математичне очікування і дисперсія температурного коефіцієнта опору інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП.

Загальна ємність C інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП АСК складається з декількох окремих ємностей, з'єднаних різним чином. Те ж саме можна сказати і про резистор R інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП

АСК. Тому для внесення в формули (2.3) фізичного змісту, тобто параметрів реальних електричних компонентів інтегруючої RC -ланки, необхідно отримати формули для $M(\alpha_C)$ і $D(\alpha_C)$, а також для $M(\alpha_R)$ і $D(\alpha_R)$ груп різних чином з'єднаних електричних компонентів (резисторів і конденсаторів) в залежності від конкретних параметрів цих електричних компонентів.

2.7.2. Визначення впливу статистичних характеристик електричних компонентів на температурну нестійкість ТПП зразкового сигналу блоку контролю періодичності. Виконаємо аналітичний аналіз температурного коефіцієнту групи послідовно з'єднаних резисторів та паралельно з'єднаних конденсаторів БКП [8]. У разі послідовно го з'єднання n резисторів (рис. 2.10) сумарний температурний коефіцієнт їх опору α_R визначається за наступною формулою:

$$\alpha_R = \sum_{m=1}^n \rho_m \cdot \alpha_{Rm} = \sum_{m=1}^n \frac{R_m}{R} \cdot \alpha_{Rm} = \frac{\sum_{m=1}^n R_m \cdot \alpha_{Rm}}{\sum_{m=1}^n R_m}, \quad (2.5)$$

де $\rho_m = R_m/R$ – питома вага m -го опору в загальному опорі групи резисторів.

Аналогічна формула придатна для паралельно з'єднаних конденсаторів α_C (рис. 2.11):

$$\alpha_C = \sum_{m=1}^n A_m \cdot \alpha_{Cm} = \sum_{m=1}^n \frac{C_m}{C} \cdot \alpha_{Cm} = \frac{\sum_{m=1}^n C_m \cdot \alpha_{Cm}}{\sum_{m=1}^n C_m}, \quad (2.6)$$

де $A_m = C_m/C$ – питома вага m -ї ємності в загальній ємності групи конденсаторів.

Як видно з формули (2.5), α_R є функцією $2n$ статистичних змінних, тому що кожен з n з'єднаних резисторів дає дві незалежні змінні α_{Rm} і R_m , які мають свої закони розподілу. Аналогічно з формули (2.6), α_C є також функцією $2n$ статистичних змінних, тому що кожен з n з'єднаних конденсаторів дає дві

незалежні змінні α_{Cm} і C_m , які, в свою чергу, мають відповідні кожному закони розподілу. Наприклад, «як показують численні випробування, конденсатори зазвичай мають розподіл величини ємності, приблизно рівноймовірний у полі допусків, а розподіл величини температурних коефіцієнтів у багатьох електричних компонентів БКП підпорядкований закону Гаусса» [39].

Характерно, що в той час як допуски на величини ємностей конденсаторів зазвичай складають малу частину від свого номінального значення, допуски на величини температурних коефіцієнтів порівняні з номінальними значеннями, а в деяких випадках навіть перевершують їх. Остання обставина ускладнює визначення $M(\alpha_C)$ і $D(\alpha_C)$, оскільки звичайні формули для функції кількох випадкових змінних [40], а саме

$$\left. \begin{aligned} M[f(x, y, \dots)] &= f[M(x), M(y), \dots] \\ D[f(x, y, \dots)] &= \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_0^2 D(x) + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_0^2 D(y) + \dots \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

вірні лише у разі відносно малих допусків аргументів і в загальному випадку можуть не відповідати дійсності [41, 42].

Для оцінки можливого відхилення функції в межах її допуску від лінійного закону, на якому засновані формули (2.7), доцільно розкласти вираз (2.5) в ряд Тейлора та порівняти члени різного порядку даного ряду. Опісля цього, здійснити відповідні математичні перетворення та спрощення, з урахуванням аналізу членів другого порядку та більш високих порядків, які можуть не прийматись до уваги у зв'язку з їх малими значеннями. Відповідні математичні перетворення наведені в Додатку Г дисертації з якого слідує, що сумарний температурний коефіцієнт опору послідовно з'єднаних резисторів α_R може бути з достатньою точністю представлений у вигляді наступного ряду:

$$\alpha_R \approx \sum_{m=1}^n (\rho_m)_0 \left\{ (\alpha_{Rm})_0 + \Delta\alpha_{Rm} + \frac{\Delta R_m}{(R_m)_0} \sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 [(\alpha_{Rm} + \alpha_{Rk})_0 + (\Delta\alpha_{Rm} + \Delta\alpha_{Rk})] \right\}, \quad (2.8)$$

де α_{Rm} і α_{Rk} та $\Delta\alpha_{Rm}$ і $\Delta\alpha_{Rk}$ відповідно температурні коефіцієнти та величини допусків значень m -го і k -го опору послідовно з'єднаних резисторів, нуль в індексі означає, що необхідно підставити ідеальні значення температурного коефіцієнта та питомої ваги опору відповідного резистора.

Як правило відхилення α_{Rm} і R_m відповідно температурного коефіцієнта і опора m -го резистора від його номіналу носять симетричний характер. Якщо врахувати цю важливу умову, то у разі переходу до математичного очікування сумарного температурного коефіцієнта опору послідовно з'єднаних резисторів (2.8), можна отримати:

$$M(\alpha_R) = \sum_{m=1}^n (\rho_m)_0 (\alpha_{Rm})_0, \quad (2.9)$$

оскільки математичне очікування інших членів рівні нулю. Отримана формула відповідає першій формулі (2.7) і вказує на її справедливості у разі означених вище умов.

Для групи паралельно з'єднаних конденсаторів, по аналогії з визначенням математичного очікування сумарного температурного коефіцієнта опору послідовно з'єднаних резисторів (2.9), можна отримати наступний вираз для математичного очікування сумарного температурного коефіцієнта α_C :

$$M(\alpha_C) = \sum_{m=1}^n (A_m)_0 (\alpha_{Cm})_0. \quad (2.10)$$

У разі обчислення дисперсії α_R звернемо увагу на те, що симетричності розсіяння усіх ΔR_m вона буде складатися, як дисперсія суми n незалежних складових, тільки із суми дисперсії цих складових, кожний з яких повністю характеризує вплив одного із резисторів на загальний температурний коефіцієнт опору α_R :

$$D(\alpha_R) = \sum_{m=1}^n D(\alpha_{Rm}, R_m)_0 (\rho_m^2)_0. \quad (2.11)$$

В свою чергу дисперсія кожного доданка буде складатися з суми

дисперсій двох основних членів:

$$D(\alpha_{Rm}, R_m) = D(\alpha_{Rm}) + D(B), \quad (2.12)$$

$$\text{де } B = \frac{\Delta R_m}{(R_m)_0} \sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 [(\alpha_{Rm} + \alpha_{Rk})_0 + (\Delta \alpha_{Rm} + \Delta \alpha_{Rk})].$$

Коефіцієнт кореляції між $\Delta \alpha_{Rm}$ і B у разі симетричного розподілу відхилень ΔR_m і $\Delta \alpha_{Rm}$ (або тільки ΔR_m) рівний нулю, оскільки в цьому випадку рівні математичне очікування добутку $\Delta \alpha_{Rm} B$ і добуток математичних очікувань $\Delta \alpha$ і B . По цій причині у формулі для $D(\alpha_{Rm}, R_m)$ відсутній член з коефіцієнтом кореляції, аналогічно тому, як це є у формулі для $D(\alpha_R)$.

У разі обчислення $D(B)$ застосуємо формулу для дисперсії добутку двох незалежних змінних

$$B_1 = \frac{\Delta R_m}{(R_m)_0} \quad (2.13)$$

та

$$B = \sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 [(\alpha_{Rm} + \alpha_{Rk})_0 + (\Delta \alpha_{Rm} + \Delta \alpha_{Rk})]. \quad (2.14)$$

Враховуючи те, що $M(B_1) = 0$, отримаємо

$$\begin{aligned} D(B) = D(B_1) [M^2(B_2) + D(B_2)] = \frac{D(R_m)}{(R_m)_0^2} \left\{ \left[\sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 (\alpha_{Rm} + \alpha_{Rk})_0 \right]^2 + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (\rho_k^2)_0 D(\alpha_{Rk}) + D(\alpha_{Rm}) \left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (\rho_k)_0 \right]^2 \right\} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Виконуючи усі відповідні обчислення за вищевказаною методикою, отримаємо:

$$\begin{aligned}
D(\alpha_R) = & \sum_{k=1}^n (\rho_m^2)_0 \left\{ \left\{ D(\alpha_{Rm}) + \frac{D(R_m)}{(R_m^2)_0} \left[\sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})_0 \right]^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n [(\rho_k^2)_0 D(\alpha_{Rk})] + D(\alpha_{Rm}) \left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (\rho_k)_0 \right]^2 \right\} \right\} \quad (2.16)
\end{aligned}$$

Якщо детально проаналізувати формулу (2.16), то можна встановити що ця формула відрізняється від тої, яка могла бути отримана з другого виразу (2.7), наявністю групи наступних членів

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n [(\rho_k^2)_0 D(\alpha_k)] + D(\alpha_{Rm}) \left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (\rho_k)_0 \right]^2, \quad (2.17)$$

що враховують нелінійний характер α_R у разі змін у значних діапазонах значень α_m і α_k .

Перший із нелінійних членів у формулі (2.17)

$$\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n [(\rho_k^2)_0 D(\alpha_{Rk})], \quad (2.18)$$

являє собою сумарну дисперсію температурного коефіцієнта опору усіх, крім R_m резистора БКП АСК (без врахування членів, які обумовлені неточністю самих резисторів) і, відповідно, у середньому в $(n-1)$ разів менше дисперсії окремих складових, тобто $D(\alpha_{Rm})$.

Очевидно, що другий нелінійний член

$$D(\alpha_{Rm}) \left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (\rho_k)_0 \right]^2 < D(\alpha_{Rm}), \quad (2.19)$$

оскільки

$$\left[\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq m}}^n (\rho_k)_0 \right]^2 < 1 \quad (2.20)$$

Вказані члени можуть додати щось суттєве до $D(\alpha_{Rm})$ тільки у разі великої відносної неточності значення опору R_m , тобто за значної величини $D(R_m) / (R_m^2)_0$. Якщо врахувати, те що крайнє значення $\Delta R_m < 0,4 R_m$ і найгірші з розподілів, які практично зустрічаються для значень ΔR_m це рівно ймовірне, то отримаємо:

$$\frac{D(R_m)}{(R_m^2)_0} = \frac{0,4^2}{3} \approx 0,05 = 5\%.$$

Це означає, що другий із нелінійних членів може збільшити дисперсію, яка обумовлюється тільки резистором R_m БКП АСК, не більше ніж чим на 5%. Що стосується першого члена, то він може додати більш значну величину до одиничних $D(\alpha_{Rm})$, якщо для даного опора БКП АСК дисперсія α_{Rm} незначна у порівнянні з дисперсією температурних коефіцієнтів других ємностей блоку. Але і в цьому випадку добавка до сумарної дисперсії, очевидно, не буде перевищувати $5\% / (n-1)$. У наслідку, за самого несприятливого поєднання обставин нелінійні члени збільшують сумарну дисперсію α_R трохи більше ніж 5%, що за умови переходу до допуску на α_R дає збільшення його границь не більше ніж 2,5%.

У більшості випадків вплив нелінійних членів набагато менший, особливо якщо врахувати те, що точність резисторів, з яких виготовлено БКП з мікросхемою мультівібратора 74НС123 та інтегруючою RC-ланкою, заздалегідь краще 40%. Це дає підставу нелінійні члени не враховувати.

Таким чином,

$$D(\alpha_R) = \sum_{k=1}^n (\rho_m^2)_0 \left\{ D(\alpha_m) + \frac{D(R_m)}{(R_m^2)_0} \left[\sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})_0 \right]^2 \right\}. \quad (2.21)$$

Очевидно, що

$$\sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})_0 = (\alpha_{Rm})_0 \sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 - \sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 (\alpha_{Rk})_0 = (\alpha_{Rm})_0 - M(\alpha_R),$$

тому формулу (2.21) можна записати ще у наступному виді:

$$D(\alpha_R) = \sum_{k=1}^n (\rho_m^2)_0 \left\{ D(\alpha_{Rm}) + \frac{D(R_m)}{(R_m^2)_0} [(\alpha_{Rm})_0 - M(\alpha_R)] \right\}. \quad (2.22)$$

Для групи паралельно з'єднаних конденсаторів БКП АСК, по аналогії з визначенням дисперсії сумарного температурного коефіцієнта опору групи послідовно з'єднаних резисторів (2.22), можна отримати наступний вираз для дисперсії $D(\alpha_C)$ сумарного температурного коефіцієнта ємності:

$$D(\alpha_C) = \sum_{k=1}^n (A_m^2)_0 \left\{ D(\alpha_{Cm}) + \frac{D(C_m)}{(C_m^2)_0} [(\alpha_{Cm})_0 - M(\alpha_C)] \right\}. \quad (2.23)$$

Аналізуючи отримані формули (2.10) і (2.23) з метою формування вимог щодо підвищення надійності функціонування БКП і, як наслідок, зменшення ризику прийняття хибного рішення оператором про наявність або відсутність контрольованого сигналу, можна зробити наступні висновки [8].

Кожен конденсатор впливає на розкид температурного коефіцієнта сумарної ємності тим сильніше, чим більше питома вага ємності цього конденсатора в загальній ємності [8].

Цей вплив виявляється двояко: у вигляді абсолютної неточності температурного коефіцієнта ємності і відносній неточності значення самої ємності цього конденсатора $D(C_m)/C_m^2$. Вплив відносної неточності ємності кожного конденсатора виявляється тим сильніше, чим більше різниці температурних коефіцієнтів ємності цього конденсатора та інших конденсаторів групи $(\alpha_{Cm} - \alpha_{Ck})$.

Аналогічні висновки отримано для групи з'єднаних резисторів.

2.8. Розроблення алгоритму обробки результатів автоматизованого багатоканального контролю синхросигналів та візуалізації результатів вимірів характеристик синхросигналів в реальному часі

Запропонована структура автоматизованої інформаційної системи контролю ПСЦС та визначені задачі контролю часових характеристик синхросигналів обумовлюють необхідність розробки його алгоритму в вигляді послідовності правил, які чітко і однозначно визначають рішення задачі, тобто отримання результату за заданими початковими даними за кінцеве число кроків [3, 5, 8, 11, 25, 43]. Загальновідомо, що алгоритм повинен володіти властивістю дискретності, тобто мати можливість його розбиття на прості для виконання дії.

Розроблено графічне представлення алгоритму (рис. 2.12), яке зображено у вигляді блок-схеми. Окремі дії алгоритму на блок-схемі представлені за допомогою геометричних фігур (блоків), а зв'язки між ними - стрілками. Процес контролю часових характеристик синхросигналу ПСЦС, алгоритм якого зображено на рис. 2.12, відноситься до одного каналу контролю. Слід зауважити, що алгоритм передбачає формування масиву даних за час спостереження τ , який може змінювати своє значення в процесі контролю (задається оператором-технологом), та масив даних за нормований час спостереження τ (визначається відповідними рекомендаціями і стандартами [44-49]).

2.9. Розроблення блоку первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК параметрів якості ПСЦС

Автоматизація процесу контролю якості синхросигналів ПСЦС забезпечується автоматизованою системою контролю, яка є складним апаратно-програмним комплексом [4, 5, 27, 28].

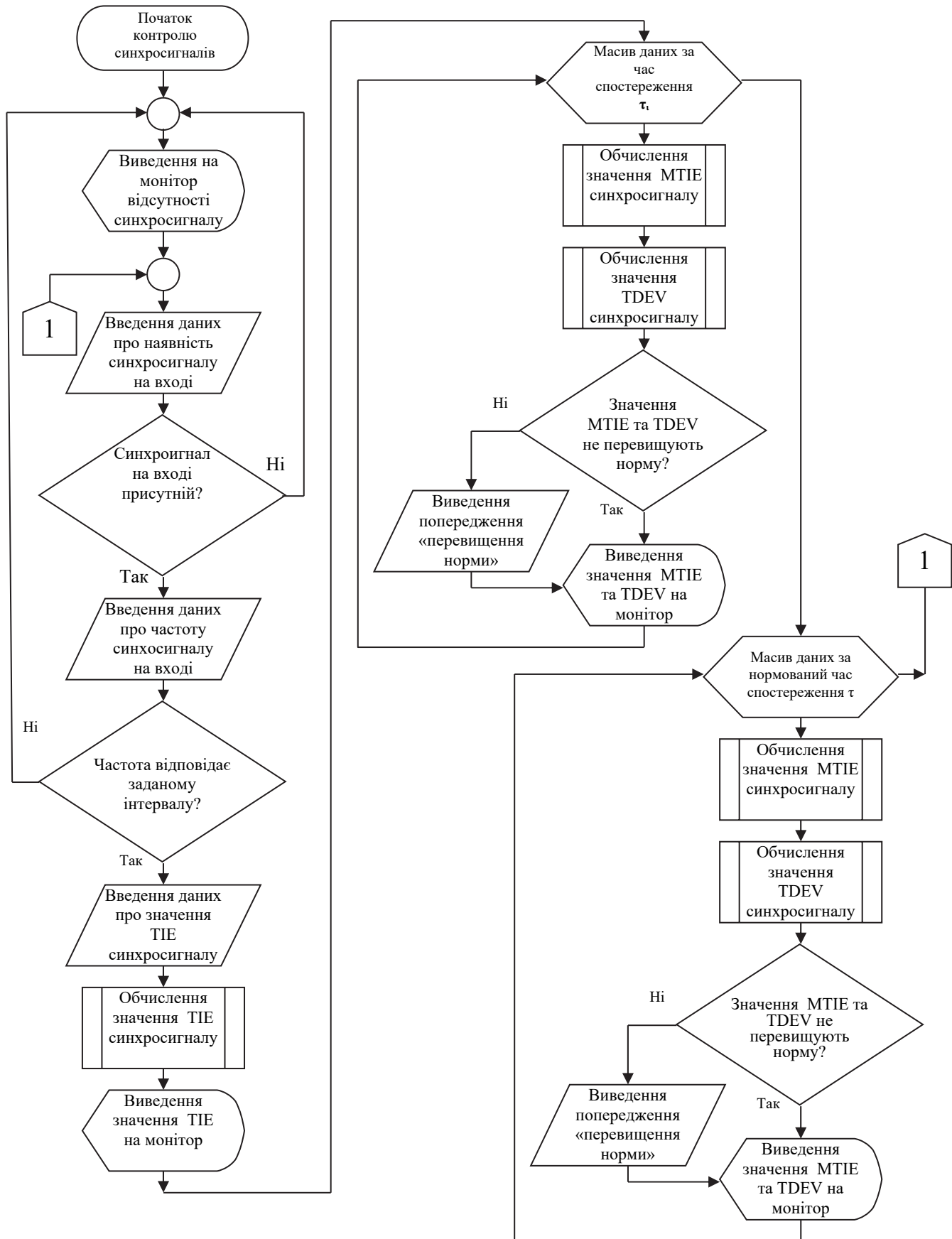


Рис. 2.12. Блок-схема алгоритму контролю часових характеристик синхросигналу ПСЦС

З метою підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості ПСЦС запропоновано використання способу багатоканального контролю, на основі якого виконано розробку апаратної та програмної частини АСК [2-5, 9, 11, 13, 27, 28, 43, 51].

Розглянемо апаратну структуру АСК, що складається з блоку первинного перетворювача (БПП) «TIMETER» (рис. 2.13), який реалізовано на платах друкованого монтажу стандартного формату. БПП «TIMETER» є одним з основних компонентів АСК, що по суті виконує функції первинного датчика (сенсора), який забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу (контрольованого показника якості ПСЦС) в цифровий сигнал заданого формату.

БПП «TIMETER» АСК виконує виміри за рахунок перетворення вхідної фізичної величини – різницю фаз (часовий інтервал) у відповідний вихідний сигнал, представлений у вигляді цифрової кодової комбінації. Разом з процесом вимірювань виконується контроль періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, періодичності, амплітуди і форми синхросигналів. Результати зазначених процесів, що представлені у цифровому форматі, оброблюються мікроконтролером [5], в текстовому форматі передаються через IP-мережу до серверу централізованої системи керування (може бути використаний персональний комп'ютер для віддаленого керування) де оброблюються з використанням програмного забезпечення P4000winXP та представляються оператору-технологу для прийняття рішення.

Аналіз закладених у створення блоку БПП «TIMETER» принципів реалізації дає можливість віднести його до класу інтелектуальних датчиків, які оснащуються вбудованими мікропроцесорами (мікроконтролерами), що працюють за досить складним алгоритмам і дозволяють надати приладу контролю багато додаткових функціональних можливостей, таких як фільтрація сигналів, адаптація, корекція, виявлення відмов, реконфігурація вимірювальної схеми і т.п.

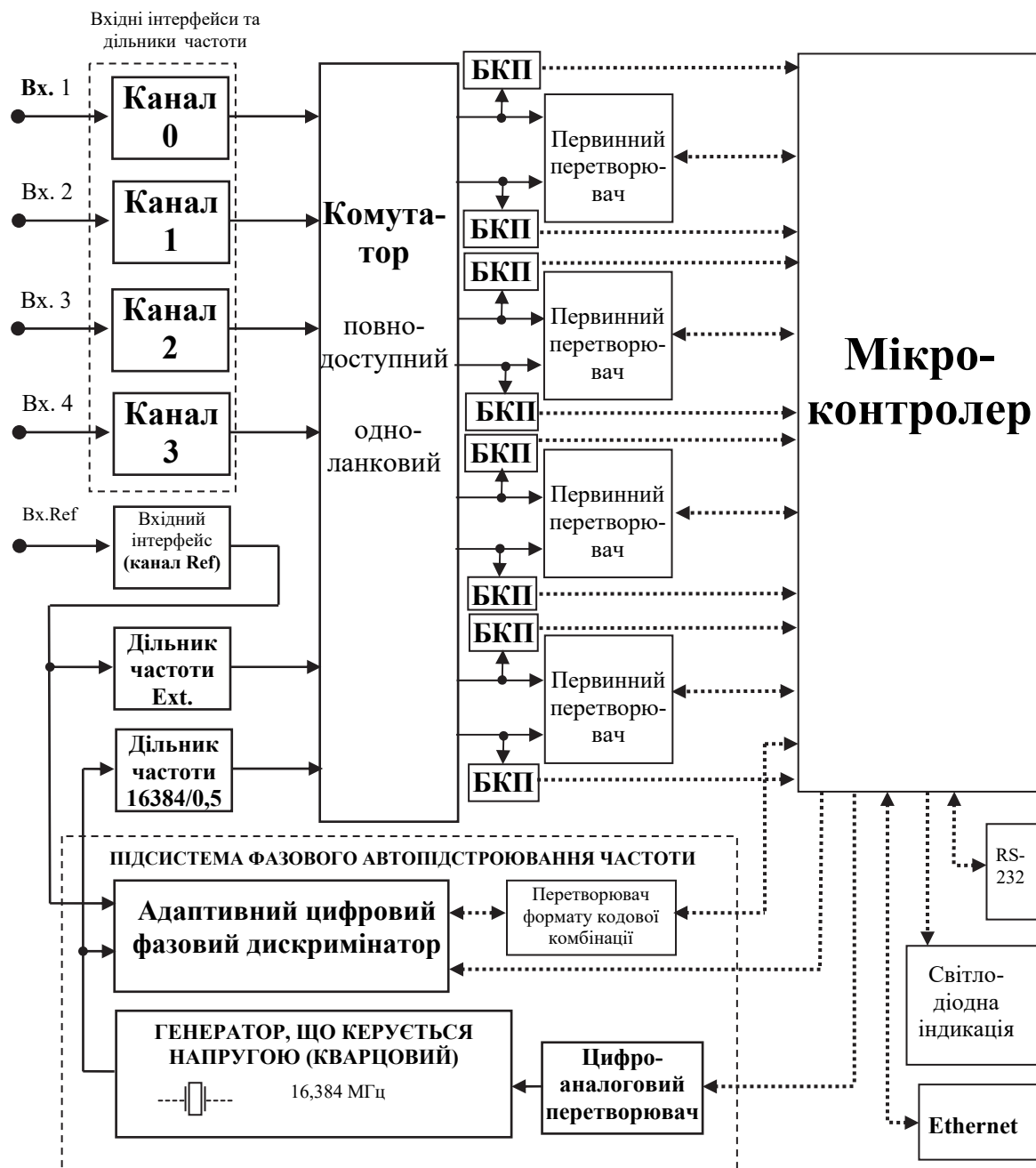


Рис. 2.13. Структурна схема блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК

БКП – блок контролю періодичності.

БПП «TIMETER» АСК забезпечує в автоматизованому режимі контроль синхросигналів шляхом виконання одночасних багатоканальних вимірювань параметру відхилення часового інтервалу відносно опорного синхросигналу (формується генератором, що керується напругою) з субнаносекундною точністю ПСЦС [2-5, 9, 11, 13, 27, 28, 43, 50-52]. Результати виконаних вимірів декількох синхросигналів (до чотирьох одночасно контрольованих синхросигналів) передаються по IP-мережі на сервер централізованої системи керування (може бути використаний персональний комп'ютер для віддаленого керування) де оброблюються з використанням розробленого у середовищі Embarcadero RAD Studio XE2 2012 програмного забезпечення P4000winXP (текст програми наведено в Додатку Д). Структурна схема апаратної реалізації БПП «TIMETER» АСК наведена на рис. 2.13.

Блок первинного перетворювача БПП «TIMETER» (див. рис. 2.13) виконує багатоканальний контроль контрольованих синхросигналів. БПП «TIMETER» автоматично, з періодом 200 мс, здійснює цифрові вимірювання дискретних значень відхилення часового інтервалу (ВЧІ) контрольованих сигналів (одночасно до 4-х каналів) 2,048 МГц (2,048 Мбіт/с), 5 МГц, 10 МГц з роздільною здатністю 0,2 нс.

З метою уніфікації передачі даних, результати вимірювань оброблюються мікроконтролером і в текстовому форматі передаються через IP-мережу до серверу централізованої системи керування з періодичністю $T=1\text{с}$. Разом з наведеними характеристиками потрібно зазначити на те, що блок забезпечує добову стабільність фази і частоти не гіршу ніж вітчизняний стандарт частоти кварцовий СЧК-103, у цьому разі має можливість синхронізації від зовнішніх сигналів за стандартними інтерфейсами з різними значеннями номінальних частот (1,544 МГц 2,048 МГц, 5 МГц, 10 МГц).

Приклад змонтованої плати БПП «TIMETER» АСК з опорним генератором (кварцовим), що керується напругою, наведено на рис. 2.14 [2, 4, 5, 9, 13, 27, 28, 43].

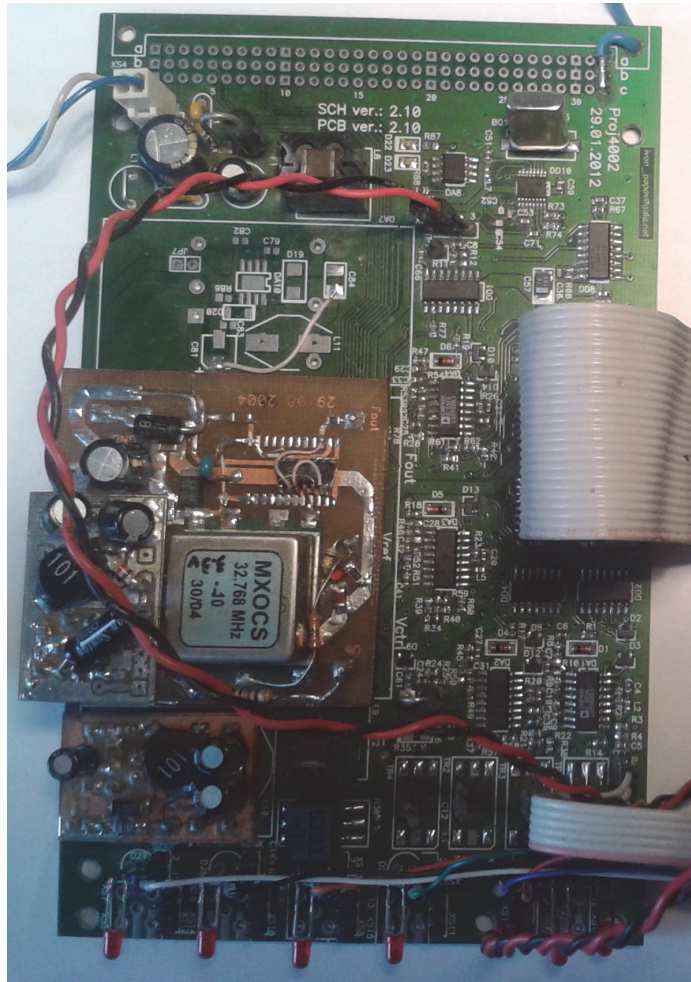


Рис. 2.14. Плата БПП «TIMETER» АСК з опорним генератором (кварцовим), що керується напругою

2.10. Основні результати і висновки розділу 2

1. Запропоновано метод створення автоматизованої системи керування виробництвом пристроїв синхронізації з використанням багатоканальної структури АСК показників якості, котрий забезпечує багатократне підвищення продуктивності процесу контролю та спрощує візуалізацію й аналіз даних, що використовуються для прийняття рішень щодо змін параметрів технологічного процесу багатомономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва.

2. Вперше на основі запропоновано методу багатоканального контролю показників якості розроблено апаратну структуру вимірювального блоку БПП «TIMETER» АСК і програмне забезпечення, що забезпечують, в порівнянні з одноканальним, підвищення в 4 рази продуктивності контролю показників якості ПСЦС в умовах багатомономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва, а також в процесі їх технічної експлуатації у складі сучасних високотехнологічних систем.

3. Розроблено алгоритм контролю часових характеристик синхросигналу ПСЦС і програмне забезпечення P4000winXP у середовищі Embarcadero RAD Studio XE2 2012 для візуалізації та аналізу даних, які використовуються для реалізації у “ручному режимі” прийняття рішення щодо змін параметрів виробничого технологічного процесу гнучких інтегрованих систем.

4. Набув подальшого розвитку метод перетворення похибки інтервалів часу в цифровий сигнал, з використанням якого розроблено структуру адаптивного цифрового фазового дискримінатора (патент на винахід №113473), котрий забезпечує можливість керованого формування статичної характеристики в залежності від режиму функціонування системи фазового автопідстроювання частоти.

5. Розроблена оригінальна структура пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти (патент на корисну модель №116809), у якому прийняття рішення здійснюється в кінці кожного періоду сигналу тактовою частотою, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії контролю.

6. Вперше запропоновано для вибору варіанта побудови підсистеми фазового автопідстроювання частоти опорного генератора БПП «TIMETER» АСК в умовах неповноти апіорної інформації щодо залежності технічних характеристик від структури підсистеми застосування методів системного аналізу, що дозволило на етапі підготовки множини всіх уявних альтернатив сформувати вихідну множину варіантів за умови можливості їх реальної

реалізації.

7. Формалізовано визначення температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу, яка складається з впливів великої кількості фізичних і умовних електричних компонентів блоку контролю періодичності, що дає змогу проводити підсумовування цих впливів за правилами теорії ймовірностей, а не за «мінімаксім» методом і, як наслідок, підвищити якість прийняття рішення оператором щодо зняття невизначеності про наявність або відсутність контрольованого сигналу.

8. Вперше на основі теоретико-ймовірнісних розрахунків формалізовано вимоги до електричних компонентів блоку контролю періодичності БПП «TIMETER» АСК. Для отримання меншого розкиду температурного коефіцієнта тривалості перехідного процесу інтегруючої RC -ланки мультівібратора БКП необхідно не тільки зменшувати розкид температурних коефіцієнтів її електричних компонентів, але і прагнути до максимальної однорідності їх за середнім значенням температурних коефіцієнтів, а також до точності у виготовленні всіх електричних компонентів.

9. Виконана сучасна системотехнічна реалізація апаратних складових БПП «TIMETER» АСК, в тому числі і адаптивного цифрового фазового дискримінатора, яка представлена у вигляді програмного забезпечення середовища розробки QUARTUS II, котре використано для програмування програмованих логічних схем ALTERA EPM7128SLC84.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. V.V. Koval, D.O. Kalian, M.M. Khudyntsev, V.P. Lysenko, O.V. Samkov, I.J. Shkliarevskyi. Automated 24x7 monitoring of synchroinformation in modern digital networks // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки. - 2017. - Випуск №2. - С.88-94.
Режим доступу до статті:
http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1824870

2. Кальян Д.О., Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецкий. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540>

3. Dmytro Kalian, Nadiia Kazakova, Boris Kravchenko, Valerii Koval. Automated system for Monitoring Synchronizing precise time signals at SMART-GRID power plants. Projectowanie, badania, i eksploatacja. Tom 1. - Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej. Bielsku-Bialej, Poland. 2019. - P.155-160. <http://www.engineerxxi.ath.eu/book/designing-researches-and-exploitation-2019-vol-1/>

4. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.

5. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с.

6. Koval V.V., Velichko O.N., Golovnia M.V., Dorogobed V.V., Kalian D.O., Shkliarevskiy I.Y. Scientific and applied principles of creating united national synchroinformation system // Abstracts XXVII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 23-27 травня 2016: Тбілісі, Грузія, – 2016. - С. 96-98.

7. Koval V.V., Velychko O.M., Golovnya M.V., Kalian D.O., Shkliarevskiy I.Y. Unified national synchro-information system – high-tech infrastructure for automated complexes // XXIV International Conference on automated control «Automatics-2017»: Kiev, Ukraine, september 13-15, 2017: proceedings. Kiev. 2017. P.8-9.

8. Vitaliy Lysenko, Valerii Koval, Oleksandr Samkov, Dmytro Kalian, Dmytro

Komarchuk. Computer-integrated Systems for Information Support and Automatization of the Complicated Objects // Abstracts XXX International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2018». PDMU-2018, Prague, Czech republik, – 2018. – p.p.45-51.

9. Koval V.V., Kalian D.O., Tepliuk 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.

10. Valerii Koval, Nadiia Kazakova, Dmytro Kalian, Dmytro Komarchuk, Vitaliy Lysenko, Oleksandr Samkov. The use of advanced information and communication technologies to monitor the quality of synchronization signals of IoT terminal devices / 3st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019), Lviv, Ukrain, 2-6 july 2019. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2019. – С.22-25. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8847894>

11. Valerii Koval, Dmytro Kalian, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov, Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - pp.269-276.

12. В.В. Коваль, Д.О. Кальян, В.В. Осипенко, О.В. Самков. Рекомендації з створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням IP-мереж на основі протоколу прецизійного часу

РТР. Для підприємств і організацій України / НАН України, Ін-т електродинаміки. Національний університет біоресурсів і природокористування (НУБІП) України. Укл. Коваль В.В. та інш. – Київ, 2017. 47 с.

13. Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій: Звіт про НДР за державним замовленням / НУБІП України; Номер державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

14. ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.

15. Гнучкі комп'ютеризовані системи: проектування, моделювання і управління: Підручник / Л.С. Ямпольський, П.П. Мельничук, Б.Б. Самотокін, М.М. Поліщук, М.М. Ткач, К.Б. Остапченко, О.І. Лісовиченко.- Житомир: ЖДТУ, 2005.- 680 с

16. Невлюдова В.В. Технологічне забезпечення якості гнучких структур у виробках електронної техніки. – Рукопис. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.27.06 – технологія, обладнання та виробництво електронної техніки. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, 2017.

17. Дзінько Р.І. Підвищення надійності систем оперативного управління гнучких виробничих систем. К.; КПІ, Дис. к.т.н. 2016. – 160 с.

18. Соловьев В.А. Системы оперативного управления. – 2015. – 188 с.

19. Брени С. Синхронизация цифровых сетей связи: Пер с англ. – М.: Мир, 2003. – 456с.

20. Пат. №3887 Україна, МПК Н 03 D 3/04. Асинхронний цифровий часовий дискримінатор: Пат. №3887 Україна, МПК Н 03 D 3/04 / В.І. Борщ, О.В. Дробік, В.В. Коваль, Є.І. Коршун, Б.Я. Костік, Ю.Г. Туманов (Україна). - №20040402805; Заявл. 16.04.04; Опубл. 15.12.2004; Промислова власність, Бюл. №12. Книга 1. Розділ 5. С. 123-124.

21. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н

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.

22. Dmytro Kalian. Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences, Number 1(2018), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, P.11-18. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/136460>

23. PJS2000 Synchronization measurement instrument for telecommunications networks. Instruction manual. Fourth Edition Software release 1.20. PLLB Electronica S.p.A., 2001.

24. Згуровский М.З, Панкратова Н.Д. Основы системного анализа. - К.: BHV, 2005. – 400 с.

25. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. М.: Радио и связь, 1989. - 320 с.

26. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК H 03 K 5/19 (2006.01). Пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти / Коваль В.В., Кальян Д.О., Коваль В.В. (Україна) - № у 2016 11977, Заявл. 25.11.2016, Опубл. Відомості про заявку 12.06.2017, Бюл. № 11.

27. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням ІР-мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, О.В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с.

28. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с.

29. Designing With the SN74AHC123A and SN74AHCT123A. Texas Instruments Incorporated. SCLA014 October 1999. <http://www.ti.com/lit/an/scla014/scla014.pdf>

30. Яніцький І.Я. Статистична оптимізація точності формувачів періодичних відліків часу з кільцем фазового автопідстроювання ВПСЦС телекомунікаційних мереж // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2009. – №1(9). – С.27-38.

31. Коваль В.В., Петрусенко К.А., Сукач Г.О., Чернова К.С., Яніцький І.Я. Статистичні параметри точності формування періодичних відліків часу виокремленими пристроями синхронізації інформаційних мереж // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. – 2009. – Вип.54. – С.171-177.

32. Коваль В.В., Сукач Г.А., Гельчин О.В., Осередько Е.А., Данилевский С.В. Статистический метод повышения точности поликанального мониторинга синхронизации цифровых телекоммуникаций // Электросвязь. – М., 2012. – №5.

33. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.

34. Богуцька О.А. Теоретико-ймовірностний розрахунок точності формування періодичних відліків часу виокремленого пристрою синхронізації телекомунікаційних мереж / О.А. Богуцька, М.А Вільчинський, В.В. Коваль, К.А. Петрусенко, І.Я. Яніцький // Світ інформації та телекомунікацій – 2009: VI Міжнар. наук.-тех. конф. студ. та молоді, 28-29 квітня 2009 р.: тези доповідей. – К., 2009. - С.40-42.

35. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Коваль В.В. мол., Козирська Т.О., Шклярєвський І.Ю. Статистична оптимізація ведених пристроїв синхронізації інфокомунікаційних мереж // Abstracts XXV International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2015». 11-15 травня 2015: Східниця, Україна, – 2015. - С. 99-100.

36. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Кальян Д.О., Коваль В.В. мол. Комп'ютерне моделювання та статистична оптимізація пристроїв синхронізації

з адаптивними властивостями / Тези доповідей VII Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», 21-22 квітня 2016 р. Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2016 – С.98-100.

37. Аршинов С.С. Температурная стабильность частоты ламповых генераторов. М.: Госэнергоиздат, 1952.

38. Системи управління національною інформаційно-комунікаційною інфраструктурою: Монографія / Кривуца В.Г., Беркман Л.Н., Кільчицький Є.В. [та ін.]. К.: «ЦП»КОМПРИНТ», 2013. - 310с.

39. Шитиков Г.Т. Стабилизированные диапазонные автогенераторы (теория и расчет). М.: Советское радио, 1965.

40. Турчин В.М. Математична статистика. – К.: Вид. центр «Академія», 1999.

41. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука. - 1965. – 608 с.

42. Бородачев Н.А. Основные вопросы теории точности производства. М.:Изд-во Академии наук СССР, 1970.

43. Коваль В.В., Самков О.В., Кальян Д.А., Дубович-Костецкий В.Г. Засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів інформаційно-телекомунікаційних систем / Збірник матеріалів доповідей та тез I Міжнар. наук.-практ конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS), м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.; Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2018 – С.100-103.

44. G.811, Timing characteristics of primary reference clocks. - [Чинний від 1997-9]. - Geneva, Switzerland, Sept. 1997. (Рекомендація ITU-T).

45. ITU-T Rec. G.703 Physical / Electrical Characteristics of Hierarchical Digital Interfaces. Geneva, Oct. 1998.

46. ITU-T Rec. G.803. Architecture of Transport Networks Based on the Synchronous Digital Hierarchy. (SDH). Sec. 8. Geneva, June 1997.
47. ITU-T Rec. G.823. Controlled slip rate objectives on an international digital links.
48. ITU-T Recommendation G.781(09/08) Synchronization layer functions
49. Transmission and multiplexing (TM); Generic requirements for synchronization networks. - [Чинний від 1996-5]. - ETS 300 462-2 1997. (Стандарт ETSI).
50. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Кальян Д.О., Твердохліб А.В., Худинцев М.М. Автоматизована система багатоканального моніторингу синхроінформації цифрових телекомунікацій / Матеріали п'ятої міжнародної наук.-пр. конф. "Інфокомунікації – сучасність та майбутнє", м. Одеса 29 – 30 жовтня 2015 р.: в 3 ч. Ч.3. - Одеса: ОНАЗ, 2015. – С.40-43.
51. Коваль В.В., Кальян Д.А., Шкляревский И.Ю. Использование мониторинга синхросигналов для повышения безопасности информационно-телекоммуникационных систем / Збірник матеріалів доповідей та тез II Наук.-практ конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем», 23-24 березня 2017 р. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2017 – С.123-127.
52. Koval Valerii, Kalian Dmytro, Khudyntsev Mykola, Lysenko Vitaliy, Samkov Oleksandr, Shkliarevskyi Igor. Synchroinformation's 24x7 monitoring tool for modern digital networks decision making // Abstracts XXX International Conference "Problems of decision making under uncertainties PDMU-2017». 14-19 august 2017: Vilnius, Lithuania, – 2017. - С.75-76

РОЗДІЛ 3

ФОРМАЛІЗАЦІЯ ЗАВДАНЬ КЕРУВАННЯ, ДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ПІДСИСТЕМИ АВТОПІДСТРОЮВАННЯ ЧАСТОТИ АСК

3.1. Аналіз особливостей керування та розроблення багатфункціональної підсистеми автопідстроювання частоти генератора, що керується напругою

Отримання нових системних рішень щодо частотно-часового забезпечення автоматизованих систем контролю ПСЦС обумовлює необхідність розгляду задачі вибору засобів реалізації підсистеми автопідстроювання частоти опорного генератора БПП на етапі проектування як задачу створення складної інформаційно-технічної системи. Вибір засобу реалізації підсистеми – одне з важливих питань, вирішення яких визначає основні взаємопов'язані показники якості АСК, що проектується, а саме такі, як швидкодія, точність, надійність, габарити та інші. Формалізація прийняття рішень в умовах багатоальтернативної оптимізації в задачах проектування технічних систем, до яких відноситься АСК показників якості ПСЦС, пов'язана з пошуком ефективного вирішення в сфері вибору засобів реалізації. У цьому разі якість сучасних підсистем автопідстроювання частоти опорного генератора, що керується напругою АСК розглядається як комплексний показник, що залежить від якості виробів електронної техніки, загального наукового рівня розвитку розробок, досконалості метрологічного забезпечення і технологічних особливостей виробництва [1, 2].

Безумовно, проблеми якості підсистем автопідстроювання частоти, опорного генератора, що керується напругою АСК мають вирішуватися вже на самих ранніх стадіях і етапах проектування і розробок. Однак наявність у пристроїв АСК з фазовим автопідстроюванням частоти опорного генератора сукупності технологічних властивостей ще не характеризує їх якість, важливо кількісно оцінити властивості електронних виробів, які складають цю якість.

Таким чином, якість сучасних ПФАПЧ вирішальною мірою залежить від правильної постановки, організації, методології та технології дослідження і проектування, які виконуються на етапах комплексного процесу виробництва.

Особливість сучасних підсистем автопідстроювання частоти АСК полягає у тому, що вони представляють собою складні багатофункціональні вироби, зібрані в складних компонувальних складальних технологічних одиницях, об'єднаних внутрішньоблоковим і міжплатним монтажем, а також засобів і пристроїв відображення інформації та керування, які мають з високою точністю, якістю та надійністю виконувати функції керування, забезпечуючи при цьому комплексну надійність.

Розглянемо представлену на рис. 3.1 схему підсистеми фазового автопідстроювання частоти генератора, що керується напругою, яка використовується для практичної реалізації формування опорного сигналу АСК [3]. Синхронізуючий сигнал до ПФАПЧ АСК може надходити IP-мережею від державного еталону часу і частоти, систем GPS, прецизійних джерел часу і частоти за допомогою обладнання передачі даних з використанням протоколу RTP [3, 4].

Однієї з особливостей роботи підсистеми ФАПЧ генератора, що керується напругою, є наявність нелінійностей (наприклад, фазових детекторів з ефектами «насичення», періодичностей характеристики у функції фазової помилки) [1-3, 5-15].

Проблема підвищення якості частотно-часового забезпечення, в тому числі і автоматизованих систем контролю ПСЦС, нерозривно пов'язана з удосконаленням системи організаційно-технічних, конструкторсько-технологічних та експлуатаційних робіт, спрямованих на поліпшення (оптимізацію, адаптацію) технічних параметрів систем та засобів автопідстроювання частоти, зростання їх експлуатаційної надійності, поліпшення технологічності в експлуатації, зовнішнього вигляду тощо [15-18].

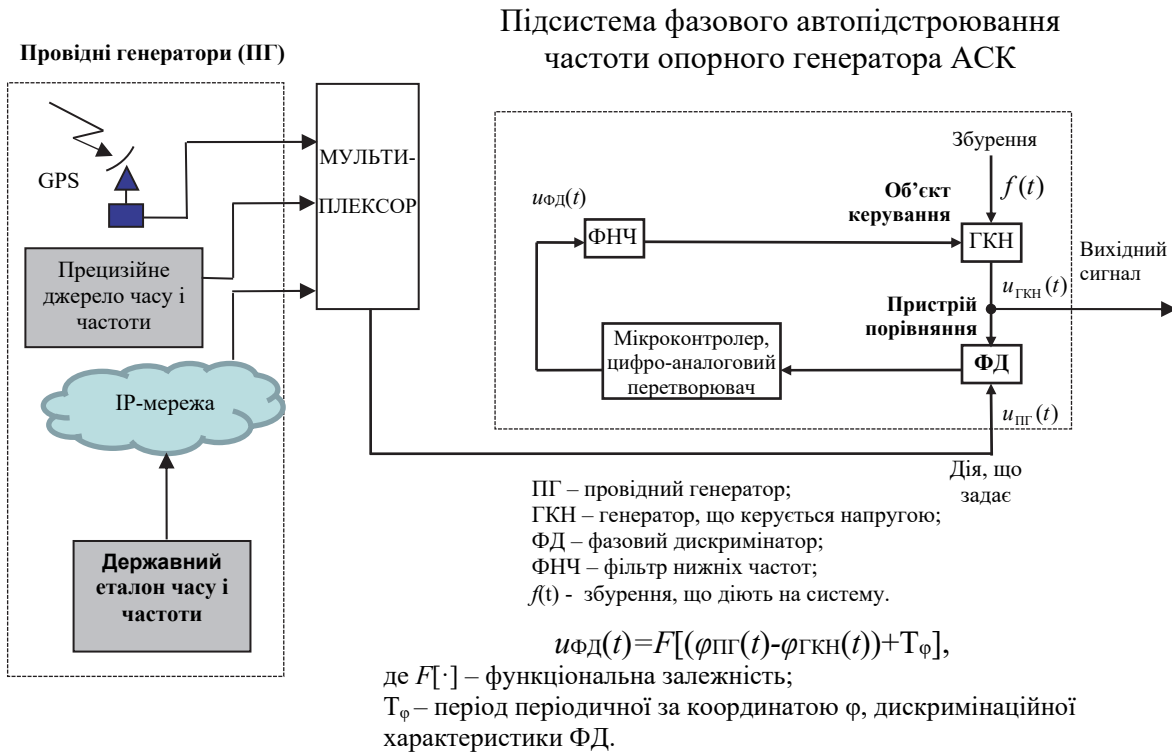


Рис. 3.1. Схема підключення підсистеми фазового автопідстроювання частоти генератора АСК до ПГ

3.2. Динамічне моделювання підсистеми фазового автопідстроювання частоти АСК

Аналіз вимог до точності передавання і формування опорного сигналу обумовлює необхідність підвищення якості роботи підсистеми фазового автопідстроювання генератора, що керується напругою. Однією із вимог до робочих характеристик підсистеми є оптимальне за швидкодією входження в синхронізм, що можливо забезпечити мінімальною тривалістю режимів перехідних процесів [1, 2, 5-10, 12, 14-18]. Виконаємо оптимізацію за швидкодією ПФАПЧ кварцового генератора, що керується напругою (ГКН), з метою покращення якісних показників опорного сигналу і, як наслідок, підвищення точності і достовірності автоматизованої інформаційної системи контролю синхросигналів ПСЦС [1, 2, 5, 6, 15-24].

В підсистемі автопідстроювання частоти генератора, що керується

напругою, синхронізуючий сигнал, який подається на перший вхід фазового дискримінатора ФД (рис. 3.1) і сигнал, що формується ГКН (подається на другий вхід ФД), синхронізуються за рахунок керування його частотою. Керуюча дія формується на основі різниці фаз, що визначається ФД, за рахунок каналу зворотного зв'язку (керування за відхиленням). При такій побудові підсистеми ФАПЧ, сутність керування ГКН полягає у точному автопідстроюванні фази сигналів, що поступають на відповідні входи ФД, де порівнюються і перетворюються, у випадку його реалізації на цифрових логічних мікросхемах, в цифрову кодову комбінацію придатну для обробки мікроконтролером. ГКН керується напругою, яка формується цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП) на основі цифрової кодової комбінації прийнятої від мікроконтролера.

Наведена на рис. 3.1 схема підсистеми фазового автопідстроювання частоти (ПФАПЧ) генератора АСК, що керується напругою, є вихідною для розробки функціональної схеми. В процесі розробки функціональної схеми ПФАПЧ вважатимемо еталонний (провідний) генератор ідеальним, тобто таким, у якого вихідний сигнал має абсолютно стабільне значення частоти і відсутній фазовий шум [9]. Також вважатимемо, що збурення, які діють на підсистему не значні, тому припустимо відсутність такого впливу. Використання 20-ти розрядного ЦАП та швидкодіючого мікроконтролер забезпечує можливість нехтувати ефектами цифровізації. З урахуванням зазначених умов функціональна схема ПФАПЧ генератора АСК, що керується напругою, матиме вид, який представлено на рис. 3.2 [1, 2, 18].

На даній схемі генератор, що керується напругою (ГКН), зображено у вигляді двох складових, а саме керуючого елементу (КЕ) та кварцового генератора, що керується напругою (КГ) [1, 2, 18]. По суті ГКН АСК є веденим генератором, який формує періодичний сигнал $u_{ГКН}(t)$ і синхронізується від синхросигналу провідного (еталонного) генератора (ПГ) $u_{ПГ}(t)$ за рахунок процесу фазового автопідстроювання частоти.

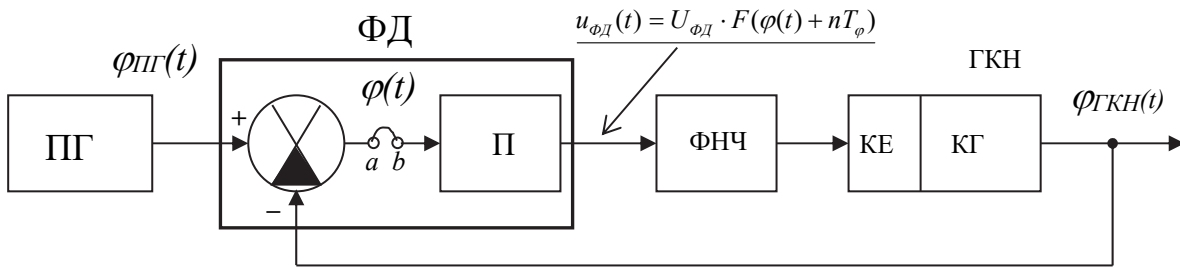


Рис. 3.2. Функціональна схема ПФАПЧ генератора АСК

ПГ – провідний генератор (відповідно один із можливих еталонних генераторів, що представлені на рис. 3.1);

ФД – фазовий дискримінатор;

П – перетворювач фазової різниці (похибки ПФАПЧ АСК) у сигнал керуючої дії;

ФНЧ – фільтр низьких частот (ФНЧ);

КЕ – керуючий елемент;

КГ – кварцовий генератор, що керується напругою;

ГКН – генератор, що керується напругою;

$u_{\text{ФД}}$ – сигнал на виході ФД (керуюча дія ПФАПЧ АСК);

$\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$ – похибка ПФАПЧ АСК;

$\varphi_{\text{ПГ}}(t)$ і $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$ – відповідно фази сигналів ПГ $u_{\text{ПГ}}(t)$ і ГКН $u_{\text{ГКН}}(t)$.

Для дослідження динамічних властивостей підсистеми ФАПЧ АСК необхідно побудувати її математичну модель. Для цього потрібно представити складові, які зображені на функціональній схемі ПФАПЧ АСК, у вигляді відповідних їм динамічних ланкам. Математична модель підсистеми ФАПЧ генератора, що керується напругою, АСК матиме вид, який представлено на рис. 3.3 [1, 2, 18].

Фазовий дискримінатор, який виконує функцію порівняння, описується алгебраїчним рівнянням:

$$\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t).$$

Зазначена різниця фаз (похибка ПФАПЧ АСК) $\varphi(t)$ в загальному випадку зв'язана з значенням різниці частот $\omega(t)$ сигналів ГКН $\omega_{\text{ГКН}}(t)$ і ПГ $\omega_{\text{ПГ}}(t)$ виразом:

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

де φ_0 – різниця фаз за умови $t=0$.

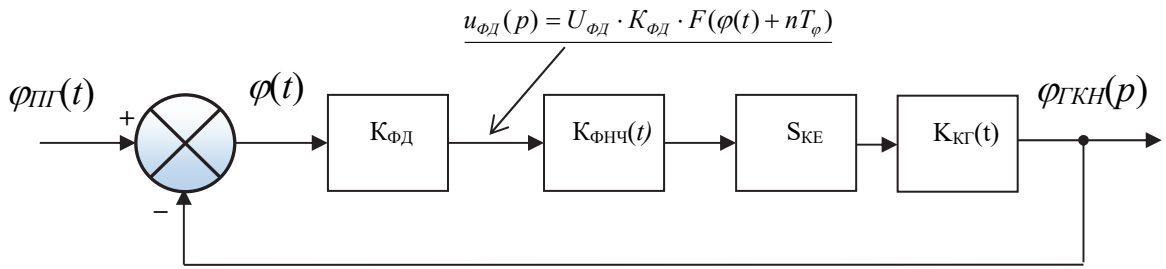


Рис. 3.3. Математична модель ПФАПЧ генератора АСК

Математичну модель замкнутої підсистеми ФАПЧ АСК можна записати у вигляді наступної системи рівнянь [1, 2, 18]:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Omega_{\Pi} - u_{\text{ФД}}(t) K_{\text{ФНЧ}}(t) S_{\text{КЕ}} K_{\text{КГ}}(t); \\ \varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t); \\ u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}} K_{\text{ФД}} F(\varphi(t) + nT_{\varphi}); \\ U_{\text{ФДмін}} \leq U_{\text{ФД}} \leq U_{\text{ФДмакс}}; \\ -1 \leq F(\varphi(t) + nT_{\varphi}) \leq 1, \end{cases} \quad (3.1)$$

де $\varphi(t)$ – фазова похибка ПФАПЧ АСК;

t – час;

Ω_{Π} – початкове розлаштування ГКН ПФАПЧ АСК відносно ПГ;

$S_{\text{КЕ}}$ – крутизна характеристики керуючого елементу ГКН ПФАПЧ;

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

$K_{\text{ФНЧ}}(t)$ – коефіцієнт передачі фільтра низьких частот ПФАПЧ;

$K_{\text{КГ}}(t)$ – коефіцієнт передачі кварцового генератора ГКН, що керується напругою;

$\varphi_{\text{ПГ}}(t)$ і $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$ – відповідно фаза провідного генератора (ПГ) і ГКН;

$U_{\text{ФД}}$ – екстремальне значення сигналу керуючої дії ПФАПЧ на виході ФД;

$K_{\text{ФД}}$ – коефіцієнт передачі ФД;

$F(\varphi + nT_{\varphi})$ – нормована періодична характеристика ФД з коефіцієнтом періоду n ;

$U_{\text{ФДмакс}}$ і $U_{\text{ФДмін}}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення сигналу на

виході ФД;

T_φ – період, періодичної за координатою φ , дискримінаційної характеристики ФД ПФАПЧ.

Приклад дискримінаційної характеристики фазового дискримінатора, яка періодична з періодом 2π , наведено на рис. 3.4 [1, 2, 9, 18, 21, 22]. Періодичність за координатою φ прямокутної статичної дискримінаційної характеристики ФД обумовлена періодичністю у часі цифрових тактових сигналів, що поступають на його входи.

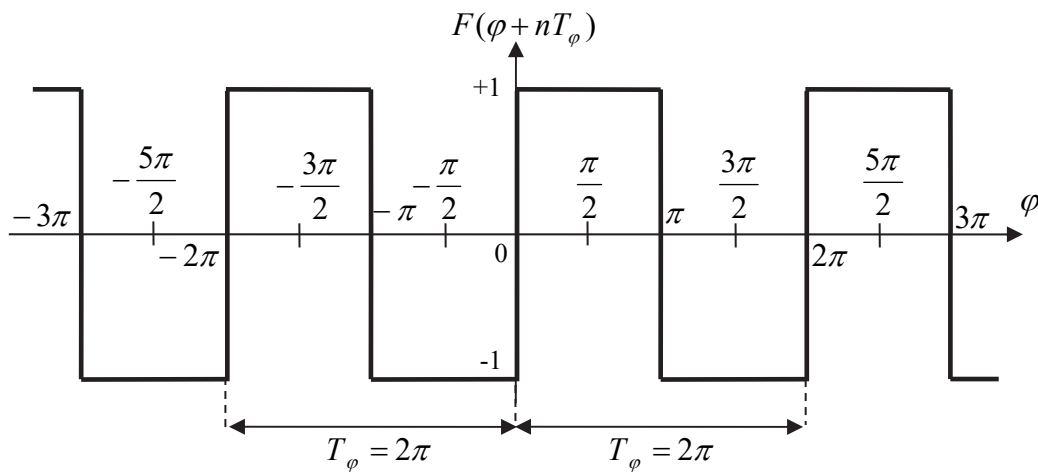


Рис. 3.4. Прямокутна нормована статична дискримінаційна характеристика ФД, яка періодична з періодом 2π

Нормована статична дискримінаційна характеристика ФД, яка наведена на рис. 3.4, може бути записана у вигляді [1, 2, 18]:

$$F(\varphi + nT_\varphi) = \text{sign} \sin(\varphi + nT_\varphi) \forall n = \overline{-\infty, +\infty}. \quad (3.2)$$

Специфікою математичної моделі виду (3.1) є врахування періодичності за фазовою координатою керуючої дії, яка формується ФД. Новизною результатів даної роботи є дослідження оптимальних за швидкодією підсистем ФАПЧ ГКН АСК, які враховують керуючі дії з періодичностями, що обумовлені періодичністю дискримінаційної характеристики ФД.

Варто також зазначити на те, що особливістю моделі виду (3.1) є наявність двох складових керування (φ і T_φ) в підсистемі автопідстроювання частоти ГКН АСК. Для даних параметрів керування $\varphi(t)$ і T_φ маємо наступну повну групу подій

[1, 2, 7, 18, 21, 22]:

- 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) $\varphi(t) = \text{const}, T_\varphi = \text{const}.$

Зосередимо подальші дослідження на розгляді перших двох варіантів, зважаючи на те, що останні мають протиріччя самої суті процесів керування, які реалізуються в ПФАПЧ ГКН. Два залишився варіанта в подальшому не розглядаються. Зауважимо на те, що складова керування T_φ в підсистемі ПФАПЧ ГКН може бути варіативною, наприклад, за рахунок зміни характеристики ФД.

3.3. Оптимізація за швидкодією ПФАПЧ генератора, що керується напругою

Проведемо аналітичні дослідження ПФАПЧ першого порядку з метою оптимізації її за швидкодією. Дослідження підсистеми ФАПЧ ГКН АСК пропонується виконувати в три етапи. На першому етапі зосередимо увагу тільки на проведенні аналітичних досліджень. На другому етапі виконаємо синтез оптимальної підсистеми ФАПЧ ГКН АСК з визначенням вимог до її структури і формуванням пропозицій щодо практичної реалізації. На останньому третьому етапі здійснимо імітаційне моделювання з використанням програмних засобів Simulink пакету MATLAB для експериментального підтвердження отриманих на попередніх етапах досліджень наукових результатів.

Розглянемо та проаналізуємо відомі результати аналітичних досліджень та встановлених аналітичних залежностей, які використовуються для формування оптимального за швидкодією закону керування ПФАПЧ першого порядку .

Така система має ряд важливих властивостей, завдяки яким вона застосовується на практиці поряд з більш складними системами високого порядку [1, 2, 9]. Насамперед варто відзначити, що аналіз найпростішої лінеаризованої моделі ПФАПЧ, базується на можливості точного рішення її рівнянь. Підвищення порядку системи, за рахунок збільшення кількості інерційних ланцюгів, є не

завжди доцільним тому, що при цьому знижується стійкість і збільшується тривалість перехідних процесів і не завжди покращується завадостійкість [9]. Деякі автори стверджують, що ПФАПЧ першого порядку є найкращою і навіть класифікують їх як оптимальні [25, 26]. Вагомі і досить повні результати досліджень отримані Каплановим, М.Р. і Левиним В.І. [27], Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. [9], Яніцим І.Я. [28] та рядом інших авторів. Натомість, в процесі реалізації ПФАПЧ з використанням сучасних цифрових засобів електроніки, постають актуальними дослідження, в яких враховуються обмеження, що пов'язані з наслідками процесів дискретизації та квантування інформаційних сигналів. Також в процесі аналітичних досліджень повинна враховуватись та особливість ПФАПЧ АСК, яка пов'язана з періодичністю керуючої дії в функції фазової координати даної підсистеми, котра формується фазовим дискримінатором ФД (рис. 3.4). Керуюча дія ПФАПЧ АСК - це напруга на виході ФД, яка є періодичною функцією різниці фаз $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$. Вказана періодичність обумовлена тим, що ПФАПЧ АСК має нескінчене злічене число станів стійкої рівноваги, яке визначається періодичністю різниці фаз:

$$\varphi = \varphi + nT_{\varphi}, \quad T_{\varphi} \geq 2\pi, \quad \forall \quad n = \overline{-\infty, +\infty}.$$

Крім зазначеної періодичності $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$ потрібно врахувати реальне обмеження на екстремальні значення керуючої дії типу "насичення":

$$U_{\text{ФДмін}} \leq u_{\text{ФД}}(t) \leq U_{\text{ФДмакс}}. \quad (3.3)$$

Таким чином, в реальній ПФАПЧ АСК крім часових обмежень на інтервал керуючої дії має місце обмеження на амплітуду (максимальні значення) вказаної керуючої дії.

Для ПФАПЧ АСК запишемо математичну модель та сформулюємо постановку задачі оптимізації за швидкодією. В АСК для випадку безпосереднього підключення до еталонного джерела може використовуватись підсистема автопідстроювання першого порядку, яка матиме фільтр низьких частот (ФНЧ) з нескінченною смугою пропускання, тобто $K_{\text{ФНЧ}}(p)=1$. З урахуванням параметра ФНЧ з нескінченною смугою пропускання і значень

коефіцієнта передачі ФД $K_{\text{ФД}}=1$ та коефіцієнта передачі КГ $K_{\text{КГ}}=1$ математична модель (3.1) прийме вид:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Omega_{\text{П}} - u_{\text{ФД}}(t)S_{\text{КЕ}}; \\ \varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t); \\ u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}}F(\varphi(t) + nT_{\varphi}); \\ U_{\text{ФДмін}} \leq U_{\text{ФД}} \leq U_{\text{ФДмакс}}; \\ -1 \leq F(\varphi(t) + nT_{\varphi}) \leq 1. \end{cases} \quad (3.4)$$

Сформулюємо задачу оптимального за швидкодією керування ПФАПЧ АСК за умов, що керуючою дією на ГКН підсистеми є сигнал на виході ФД $u_{\text{ФД}}(\varphi, t) = U_{\text{ФД}}F(\varphi(t) + nT_{\varphi})$, який формується на основі фазової різниці $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$.

Логічно, що у момент часу $t = t_0$ (початок процесу автопідстроювання), ПФАПЧ АСК знаходиться в стані, який визначається початковими умовами (3.4). Потрібно щоб ПФАПЧ АСК досягла стану стійкої рівноваги в момент часу t_K за допустимого значення сигналу періодичної керуючої дії $u_{\text{ФД}}(\varphi, t)$ з дотриманням умови мінімізації інтегрального критерію оптимальності, який задано у вигляді наступного функціонала

$$\Theta = \int_{t_0}^{t_k} 1 \cdot dt \Rightarrow \min. \quad (3.5)$$

Спочатку задачу оптимального за швидкодією керування ПФАПЧ АСК будемо вирішувати за наступних умов. В момент часу $t = t_0$ (початкове положення), ПФАПЧ АСК знаходиться в стані, який визначається початковими умовами: $\varphi(0) = \varphi_0(0)$, $\Omega_{\text{П}}(0) = 0$. Потрібно знайти таку керуючу дію $u_{\text{ФД}}(\varphi, t)$, яка забезпечує перехід ПФАПЧ АСК за мінімальний час, тобто за мінімальне значення інтегрального критерію оптимальності, від початкового стану в кінцеве положення, що задано наступними умовами $\varphi(t_K) = 0$, $\Omega_{\text{П}}(t_K) = 0$.

Для визначення оптимального за швидкодією закону керування в досліджуваній ПФАПЧ АСК скористаємося аналітичними результатами, що

наведені в [28]. А саме, на основі розробленої методики застосування принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна-Гамільтона [29-31] виконаємо оптимізацію за швидкодією ПФАПЧ генератора, що керується напругою АСК. Для цього спочатку складемо функцію Гамільтона відповідно до першого рівняння системи (3.4), яка є математичною моделлю ПФАПЧ АСК:

$$H = \Psi_1[\Omega_{\Pi} - u_{\Phi Д}(t)S_{KE}] - 1, \quad (3.6)$$

а також диференціальне рівняння для допоміжної змінної Ψ_1 :

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{dH}{d\varphi} = 0. \quad (3.7)$$

Вирішуючи диференціальне рівняння (3.7), отримаємо рівняння для допоміжної змінної Ψ_1 :

$$\Psi_1 = const. \quad (3.8)$$

Далі необхідно знайти такий закон керування, а саме таку зміну значення $u_{\Phi Д}(t)$ - напруги на виході ФД ПФАПЧ АСК, що дає в результаті спільного вирішення рівнянь (3.6) і (3.7) змінну величину $\varphi(t)$, для якої значення H у всіх її точках будуть максимальні. У цьому разі функція Гамільтона H в рівнянні (3.6) має бути максимальна по керуючій дії, якою є напруга на виході ФД ПФАПЧ АСК. Знайдений закон керування $u_{\Phi Д}(t)$ і відповідна йому змінна величина $\varphi(t)$ забезпечує оптимальний за швидкодією режим в ПФАПЧ АСК першого порядку.

Для практичної реалізації отриманого закону в ПФАПЧ АСК спочатку будемо врахувати лише реальні існуючі обмеження на амплітуду керуючої дії $u_{\Phi Д}(t)$ типу "насичення". Тоді для забезпечення максимуму функції Гамільтона (3.6) по $u_{\Phi Д}(t)$, необхідно, щоб напруга на виході ФД визначалась з рівняння [28]:

$$u_{\Phi Д}(t) = U_{\Phi Д екстр} \operatorname{sign}(S_{KE} \Psi_1), \quad (3.9)$$

де $U_{\Phi Д екстр}$ дорівнює граничним значенням нерівності в системі рівнянь (3.4).

Якщо припустити симетричність дискримінаційної характеристики ФД відносно осі абсцис, то тоді справедливі наступні відношення:

$$|U_{\Phi Д макс}| = |U_{\Phi Д мин}|, \quad U_{\Phi Д екстр} = U_{\Phi Д макс}, \quad (3.10)$$

які потрібно врахувати в формулі (3.9).

Відповідно до отриманого оптимального закону керування $u_{\Phi Д}(t)$ в підсистемі АСК, з врахуванням другого рівняння системи рівнянь (3.2), визначається формула для нормованої дискримінаційної характеристики ФД ПФАПЧ АСК:

$$F(\varphi(t) + nT_{\varphi}) = \text{sign}(S_{KE} \cdot \Psi_1). \quad (3.11)$$

Якщо скористатись результатами проведених аналітичних досліджень, що наведені в [28], то можна записати наступний аналітичний вираз для сигналу керуючої дії оптимальної ПФАПЧ першого порядку:

$$u_{\Phi Д}(t) = U_{екстр} \text{sign} \varphi_0, \quad (3.12)$$

де φ_0 – початкове значення фазової похибки $\varphi(t)$. Також можна визначити тип нормованої дискримінаційної характеристики ФД:

$$F(\varphi(t) + nT_{\varphi}) = \text{sign} \varphi_0 \quad (3.13)$$

і сформулювати вимоги до її характеристики. А саме, дискримінаційна характеристика ФД має бути знакозмінною, причому на часовому інтервалі протікання оптимальних перехідних процесів дискримінаційна характеристика ФД постійна, при цьому керуюча дія $u_{\Phi Д}(t)$ екстремальна, а її знак визначається знаком фазової різниці $\varphi(t) = \varphi_{ПГ}(t) - \varphi_{ГКН}(t)$.

Сформуємо, згідно отриманого в математичному вигляді (3.9) оптимального закону керування в ПФАПЧ АСК вимоги до її елементів з метою практичної реалізації. А саме вимоги до ФД. По перше, сигнал на виході ФД за часовий інтервал тривалості перехідного процесу, протягом якого відпрацьовується фазова різниця в ПФАПЧ АСК повинен мати максимальне $u_{\Phi Д}(t) = +U_{\Phi Д екстр}$, або мінімальне $u_{\Phi Д}(t) = -U_{\Phi Д екстр}$ значення, в залежності від початкового стану $\varphi(0) = \varphi_0(0)$. Згідно з теоремою про n -інтервалів оптимального за швидкодією закону керування для ПФАПЧ АСК першого порядку, маємо один інтервал руху [32, 33]. Наслідком є те, що нормована дискримінаційна характеристика ФД $F(\varphi(t), nT_{\varphi})$, $\forall n = -\infty, +\infty$ повинна бути, на часовому інтервалі тривалості перехідного процесу (в динаміці), неперіодичною функцією часу. Відповідно сигнал керування $u_{\Phi Д}(t)$ повинен мати постійне значення, яке дорівнює

максимальній амплітуді $u_{\Phi Д}(t) = +U_{\Phi Декстр}$ або мінімальній амплітуді $u_{\Phi Д}(t) = -U_{\Phi Декстр}$, в залежності від початкового стану $\varphi(0) = \varphi_0(0)$.

Отже для реалізації оптимальних за швидкодією перехідних процесів в підсистемі фазового автопідстроювання АСК, необхідна розробка ФД з керованою формою нормованої дискримінаційної характеристики [1], а саме:

$$F(\varphi(t), nT_{\varphi}, \sigma), \forall n = -\infty, +\infty, \quad (3.15)$$

де σ – сигнал керування формою ФД.

Сигнал σ забезпечує зміну форми дискримінаційної характеристики ФД в ПФАПЧ АСК на часовому інтервалі тривалості оптимального перехідного процесу Θ_{opt} . Варто зауважити на те, що в статиці дискримінаційна характеристика ФД $F(\varphi(t), nT_{\varphi}, \sigma), \forall n = -\infty, +\infty$ ПФАПЧ АСК може не змінюватись і бути періодичною за координатою φ , з періодом T_{φ} .

3.4. Синтез алгоритму та структури оптимальної за швидкодією підсистеми автопідстроювання з адаптивним цифровим фазовим дискримінатором на основі методу імітаційного моделювання

На другому етапі – реалізаційному створимо структуру і відповідні схеми для побудови адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД), що забезпечить формування заданого виду дискримінаційної характеристики ФД, по суті її адаптації, яке повинно здійснюватися каналом керування (третім входом ФД) для формування оптимальної керуючої дії ПФАПЧ АСК [35]. Також розробимо алгоритм функціонування оптимальної ПФАПЧ АСК з адаптивними властивостями.

Узагальнена функціональна схема оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ АСК, що має два ієрархічних рівня керування і АЦФД, зображена на рис.

3.5. На введений додатковий вхід АЦФД надходить сигнал керування $\sigma(t)$, що забезпечує зміну форми дискримінаційної характеристики ФД на часовому інтервалі тривалості оптимального перехідного процесу в залежності від величини і знаку фазової (в загальному випадку і частотної) похибки ПФАПЧ

АСК оптимальної за швидкодією. Канал керування ФД забезпечує за Θ_{opt} найшвидший перехід підсистеми в положення стійкої рівноваги для розглянутих раніше випадків, як при $T_\varphi=var$, так і при $T_\varphi=const$.

Розроблений алгоритм функціонування оптимальної за швидкодією підсистеми автопідстроювання АСК з адаптивними властивостями наведено на рис. 3.6.

Алгоритм функціонування оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з адаптивними властивостями розроблено на основі результатів аналізу встановлених аналітичних залежностей та синтезованої структури підсистеми АСК з використанням АЦФД, який на час оптимального перехідного процесу змінює форму дискримінаційної характеристики, і тим самим забезпечує формування заданого сигналу керуючої дії [35].

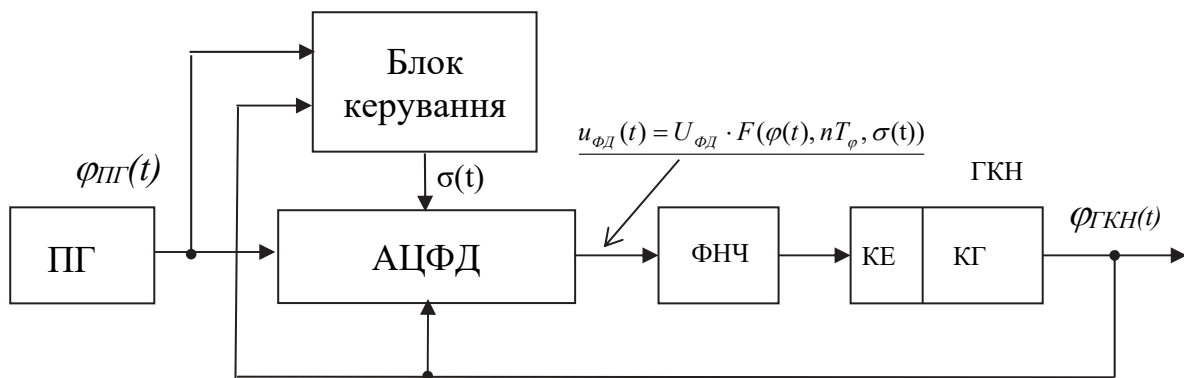


Рис. 3.5. Функціональна схема оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ АСК, що має два ієрархічних рівня керування

Для ефективного забезпечення практичної реалізації заданого виду дискримінаційної характеристики ФД доцільно використати сучасні технології цифрової обробки сигналів. Такий підхід дає можливість представити АЦФД, який матиме цифрові входи і виходи у вигляді узагальненої схеми пристрою, що наведена на рис. 3.7. Для забезпечення розширення функціональних можливостей щодо керування дискримінаційною характеристикою ФД, передбачена наявність k -входів каналу керування, на які можуть надходити сигнали даних, представлені у виді відповідних цифрових кодових комбінацій [1, 35].

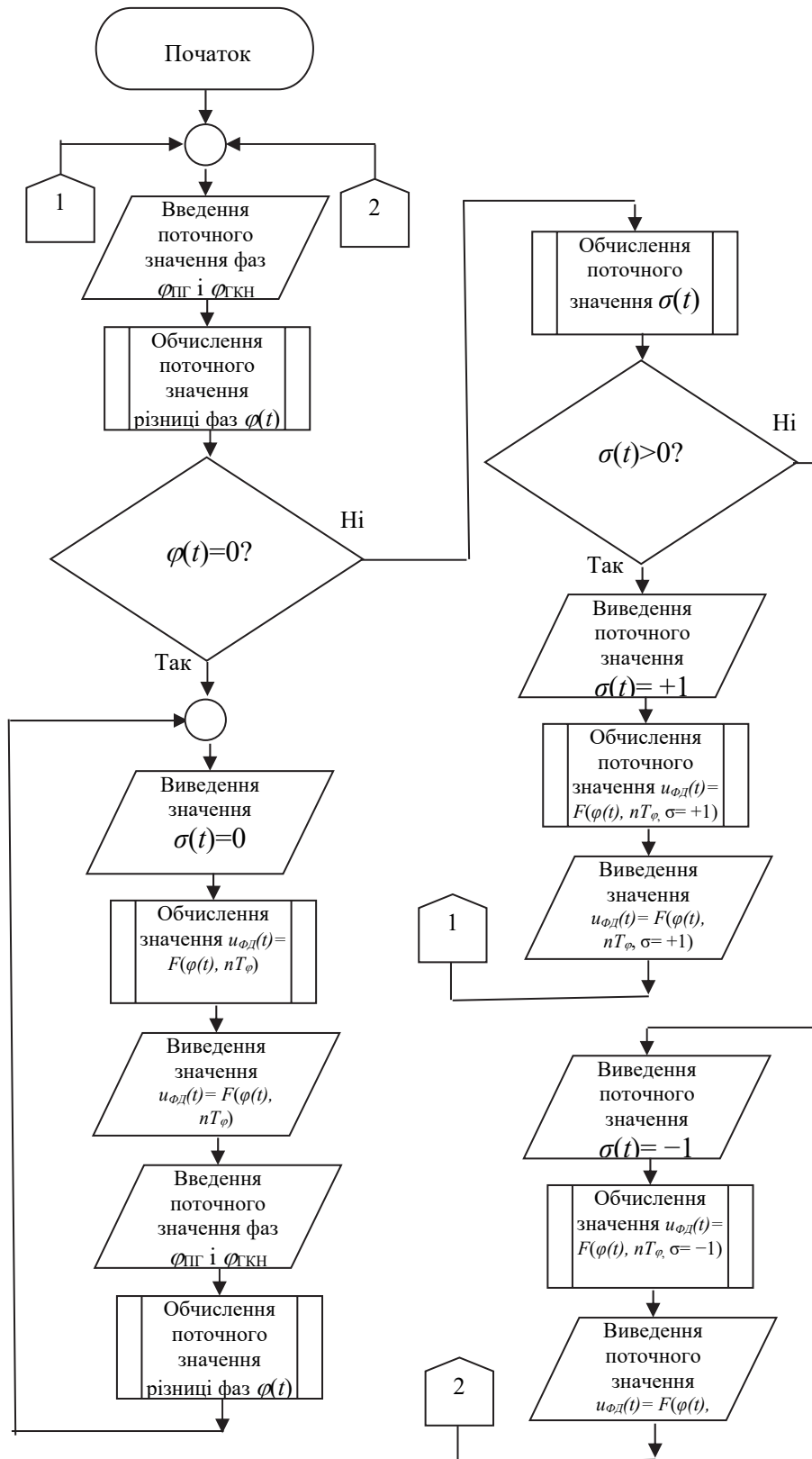


Рис.3.6. Блок-схема алгоритму функціонування оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ АСК, що має два ієрархічних рівня керування

Згідно блок-схеми, що наведена на рис. 3.7, розроблено функціональну і принципову схему АЦФД ПФАПЧ АСК, з використанням сучасних цифрових програмованих логічних схем, на який отримано патент на винахід України №113473 [35]. Принципові електричні схеми, котрі розроблено в програмному середовищі Quartus Prime Lite Edition, наведено у другому розділі дисертації на рис. 2.1 та 2.2.

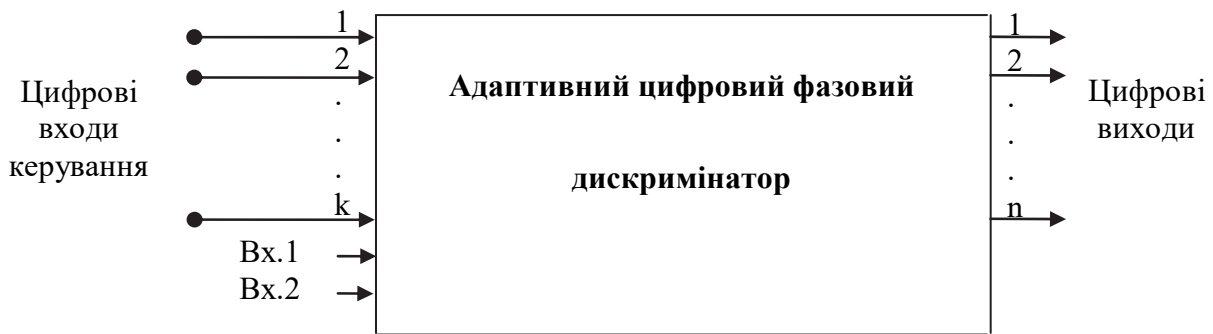


Рис. 3.7. Блок-схема адаптивного цифрового фазового дискримінатора

Створений АЦФД забезпечує адаптивно-кероване формування кодової комбінації про величину кута зсуву фази (різниці часу) двох взаємно незалежних періодичних імпульсних послідовностей та підвищення достовірності представлення результатів вимірювань в цифровому виді [1, 2, 35]. Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор, містить вхід, на який подається сигнал першої вхідної імпульсної послідовності (Вх.1) та вхід на який подається сигнал другої вхідної імпульсної послідовності (Вх.2), а також К-входи попередньої установки лічильника імпульсів (нумеровані 1...k), що є К цифровими входами попередньої установки коду (оптимального переключення $\sigma(t)$) пристрою і n-виходів - цифрових виходів пристрою, на яких формується кодова комбінація, що відповідає часовій неузгодженості між першою і другою вхідними імпульсними послідовностями [1, 2, 35].

АЦФД ПФАПЧ АСК працює таким чином. Перша вхідна імпульсна послідовність надходить на вхід Вх.1, а друга - на вхід Вх.2 АЦФД (рис. 3.7).

Кодова комбінація, що буде формуватися на виходах $1 \dots n$, відповідає величині зсуву фази між вхідними імпульсними послідовностями і є представленням вимірної різниці фаз у цифровому виді [1].

На K -входи (нумеровані $1, 2 \dots k$), які є K цифровими входами попередньої установки коду, подають цифрову кодову комбінацію, що відповідає необхідному дискретному значенню початкового стану АЦФД. Отримана можливість зміни початкового стану АЦФД ПФАПЧ АСК дозволяє забезпечити адаптивне кероване формування кодової комбінації про величину кута зсуву фази двох імпульсних послідовностей. Цифрова кодова комбінація на виході АЦФД ПФАПЧ АСК після цифро-аналогового перетворення формує значення напруги, яка подається на вхід ГКН.

Технічне рішення винаходу забезпечує адаптивне кероване формування кодової комбінації та підвищує достовірність представлення результатів вимірювань в цифровому виді [35].

Використання АЦФД в ПФАПЧ АСК забезпечує керування формою характеристики ФД на часовому інтервалі тривалості оптимального перехідного процесу Θ_{opt} для загального випадку в залежності, від величини і знаку фазової (частотної) похибки. Канал керування ФД забезпечує найшвидший рух відображаючої точки ПФАПЧ АСК в положення стійкої рівноваги і, як наслідок, реалізується оптимальне за швидкістю керування.

Для підтвердження отриманих аналітичних і реалізаційних результатів, на третьому етапі синтезу, виконаємо на персональному комп'ютері імітаційне моделювання створеної схеми ПФАПЧ ГКН з необмеженою смугою пропускання ФНЧ та АЦФД. На рис. 3.8, для порівняння, представлені імітаційні моделі створеної схеми ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ та АЦФД (оптимізованої), а також не оптимізованої схеми (ПФАПЧ з ФД), назвемо її традиційною [2]. Схеми імітаційного моделювання розроблені з використанням пакету програм Simulink/MATLAB. На рис. 3.8 генератор, що керується напругою ПФАПЧ АСК (ГКН) представлено у виді інтегратора з надписом «DCG», ФД представлено з надписом «PD», адаптивний цифровий фазовий дискримінатор з

цифро-аналоговим перетворювачем – «ADPD», мікроконтролер – «Control unit».

На рис. 3.9 наведено осцилограми перехідного процесу, які отримані на виході оптимальної за швидкодією (схема, що розташована вище) та не оптимізованої ПФАПЧ АСК (нижня схема). З рис. 3.9 можна зробити наступні висновки. В традиційній підсистемі (рис. 3.9, нижня схема) перехідний процес має форму кривої, що прямує до точки стійкої рівноваги. Таким чином, в традиційній ПФАПЧ АСК фазове розлаштування підсистеми асимптотично зменшується до нуля, при цьому тривалість перехідного процесу становитиме величину $\Theta \approx 4$ с (рис.3.9, традиційна).

В оптимальній за швидкодією ПФАПЧ АСК (рис. 3.9, верхня схема) перехідний процес має форму прямої, що з'єднує початкову точку з точкою стійкої рівноваги, яка відповідає нульовому значенню фазового розлаштування. В оптимальній за швидкодією ПФАПЧ АСК тривалість перехідного процесу становитиме величину $\Theta = 1$ с.

За результатами імітаційного моделювання з використанням пакету програм Simulink/MATLAB стає очевидним те, що в створеній оптимальній за швидкодією ПФАПЧ тривалість перехідного процесу є меншою ніж в традиційній схемі. Перехідний процес має форму прямої, при цьому тривалість його мінімальна, а відповідно ПФАПЧ ГКН є оптимальною за швидкодією.

Отже, використання АЦФД в ПФАПЧ АСК забезпечує можливість керування формою дискримінаційної характеристики ФД, тобто адаптацію структури підсистеми, на інтервал часу тривалості перехідного процесу в залежності від знаку різниці фаз. В свою чергу, канал керування АЦФД забезпечує найшвидший перехід відображаючої точки в положення стійкої рівноваги і, як наслідок, в підсистемі ФАПЧ АСК реалізується оптимальне за швидкодією керування.

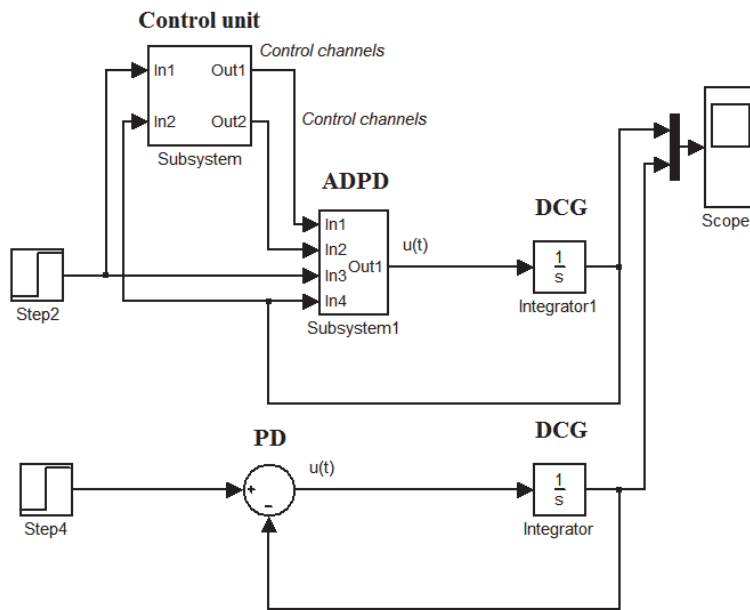


Рис. 3.8. Імітаційні моделі ПФАПЧ АСК з необмеженою смугою пропускання ФНЧ [верхня підсистема з АЦФД «ADPD», нижня - з ФД «PD»]

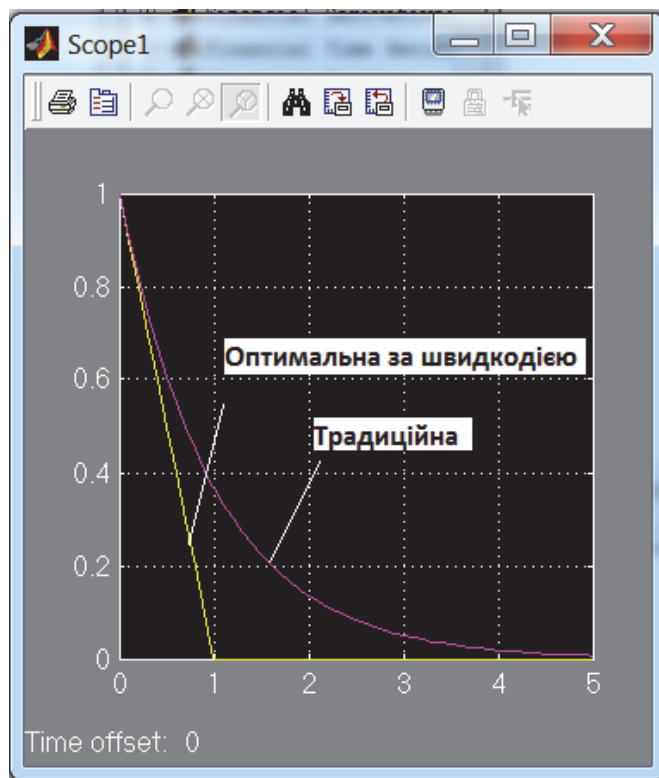


Рис. 3.9. Осцилограми сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0=1$)

3.5. Моделювання та експериментальні дослідження підсистем автопідстроювання частоти з необмеженою смугою пропускання ФНЧ

Виконаємо імітаційне моделювання з використанням програми Simulink пакету MATLAB та проведемо експериментальні дослідження оптимізованої за швидкодією ПФАПЧ ГКН, що має два ієрархічних рівня керування, а також ФНЧ з необмеженою смугою пропускання та АЦФД (файл Test_8_1poradok.mdl). На рис. 3.9, для порівняння, представлені дві імітаційні моделі: оптимальної за швидкодією ПФАПЧ (аналогічна імітаційній моделі, що зображена на верхній схемі на рис. 3.8) і класичної (не оптимізованої), в якій статична характеристика ФД має синусоїдальну форму. На рис. 3.9 фазовий дискримінатор PD представлено у вигляді трьох блоків: порівняння, підсилювача «Gain1» та блока тригонометричних функцій «Trigonometric Function», що налаштований на реалізацію синусоїдальної залежності його вихідної величини від вхідної. ГКН «DCG» оптимізованої схеми ПФАПЧ з АЦФД на схемі рис. 3.10 реалізований з використанням блоку «Integrator1», а в традиційній схемі ПФАПЧ з ФД аналогічний генератор реалізований з використанням блоку «Integrator».

Для проведення дослідження підсистеми ФАПЧ у просторі станів на фазовій площині в схему введені блоки диференціювання «Derivative» та графобудівники «XY Graph». Блоки диференціювання «Derivative» і «Derivative1» забезпечують формування сигналу, що відповідає похідній від фази $\varphi_{ГКН}(t)$ сигналу генератора, що керується напругою «DCG». На графіку, що відображається у вікні графобудівника «XY Graph», за віссю X відображаються значення фазової похибки підсистеми автопідстроювання частоти ГКН – φ , а за віссю Y відображаються значення її похідної, тобто ω . Часовий аналіз сигналів проводиться з використанням осцилографа «Scope1», у вікні якого за одного масштабу часу відображаються осцилограми сигналів генераторів, що керуються напругою «DCG».

Результати експериментальних досліджень представлено на рис. 3.11 і рис. 3.12 для випадку, коли початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = 3$, та на рис. 3.13

і рис. 3.14 для випадку, коли початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = -3$.

Результати експериментальних досліджень ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за різних початкових значень фазової похибки φ_0 , як для підсистеми, що має два ієрархічних рівня керування та АЦФД, так і для класичної (не оптимізованої) підсистеми, наведено у Додатку Д дисертації.

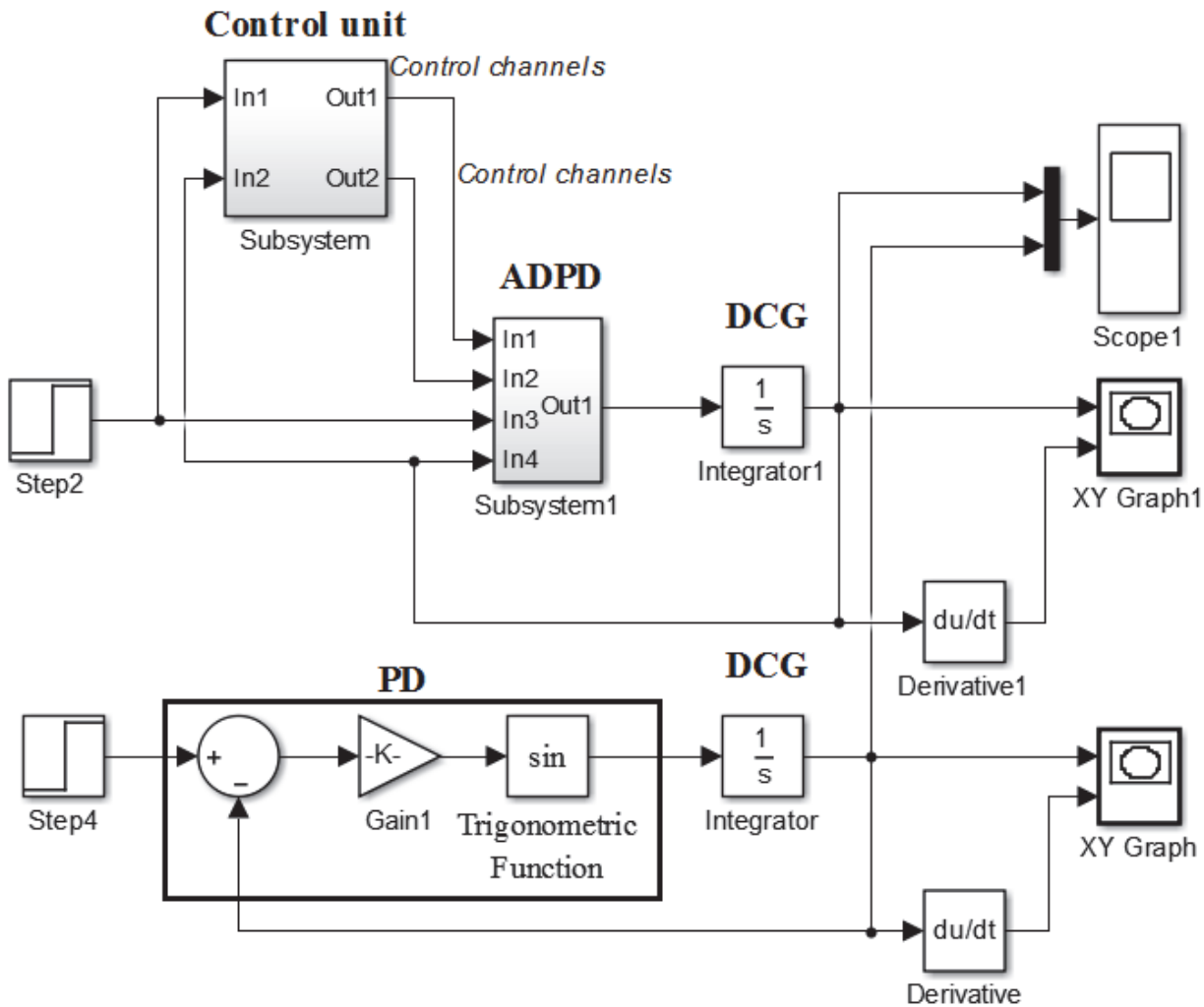


Рис. 3.10. Імітаційні моделі ПФАПЧ ГКН з необмеженою смугою пропускання ФНЧ [верхня підсистема з АЦФД (ADPD), нижня - з ФД (PD), що має характеристику синусоїдальної форми]

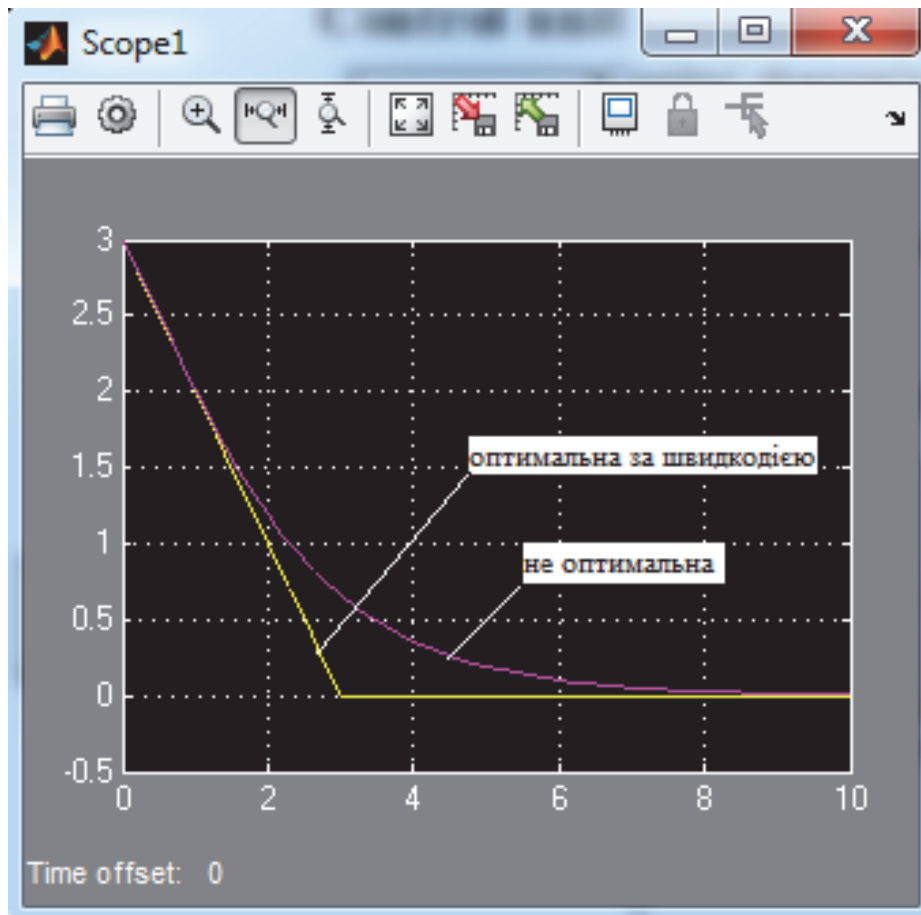


Рис. 3.11. Осцилограми сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = 3$)

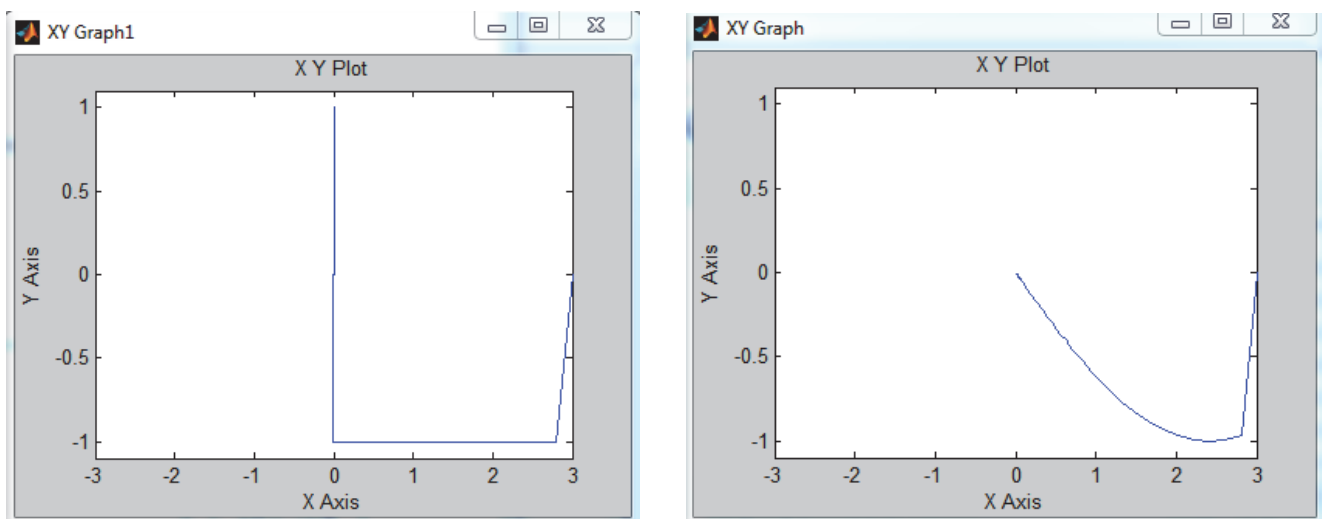


Рис. 3.12. Фазові портрети підсистем ФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за початкового значення фазової похибки $\varphi_0 = 3$

(графік зліва - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

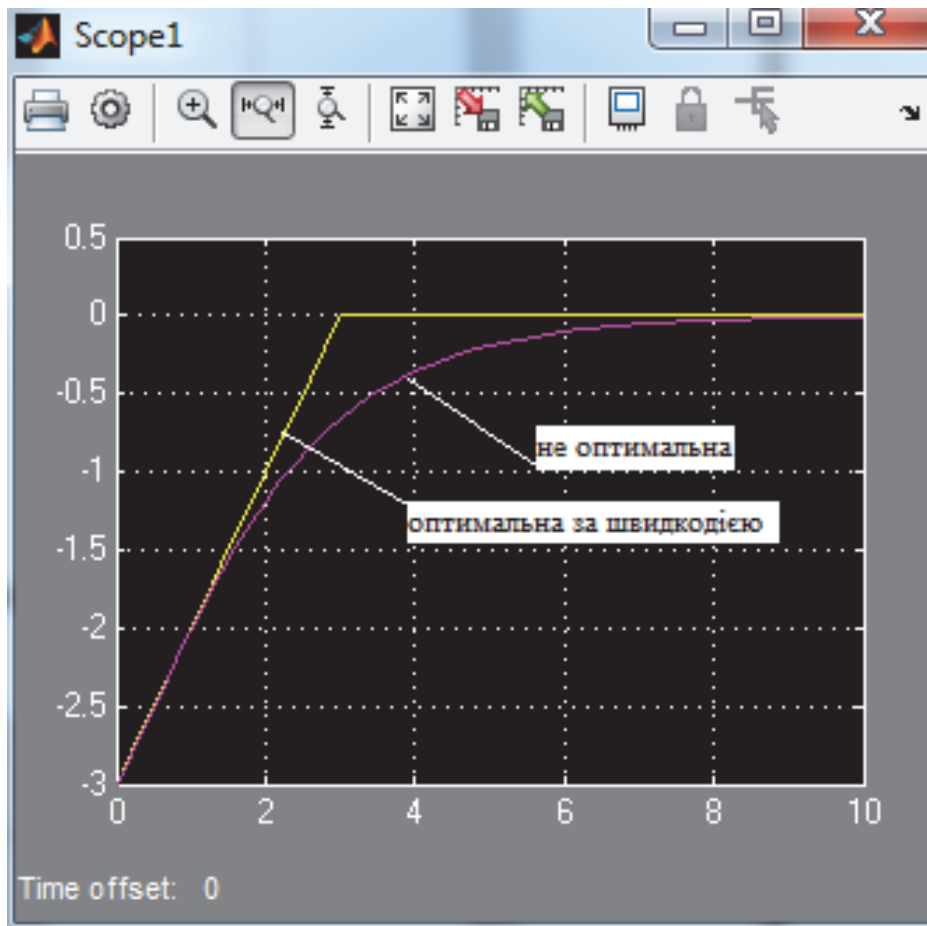


Рис. 3.13. Осцилограми сигналів на виходах ГН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = -3$)

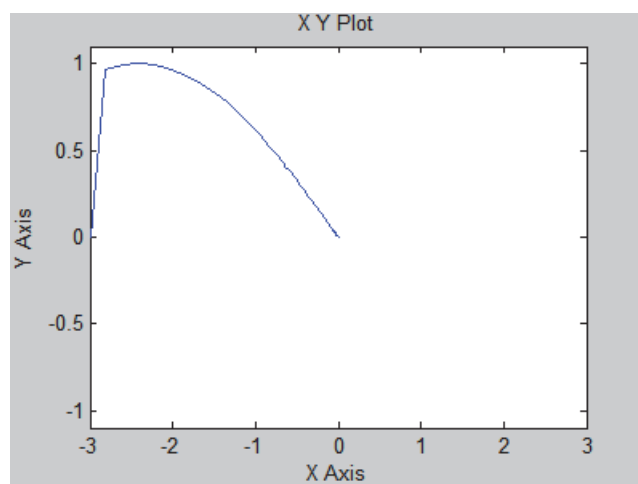
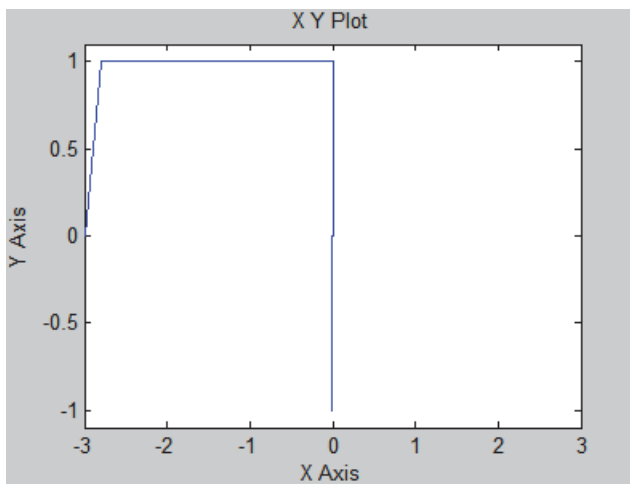


Рис. 3.14. Фазові портрети підсистем ФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за початкового значення фазової похибки $\varphi_0 = -3$

(графік зліва - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

З метою узагальнення результатів експериментальних досліджень ПФАПЧ АСК з необмеженою смугою пропускання ФНЧ виконаємо аналіз та визначимо ефективність процесу оптимізації за швидкодією.

В якості вихідних даних будемо використовувати показник тривалості перехідного процесу в ПФАПЧ. Тривалість перехідного процесу в традиційній (не оптимізованій) ПФАПЧ, яка буде взята за базову позначимо Θ , а в підсистемі, що є оптимальна за швидкодією відповідно $\Theta_{\text{опт}}$.

Застосуємо метод графо-аналітичного аналізу до результатів імітаційного моделювання схем досліджуваних ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ, визначених з графіків осцилограм, за різних початкових значень фазової похибки φ_0 , що представлені на рис. 3.11, рис. 3.13 та в Додатку Д дисертації.

Складемо таблицю (табл. 3.1), в яку занесемо визначені, з графіків осцилограм сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ, значення тривалості перехідного процесу Θ і $\Theta_{\text{опт}}$. Зважаючи на асимптотичний характер перехідного процесу в традиційній (не оптимізованій) підсистемі ФАПЧ, визначати його тривалість будемо за умови досягнення кривої перехідного процесу значення 5% від сталого значення фазової похибки (в даному випадку значення $\varphi = 0$).

Для визначення кількісних показників, які можна отримати за умови реалізації в ПФАПЧ оптимального за швидкодією закону керування, будемо використовувати коефіцієнт ефективності оптимізації, що розраховується за формулою:

$$K_{\text{онм}} = \frac{\Theta}{\Theta_{\text{онм}}}. \quad (3.16)$$

В табл. 3.1 занесемо визначені за формулою (3.16) значення коефіцієнта ефективності оптимізації $K_{\text{онм}}$ та побудуємо, з використанням засобів табличного процесора Excel, графіки залежності тривалості перехідного процесу (рис. 3.14) та графік коефіцієнта ефективності оптимізації від значень початкової фазової похибки φ_0 (рис. 3.15).

Таблиця 3.1 – Залежність параметрів підсистем ФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ від різних значень початкових умов

φ_0	Θ	$\Theta_{\text{опт}}$	$K_{\text{опт}}$
-3,0	8,0	3,0	2,7
-2,0	7,0	2,0	3,5
-1,0	4,0	1,0	4,0
1,0	4,0	1,0	4,0
2,0	7,0	2,0	3,5
3,0	8,0	3,0	2,7

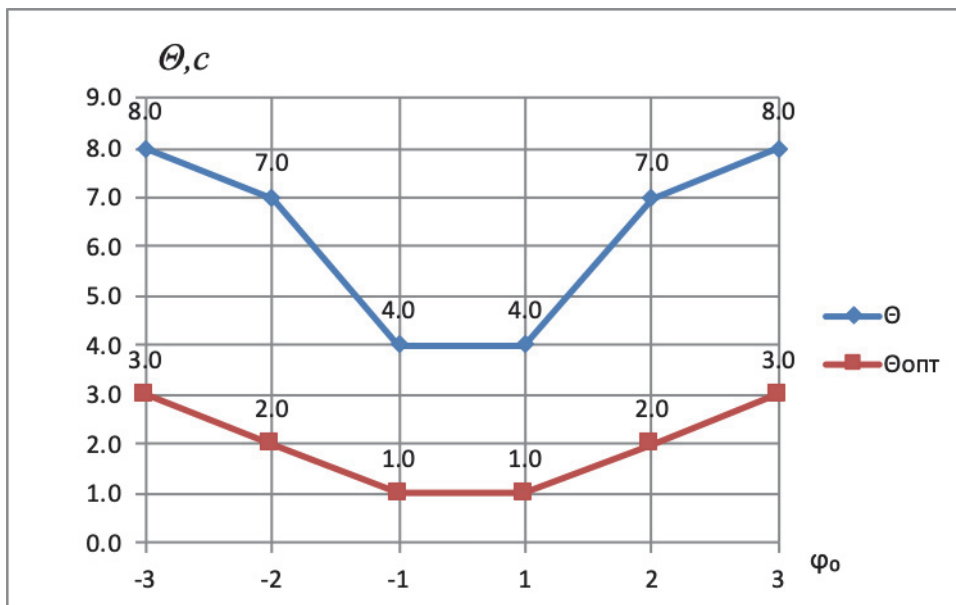


Рис. 3.14. Графіки залежності тривалості переходного процесу від значень початкової фазової похибки φ_0

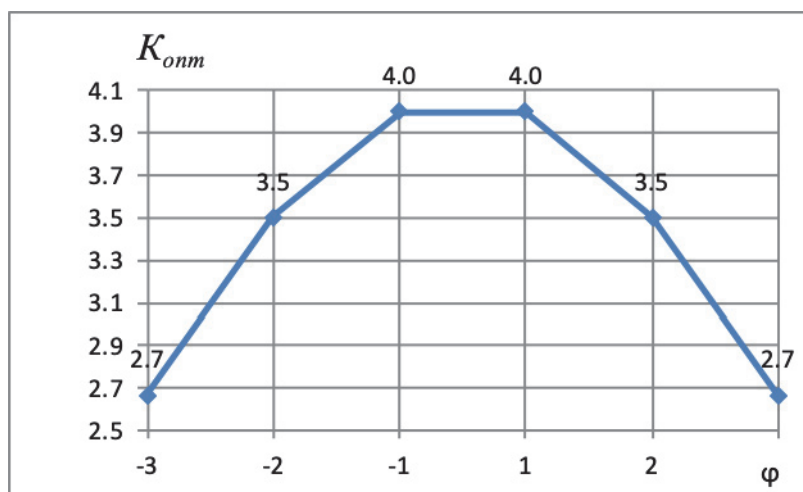


Рис. 3.15. Залежність ефективності реалізації в підсистемі ФАПЧ оптимального за швидкодією закону керування від різних значень початкових умов

З аналізу графіка залежності тривалості перехідного процесу від значень початкової фазової похибки φ_0 (рис. 3.14) можна зробити висновок про те, що в досліджуваний оптимальній за швидкодією ПФАПЧ АСК тривалість перехідного процесу є меншою ніж в схемі не оптимізованій [35].

Кількісне порівняння параметрів підсистем ФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ, у разі реалізації оптимального за швидкодією закону керування, на основі коефіцієнта ефективності оптимізації $K_{\text{опт}}$ (рис. 3.15), призводить до висновку про зменшення тривалості перехідного процесу від 2,7 до 4 разів в залежності від значення початкових умов.

За результатами імітаційного моделювання можна зробити висновок про те, що використання оптимального за швидкодією закону керування в ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (система першого порядку) забезпечує ефективне підвищення (в рази) її швидкодії [1, 2, 12, 16-18, 35].

3.6. Основні результати та висновки до розділу 3

Набуло подальшого розвитку дослідження підсистем фазового автопідстроювання частоти АСК з нелінійностями, що обумовлені періодичностями керуючої дії в функції фазової координати системи та обмеженнями типу «насичення». Виконано узагальнення отриманих раніше результатів, проведено аналітичні досліджень ПФАПЧ ГКН з необмеженою смугою пропускання ФНЧ та виконано синтез ієрархічної структури оптимальної за швидкодією підсистеми з використанням програми Simulink пакету MATLAB.

За результатами проведених досліджень можна сформулювати наступні висновки.

1. Обґрунтована необхідність підвищення ефективності формування опорного сигналу, що використовується для автоматизованого контролю якості синхросигналів, за рахунок оптимізації за швидкодією підсистеми фазового автопідстроювання частоти опорного генератора АСК.

2. Враховуючи наявність нелінійностей в математичній моделі ПФАПЧ АСК, що обумовлені періодичностями керуючої дії в функції фазової координати та обмеженнями типу «насичення», пропонується синтез структури оптимальної за швидкодією підсистеми виконувати в три етапи: перший – аналітичний; другий – реалізаційний; третій – імітаційного моделювання (з використанням програми Simulink пакету MATLAB).

3. Отримав подальший розвиток метод синтезу оптимальних за швидкодією підсистем ФАПЧ з періодичностями керуючої дії в функції фазової координати підсистеми та обмеженнями типу «насичення». Виконано, на основі аналізу встановлених аналітичних залежностей, синтез структури оптимальної ПФАПЧ з адаптивними властивостями, в якій забезпечується формування сигналу керуючої дії оптимального за швидкодією закону керування.

4. Запропоновано для реалізації оптимальних за швидкодією перехідних процесів в ПФАПЧ ГКН, використання двох ієрархічних рівнів керування та адаптивного цифрового фазового дискримінатора з керованою формою дискримінаційної характеристики.

5. Розроблено алгоритм функціонування оптимальної ПФАПЧ ГКН з адаптивними властивостями, на основі аналізу встановлених аналітичних залежностей та синтезованої структури підсистеми автопідстроювання з використанням фазового дискримінатора з керованою формою дискримінаційної характеристики, що забезпечує формування сигналу керуючої дії на час оптимального перехідного процесу.

6. Розроблено структуру і відповідні схеми для побудови адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД, на який отримано патент України на винахід №113473), що забезпечить формування заданого виду дискримінаційної характеристик, по суті її адаптації, яке повинно здійснюватися каналом керування для формування оптимальної керуючої дії в ПФАПЧ ГКН.

7. Виконано імітаційне моделювання створеної схеми ПФАПЧ ГКН з необмеженою смугою пропускання ФНЧ та розробленим АЦФД, яке наочно підтвердило отримані аналітичні і реалізаційні результати, щодо можливості

реалізації в цій підсистемі оптимального за швидкістю керування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dmytro Kalian. Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences, Number 1(2018), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.11-18. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/136460>
2. Кальян Д.О., Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецький. Оптимізація за швидкістю автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540>
3. 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.
4. V.V. Koval, V.P. Lysenko, D.O. Kalian, M.V. Golovnya, O.V. Samkov, O.M. Piskun, M.S. Medina, I.Y. National Time Scale Transmitting Through the Integrated Power Networks of SMART Technologies / International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T-2018). 9 - 12 October 2018: Kharkiv National University of Radio Electronics / Conference Proceedings. – p.p.89-94. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632078>
5. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.
6. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с.

7. Тактовая синхронизация в интегральных цифровых сетях электросвязи / В.И. Борщ, В.П. Гайдар, В.В. Коваль, И.П. Лесовой. – К.: Наукова думка, 1998. – 202 с.
8. Иерархические формирователи сетки частот сетей телекоммуникаций / Борщ В.И., Донец В.А., Коваль В.В., Михайлов Н.К., Туманов Ю.Г. / Под ред. акад. Академии связи Украины, д-ра техн. наук, проф. В.И. Борща. – К.: Наукова думка, 2001. – 212 с.
9. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. М.: Радио и связь, 1989. - 320 с.
10. Ведені пристрої синхронізації з періодичним автопідстроюванням телекомунікаційних мереж: монографія / В. В. Коваль. – К.: ЦП “КОМПРИНТ”, 2017. – 342 с.
11. Комбинированные системы фазовой автоподстройки : Моногр. / В. К. Стеклов, А. А. Руденко, А. К. Юдин. - К. : Техніка, 2004. - 327 с.
12. Системи фазового автопідстроювання високої точності та швидкодії / В. К. Стеклов, О. А. Руденко, Б. Я. Костік. - К. : Техніка, 2005. - 343 с.
13. Д.Э. Палей, Л.Н. Казаков. Динамика дискретной системы второго порядка с несколькими нелинейностями. Известия высших учебных заведений . Том 38, № 3 (1995). <http://radio.kpi.ua/article/view/S00213470199503006X>
14. Sonneman R.W., Gupta S.C. Optimum strategice for minimum time frequesy transities in phcese-locked loops. IEEE Trans., v. FES-5, 1966.
15. Коваль В.В., Кальян Д.О., Циб В.М., Шевчук Б.В. Системи синхронізації цифрових інфокомунікацій з адаптивними властивостями / Тези доповідей III Міжнар. наук.-техн. конф. “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК”, м.Київ 17-19 грудня 2015 р., Київ, Україна. – К.: НУБіП України, 2015. – С.36-38. (Здобувачем розроблено систему синхронізації з адаптивними властивостями та фазовою автоматичною підстройкою частоти).
16. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Кальян Д.О., Коваль В.В. мол. Комп'ютерне моделювання та статистична оптимізація пристроїв синхронізації з

адаптивними властивостями / Тези доповідей VII Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», 21-22 квітня 2016 р. Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2016 – С.98-100.

17. Koval Valerii, Dorogobed Veronica, Kalian Dmytro, Khudyntsev Mykola, Koval Viktor. Optimizing dynamic of synchronization system with phase-locked loop for infocommunication networks // Abstracts XXVIII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 25-30 серпня 2016: Брно, Чехія, – 2016. - С.65.

18. Kalian D. Optimizing circuits for self-tuning in devices for synchronization system for transmitting reference time and frequency signals from reference source. / 2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017): Odesa, Ukraine, 11-15 september, 2017 / Materials of scientific and technical conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – p.p.179-183.

19. Коваль В.В., Кальян Д.О., Максименко Ю.А., Самков О.В. Оптиміальне за швидкодією фазове автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу інтегрованих систем електропостачання Smart-технологій // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2018. – Вип.283. – С.89-98. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnau_tech_2018_283_13

20. Koval V.V., Kalian D.O. "Highly Efficient Synchronization Systems for Infocommunication Networks" / 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015. Lviv, Ukrain, 29 oktober - 1 november 2015. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2015. – С.153-154.

21. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.

22. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія /

В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с.

23. 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: НУ «Львівська політехніка». – 2017. – С.22-25.

24. Valerii Koval, Dmytro Kalia, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov, Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - pp.269-276.

25. Кульман Н.К., Стратонович Р.Л. Фазовая автоподстройка частоты и оптимальное измерение узкополосного сигнала с непостоянной частотой в шуме. – Радиотехника и электроника, т.9, №1, 1964. - С. 67-78.

26. Тихонов В.И. Нелинейная фильтрация и квазиоптимальный характер фазовой автоподстройки частоты. – Изв. АН СССР, Техническая кибернетика, №2, 1965.

27. Капланов М.Р., Левин В.А. Автоматическая подстройка частоты. – М.,- Л.: Госэнергоиздат. – 1962.

28. Яніцький І.Я. Оптимізація формувача періодичних відліків часу з кільцем фазового автопідстроювання виокремленого пристрою синхронізації телекомунікаційних мереж. дис. канд. 2007.

29. Понтрягин Л.С. Принцип максимума в оптимальном управлении. - М.; ЕдиториалУРСС. - 2004. - 64с.

30. Понтрягин Л.С., Болтянский В.Г., Гамкрелидзе Р.В., Мищенко Е.Ф.

Математическая теория оптимальных процессов. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 392 с.

31. Теория оптимальных систем автоматического управления. Иванов В.А., Фалдин Н.В. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 336 с.

32. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Изд. 2, испр. и доп. М.: Наука, 1966. – 624 с.

33. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. М.: Наука, 1971. – 743 с.

34. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 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.

35. Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій: Звіт про НДР за державним замовленням / НУБіП України; Номер державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ ЗА ШВИДКОДІЄЮ ТА АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПФАПЧ ГЕНЕРАТОРА ОПОРНОГО СИГНАЛУ АСК

4.1. Оптимізація за швидкодією ПФАПЧ генератора, що керується напругою, з інтегрувальною ланкою

В третьому розділі дисертації для підсистеми ФАПЧ першого порядку було показано, що вирішення задачі аналізу оптимальних за швидкодією режимів перехідних процесів генератора, що керується напругою, на основі принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна потребує визначення аналітичних виразів для розрахунку показників якості та побудови кривої фазових траєкторій процесу керування в функції часу [1-5].

Очевидно, що вирішення першої задачі зводиться до розв'язку системи рівнянь за різних початкових умов з врахуванням оптимального періодичного закону керування $u_{\Phi D}(t)$. Для отримання цього розв'язку необхідно представити оптимальний характер перехідного процесу у вигляді окремих параметричних рівнянь по відповідним інтервалам оптимальної керуючої дії, оскільки це рішення є справедливим для всіх інтервалів оптимального руху згідно з алгоритмом керування. Тривалість інтервалів оптимальних режимів перехідних процесів знаходиться із оптимальних розв'язків шляхом визначення моментів інтервалів їх початку і закінчення [1]. При цьому необхідно знайти на фазовій площині координати всіх точок переключення керуючої дії.

Визначимо викладену вище методологію та виявимо особливості аналізу дослідження спочатку для ПФАПЧ АСК, в якій ФНЧ реалізується у вигляді інтегрувальної ланки, з врахуванням періодичності дискримінаційної характеристики ФД. Відомо, що побудова оптимальних за швидкодією ФАПЧ, відповідно до принципу максимуму [6, 7], зводиться до знаходження закону кусково-постійного (релейного) керування, а практична реалізація таких систем забезпечується за рахунок введення нелінійних логічних пристроїв. Також зазначимо на невизначеність початкових умов допоміжної вектор-функції.

Вказані обставини істотно ускладнюють розробку і проектування ФАПЧ, які використовуються для формування опорного сигналу у блоці первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК. У випадку можливості виконання точних аналітичних розрахунків, наприклад, коли нелінійні неоднорідні диференціальні рівняння, що описують динаміку і статику ПФАПЧ АСК, допускають їхнє аналітичне інтегрування, розв'язок задачі здійснений і мова може вестися лише про трудомісткість самої процедури. При неможливості точного аналітичного розрахунку або складності самої процедури пошуку рішення доцільно використовувати наближені чисельні, графічні і графоаналітичні методи [6, 8].

Будемо формулювати постановку задачі оптимізації за швидкодією у класичному виді. А саме, потрібно знайти оптимальне керування ПФАПЧ АСК, яке переводить його з початкового стану в кінцевий (заданий) за мінімальний час. Специфіка розв'язку задачі оптимізації полягає в особливостях ПФАПЧ АСК і можливих варіантах формування сигналів керуючої дії. Вихідні дані для розв'язку задачі оптимізації за швидкодією базуються на використанні статичних характеристик і математичних моделей ланок ПФАПЧ АСК, а також врахуванні виду сигналів керуючої дії та обмежень на них. Отже, розв'язок задачі оптимізації за швидкодією може бути застосований лише до детермінованих ПФАПЧ АСК.

Розглянемо випадок, коли період коливань керуючої дії T_i в підсистемі ФАПЧ АСК не заданий. Покладемо, що фільтр нижніх частот реалізовано у вигляді інтегрувальної ланки, тобто його вихідний сигнал (напруга, струм, кодова комбінація) пропорційний інтегралу за часом від вхідного сигналу. 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 [9]:

$$u_{\phi HЧ_{вих}}(t) = k_\phi \int_0^t u_{\phi HЧ_{вх}}(t) dt \quad (4.1)$$

та

$$K_{\phi}(p) = \frac{1}{T_{\phi} p},$$

де $u_{\text{ФНЧ}_{\text{вх}}}(t)$ та $u_{\text{ФНЧ}_{\text{вих}}}(t)$ – відповідно напруга сигналу на вході та виході ФНЧ реалізованого у вигляді інтегровальної ланки;

$T_{\phi} = 1/k_{\phi}$ – постійна інтегрування;

p – комплексна змінна ($p = \sigma + j\omega$).

Математичною моделлю ПФАПЧ АСК (рис. 3.3), яка отримана з системи рівнянь (3.1), за умови використання в якості ФНЧ інтегровальної ланки, що описується рівнянням (4.1), для випадку коли початкове розлаштування ГКН відносно ПГ є постійним ($\Omega_{\text{ПГ}} = \text{const}$), може бути наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} = K_1 u_{\text{ФД}}(t); \\ \varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t); \\ u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФД}} K_{\text{ФД}} F(\varphi(t) + nT_{\varphi}); \\ U_{\text{ФДмін}} \leq U_{\text{ФД}} \leq U_{\text{ФДмакс}}; \\ -1 \leq F(\varphi(t) + nT_{\varphi}) \leq 1, \end{cases} \quad (4.2)$$

де $K_1 = -S_{\text{КЕ}} K_{\text{КГ}}(t) / T_{\phi}$.

Для значення коефіцієнта передачі кварцового генератора КГ $K_{\text{КГ}}=1$ коефіцієнт K_1 визначається рівнянням $K_1 = -S_{\text{КЕ}} / T_{\phi}$. В подальших дослідженнях, аналогічно тому як це було зроблено у третьому розділі, прийmemo значення коефіцієнта передачі ФД рівним $K_{\text{ФД}}=1$.

В автоматичі існує ряд інших об'єктів, динаміка яких апроксимується виродженим диференціальним рівнянням, аналогічним першому рівнянню системи (4.2). Проте у підсистемі ФАПЧ АСК є специфічна властивість: керуюча дія $u_{\text{ФД}}(t)$ є періодичною функцією різниці фаз. Це обставина приводить до характерних особливостей протікання перехідних процесів і виду фазового портрету підсистеми. Фазовий портрет ПФАПЧ АСК розбивається на частини лініями перемикання і виявляється розділеним на безліч областей, які будуть періодично повторюються [4-8]. Попадання відображаючої точки в один із станів

стійкої рівноваги, тобто закінчення перехідного процесу, можливо лише в якійсь одній області.

Для того, щоб було зручніше досліджувати модель ПФАПЧ АСК, бажано привести її до системи дифрівнянь першого порядку, яка називається нормальною формою Коші. Запишемо перше рівняння системи (4.2) у вигляді системи рівнянь першого порядку

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \omega(t); \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = K_1 u_{\Phi Д}(t), \end{cases} \quad (4.3)$$

де $K_1 = -S_{KE} / T_{\phi}$.

Виконаємо оптимізацію за швидкодією ПФАПЧ АСК другого порядку з інтегрувальною ланкою в кільці керування, за умови $T_{\varphi} = \text{var}$. Будемо шукати керування $u_{\Phi Д}(\varphi, \omega)$, яке початковий стан ФАПЧ (φ_0, ω_0) переводить в початок координат підсистеми АСК за мінімальний час θ_{opt} згідно критерію (3.5).

Відомо [10], що оптимальне регулювання об'єктом (4.3) існує і воно єдине.

Згідно відомій методиці, складемо функцію Гамільтона для системи рівнянь (4.3), яка визначає оптимальне за швидкодією керування в ПФАПЧ АСК

$$H = \psi_1 \omega + \psi_2 K_1 u_{\Phi Д}(t) - 1 \quad (4.4)$$

і систему рівнянь для допоміжних змінних ψ_1 і ψ_2

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \varphi}, \\ \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial \omega} = \psi_1. \end{cases} \quad (4.5)$$

Виконаємо інтегрування системи рівняння (4.5), з урахуванням (4.4), в результаті чого отримаємо систему рівнянь для допоміжних змінних ψ_1, ψ_2 вектор-функції Ψ :

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_{10} = \text{const}, \\ \psi_2 = \psi_{10} t + \psi_{20}. \end{cases} \quad (4.6)$$

Відповідно до принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна оптимальним за

швидкодією керуванням буде таке, при якому функція Гамільтона буде максимальною за керуючою дією $u_{\Phi Д}(t)$. У цьому разі також повинні бути враховані обмеження типу «насичення» (3.3) на керуючу дію $u_{\Phi Д}(t)$. Очевидно, для виконання зазначеного необхідно, щоб

$$u_{\Phi Д}(t) = U_{\Phi Декстр} \cdot \text{sign}[\psi_{10}t + \psi_{20}], \quad (4.7)$$

де $U_{\Phi Декстр}$ дорівнює граничним значенням керуючої дії $u_{\Phi Д}(t)$: $U_{\Phi Дмін}$ або $U_{\Phi Дмакс}$.

Математичний вираз (4.7) є оптимальним за швидкодією законом керування для ФАПЧ з інтегровальною ланкою. З аналізу виразу (4.7) виходить, що керуюча дія повинна мати моменти зміни знаку, що відповідають переходам через нуль виразу, що стоїть в квадратних дужках. Також з виразу (4.7) слідує, що керуюча дія $u_{\Phi Д}(t)$ повинна мати не більш ніж одне перемикання, так як за будь-яких початкових умов ψ_{10} і ψ_{20} вираз, що стоїть в квадратних дужках, може змінити знак не більше одного разу. Це положення відповідає теоремі А.А. Фельдбаума про n -інтервалів [11, 12].

Для визначення траєкторії руху відображаючої точки системи ФАПЧ другого порядку у фазовому просторі досить знати проекції цих фазових траєкторій на площину (φ, ω) . Виключимо час t з системи рівнянь (4.3) та для граничних значень $U_{\Phi Дмін}$ та $U_{\Phi Дмакс}$ отримаємо наступні відношення за якими можна розрахувати відповідні траєкторії руху:

$$\frac{d\omega}{d\varphi} = K_1 \frac{1}{\omega} u_{\Phi Дмін} \quad \text{та} \quad \frac{d\omega}{d\varphi} = K_1 \frac{1}{\omega} u_{\Phi Дмакс}. \quad (4.8)$$

Виконаємо інтегрування рівнянь (4.8) та отримаємо рівняння фазових траєкторій на координатній площині (φ, ω) відповідно для граничних значень $U_{\Phi Дмін}$ та $U_{\Phi Дмакс}$:

$$\frac{\omega^2}{2} = \varphi K_1 u_{\Phi Дмін} + c \quad \text{та} \quad \frac{\omega^2}{2} = \varphi K_1 u_{\Phi Дмакс} + c, \quad (4.9)$$

де c – постійна інтегрування, величину якої можна знайти, задавши координати початкової точки, що знаходиться на координатній площині (φ, ω) .

Рівняння (4.9) визначають на фазовій площині (φ, ω) відповідно два сімейства фазових траєкторій ПФАПЧ АСК, які відповідають двом значенням керуючої дії $u_{\text{ФД}}(t): U_{\text{ФДмін}}$ або $U_{\text{ФДмакс}}$. Очевидним є те, що всі фазові траєкторії ПФАПЧ АСК відповідно кожного сімейства можна отримати за різних початкових умов, тобто для різних значень постійної інтегрування c у відповідних рівняннях (4.9).

Рівнянню (4.9), для якого керуюча дія $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмакс}}$, відповідає одне сімейство фазових траєкторій на площині (φ, ω) (рис. 4.5), а у разі значення керуючої дії $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмін}}$ – інше сімейство фазових траєкторій. Будемо позначати зазначені сімейства відповідно L^+ і L^- та називати цю множину точок фазової площини (φ, ω) напівтраєкторіями, як це зроблено у багатьох відомих публікаціях, наприклад [13-15].

До прикладу розглянемо фазові траєкторії (рис. 4.5), які відображають перехід ПФАПЧ АСК у разі прийняття значення керуючої дії $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмакс}}$, що відповідають переходу відображаючої точки із точки **П** в точку **О** - початок координат. Натомість, у разі прийняття значення керуючої дії $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмін}}$, на фазових траєкторіях (рис. 4.5) демонструється перехід відображаючої точки із точки **М** також в початок координат (точка **О** на площині (φ, ω)).

З рис. 4.5 видно, що лінія перемикання відокремлює область напівтраєкторій сімейства з різними знаками керуючої дії $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмакс}}$ або $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмін}}$. Покладемо для визначеності, що нульова напівтраєкторія L^+ належить області, де керуюча дія $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмакс}}$, а нульова напівтраєкторія L^- - $u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{ФДмін}}$. На другому інтервалі оптимального руху знак керуючої дії змінитися на протилежний і тоді відображаюча точка ПФАПЧ АСК на цьому (другому) інтервалі керування буде рухатись по фазовим траєкторіям, що проходять через початок координат (точка **О** на площині (φ, ω)), тобто по лінії перемикання L_O^-, O, L_O^+ . У цьому випадку, на першому інтервалі руху

відображаюча точка від точки **П** та точки **М** повинна попасти на лінію L_O^-, O, L_O^+ . У випадку знаходження в початковий момент точки безпосередньо на лінії L_O^-, O, L_O^+ відбувається рух по цій лінії в початок координат фазової площини (φ, ω) тільки за один інтервалі керування, тобто без зміни знаку $u_{\Phi D}(t)$.

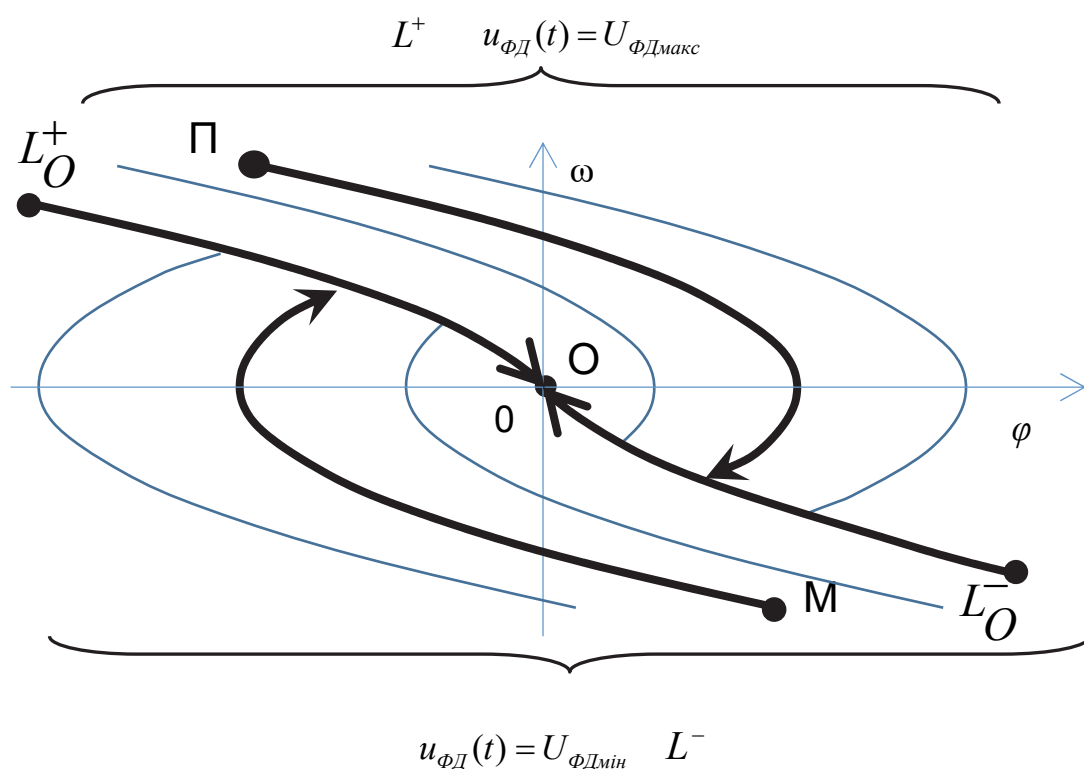


Рис. 4.5. Сімейство фазових траєкторій ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$

Загалом з довільної точки фазової площини (φ, ω) відображаюча точка повинна попасти на лінію L_O^-, O, L_O^+ і рухатись по цій траєкторії в початок координат (точка **О** на площині (φ, ω)) не більше ніж за два інтервали керування, тому ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою задовольняє умовам теореми про n -інтервалів [11]. Оптимальне керування $u_{\Phi D}(t)$ є кусково-незмінним і має не більше двох інтервалів постійності. Лінії перемикання L_O^-, O, L_O^+ відокремлюють один від однієї дві області які визначаються протилежним за знаком сигналом $u_{\Phi D}(t)$.

Згідно сформульованої задачі визначимо координати точки перемикавання, розписавши рівняння фазових траєкторій (4.9) ПФАПЧ АСК за інтервалами оптимального руху відображаючої точки з урахуванням знаків $u_{\Phi D}(t)$.

Для першого інтервалу оптимального руху відображаючої точки ПФАПЧ АСК система рівнянь матиме вид:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}\omega_1^2 = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_{-1}} \varphi_1 + C_1; \\ C_1 = \frac{\omega_0^2}{2} - \varphi_0 K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_{-1}}. \end{cases} \quad (4.10)$$

Для другого інтервалу оптимального руху відображаючої точки ПФАПЧ АСК:

$$\begin{cases} \frac{1}{2}\omega_2^2 = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_{-2}} \varphi_2 + C_2; \\ C_2 = 0, \end{cases} \quad (4.11)$$

де φ_1, φ_2 і ω_1, ω_2 - поточне значення координат φ і ω відповідно на першому і другому інтервалах;

$U_{\Phi \text{Декстр}_{-1}}$ і $U_{\Phi \text{Декстр}_{-2}}$ - значення керуючої дії $u_{\Phi D}(t)$ ПФАПЧ АСК відповідно на першому і другому інтервалах.

Вирішуючи спільно рівняння (4.10) і (4.11) в точці перемикавання $\omega_1 = \omega_2 = \Omega_1$, $\varphi_1 = \varphi_2 = \Phi_1$ отримаємо дві формули для визначення координат цієї точки

$$\Phi_1 = \frac{C_1}{K_1 (U_{\Phi \text{Декстр}_{-2}} - U_{\Phi \text{Декстр}_{-1}})}, \quad (4.12)$$

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{2(C_2 U_{\Phi \text{Декстр}_{-1}} - C_1 U_{\Phi \text{Декстр}_{-2}})}{U_{\Phi \text{Декстр}_{-1}} - U_{\Phi \text{Декстр}_{-2}}}}. \quad (4.13)$$

Для визначення тривалості оптимальних перехідних процесів відображаючої точки ПФАПЧ АСК знайдемо розв'язок рівнянь (4.3) за довільних початкових умов:

$$\omega = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}} t + C_2^1,$$

$$\varphi = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}} \frac{t^2}{2} + C_2^1 t + C_1^1. \quad (4.14)$$

Згідно з (4.14) представимо оптимальний перехідний процес у вигляді наступних рівнянь за інтервалами керування з урахуванням можливої послідовності порядку перемикання $u_{\Phi Д}(t)$.

Для першого інтервалу руху відображаючої точки в ПФАПЧ АСК рівняння матимуть вид:

$$\omega_1 = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_1} \cdot t_1 + C_{21}^1; \quad C_{21}^1 = \omega_0, \quad (4.15)$$

$$\varphi_1 = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_1} \cdot \frac{t_1^2}{2} + C_{21}^1 t_1 + C_{11}^1; ,$$

а для другого інтервалу:

$$\omega_2 = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_2} \cdot t_2 + C_{22}^1; \quad C_{22}^1 = \omega_1 - K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_2} \cdot t_1', \quad (4.16)$$

$$\varphi_2 = K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_2} \cdot \frac{t_2^2}{2} + C_{22}^1 t_2 + C_{12}^1; \quad C_{12}^1 = \varphi_1(t_1') - K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_2} \cdot \frac{(t_1')^2}{2} + C_{22}^1 t_1'.$$

де t_1 і t_2 - поточний час на першому і другому інтервалах оптимального руху;

t_1^1 і t_2^1 - момент часу в кінці першого і другого інтервалів оптимального руху.

З перших рівнянь (4.15) і (4.16) знаходимо тривалість зазначених інтервалів режимів оптимальних перехідних процесів в ПФАПЧ АСК

$$\theta_1 = t_1^1 - t_0 = \left| \frac{1}{K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_1}} (\omega_1 - \omega_0) \right|; \quad t_0 = 0, \quad (4.17)$$

$$\theta_2 = t_2^1 - t_1^1 = \left| -\frac{1}{K_1 U_{\Phi \text{Декстр}_2}} \omega_1 \right|. \quad (4.18)$$

Тривалість всього оптимального перехідного процесу в ПФАПЧ АСК буде дорівнювати

$$\theta_{\text{онт}} = \theta_1 + \theta_2. \quad (4.19)$$

Отримані розрахункові формули (4.13), (4.13), (4.18) і (4.19) дозволяють з

використанням систем рівнянь (4.15), (4.16) визначити основні параметри перехідного процесу в ПФАПЧ АСК і його характер. З використанням систем рівнянь (4.10), (4.11) можна визначити фазовий портрет ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умов $T_t = \text{var}$ і $T_\varphi = \text{var}$, тобто повністю вирішити задану задачу аналізу.

4.2. Моделювання, експериментальні дослідження та синтез оптимальної за швидкодією підсистеми фазового автопідстроювання частоти АСК з інтегрувальною ланкою

На основі отриманих теоретичних результатів аналітичних досліджень виконаємо синтез оптимальної за швидкодією ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою. Синтез почнемо з розгляду траєкторії руху відображаючої точки ПФАПЧ АСК на заключному етапі перехідного процесу. Зазначена точка повинна рухатись по траєкторії L_O^-, O, L_O^+ в точку **О** на площині (φ, ω) (початок координат фазової площини). Ця траєкторія є лінією перемикавання тому, що вона розділяє площини де має керуюча дія $u_{\phi d}(t)$ різний знак. У цьому разі, крива L_O^-, O, L_O^+ розділяє фазову площину (φ, ω) на дві частини, в яких $u_{\phi d}(t)$ повинна приймати протилежні за знаком екстремальні значення. Згідно з теоремою А.А. Фельдбаума про n -інтервалів кількість змін знаку $u_{\phi d}(t)$ в ПФАПЧ АСК 2-го порядку оптимальній за швидкодією повинно бути не більше $n-1$, тобто не більше одного. На першому етапі перехідного процесу відображаюча точка ПФАПЧ АСК повинна досягти лінії перемикавання L_O^-, O, L_O^+ і далі рухатись по цій траєкторії в точку **О** на площині (φ, ω) (початок координат фазової площини). Отримаємо оптимальне за швидкодією керування в підсистемі ФАПЧ ГКН з інтегрувальною ланкою, у разі якщо знак керуючої дії $u_{\phi d}(t)$ зміниться в той момент, коли відображаюча точка сягне лінії перемикавання L_O^-, O, L_O^+ .

Отримати аналітичний вираз для визначення лінії перемикавання в досліджуваний ПФАПЧ АСК можна з рівнянь (4.9). Для цього припустимо, що

для лінії перемикавання L_O^-, O, L_O^+ в рівняннях (4.9) постійна величина $c=0$ і тоді отримаємо рівняння фазових траєкторій на координатній площині (φ, ω) відповідно для граничних значень $U_{\PhiДмін}$ та $U_{\PhiДмакс}$:

$$\frac{\omega^2}{2} = \varphi K_1 u_{\PhiДмін} \quad \text{та} \quad \frac{\omega^2}{2} = \varphi K_1 u_{\PhiДмакс} . \quad (4.20)$$

У разі якщо, сигнал керування в ПФАПЧ АСК формується ФД з симетричною, відносно φ , характеристикою (максимальне значення дорівнює $u_{\PhiДмакс}(t) = +U_{\PhiДекстр}$, а мінімальне $u_{\PhiДмін}(t) = -U_{\PhiДекстр}$), то можна записати закон керуючої дії $u_{\PhiД}(t)$ у вигляді рівняння:

$$u_{\PhiД}(t) = \text{sign } \sigma(\varphi, \omega) \cdot U_{\PhiДекстр} , \quad (4.21)$$

де $\sigma(\varphi, \omega)$ – функція перемикавання.

Для визначення функції перемикавання спочатку запишемо відповідні рівняння нульових фазових траєкторій L_O^-, O, L_O^+ , що описують ділянки кривих обмежених на площині (φ, ω) точками L_O^+, O та O, L_O^- (рис. 4.5) з урахуванням обраного симетричного типу дискримінаційної характеристики ФД:

$$+\frac{\omega^2}{2} - \varphi \cdot K_1 = 0 \quad \text{та} \quad -\frac{\omega^2}{2} - \varphi \cdot K_1 = 0 . \quad (4.20)$$

Оскільки на ділянці кривої, що обмежена на площині (φ, ω) точками L_O^+, O , значення $\omega > 0$ і на ділянці кривої O, L_O^- значення $\omega < 0$, то рівняння усієї кривої перемикавання ПФАПЧ АСК L_O^-, O, L_O^+ можна представити у наступному вигляді:

$$\frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign } \omega - \varphi K_1 = 0 . \quad (4.21)$$

Функція перемикавання $\sigma(\varphi, \omega)$ може бути визначена з аналізу фазового простору зображеного на рис. 4.5, який розділений кривою перемикавання L_O^-, O, L_O^+ на дві області. Очевидно, що вище за криву перемикавання L_O^-, O, L_O^+ , яка визначається рівнянням (4.21), дане рівняння не буде виконуватись, тобто не буде рівним нулю і буде додатнім. Нижче за криву перемикавання L_O^-, O, L_O^+ рівняння

(4.21) також не буде виконуватись, тобто не буде рівним нулю і буде від'ємним. Отже, для максимальної швидкодії в досліджуваній ПФАПЧ АСК потрібно забезпечити реалізацію функції перемикання $\sigma(\varphi, \omega)$ за наступним законом:

$$\begin{cases} \sigma(\varphi, \omega) = \text{sign}\left(\frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign } \omega - \varphi \cdot K_1\right), \text{ у разі } \left|\frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign } \omega - \varphi \cdot K_1\right| > 0; \\ \sigma(\varphi, \omega) = 0, \text{ у разі } \frac{\omega^2}{2} \cdot \text{sign } \omega - \varphi K_1 = 0. \end{cases} \quad (4.22)$$

Практична реалізація встановленого закону керування (4.22) передбачає використання обчислювального пристрою для розрахунку виразу, який записано після знаку *sign* системи рівнянь (4.22) і визначення його знаку.

Блок-схему обчислювального пристрою блоку керування ПФАПЧ АСК наведено на рис. 4.6.

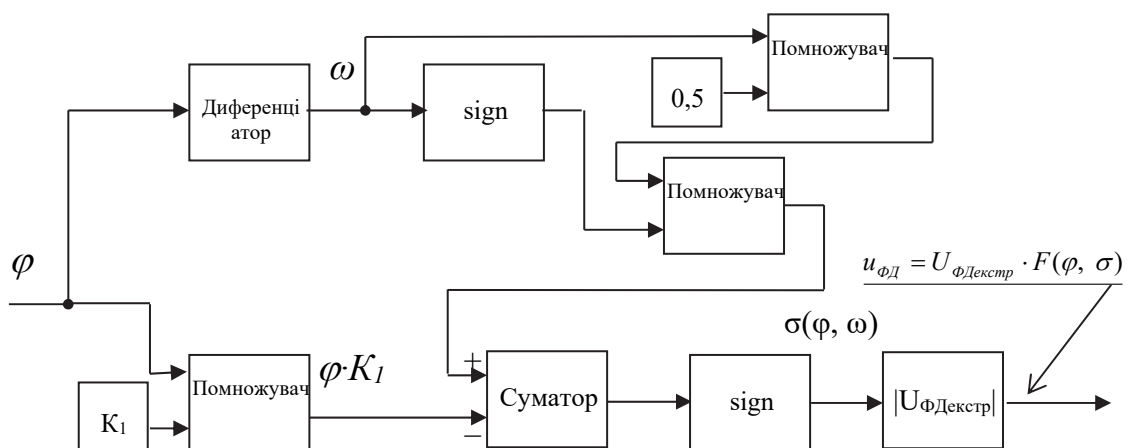


Рис. 4.6. Блок-схема обчислювального пристрою оптимальної за швидкістю ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$

Якщо вважати за постійну фазу високостабільного провідного (еталонного) генератора $\varphi_{\text{ПГ}}(t) = \text{const}$ (рис. 3.3), то блок-схема обчислювального пристрою за умови $T_\varphi = \text{var}$ може бути дещо спрощеною. Імітаційна модель оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою, яка розроблена з використанням програми Simulink пакету MATLAB, наведена на рис. 4.8.

На рис. 4.8 фрагмент блок-схеми обчислювального пристрою виділено

прямокутником з надписом «Блок контролю», інтегруючу ланку представлено у виді інтегратора «Integrator2», ГКН представлено у виді інтегратора «Integrator» з надписом DCG. Елемент, що забезпечує знакозмінну керуючу дію реалізовано на базі релейного елемента «Reley2».

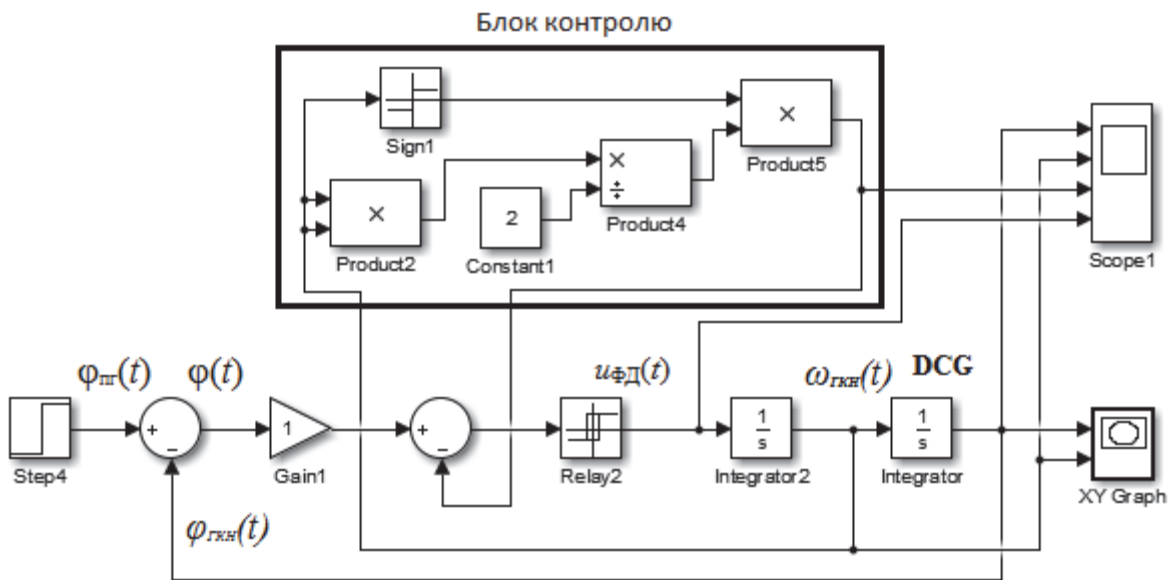


Рис. 4.8. Імітаційна модель оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$

Для підтвердження отриманих аналітичних результатів виконаємо експериментальні дослідження розробленої імітаційної моделі (рис. 4.8) з використанням програми Simulink пакету MATLAB. Для проведення дослідження підсистеми ФАПЧ у просторі станів на фазовій площині в схемі використовується графобудівник «XY Graph». На графіку, що відображається у вікні графобудівника «XY Graph», за віссю X відображаються значення фазової похибки підсистеми автопідстроювання частоти ГКН – $\varphi(t)$, а за віссю Y відображаються значення її похідної, тобто ω .

Часовий аналіз сигналів в контрольованих точках схеми проводиться з використанням багатопроменевго осцилографа «Scope1».

Результати експериментальних досліджень представлено на рис. 4.9 та 4.10 для випадку, коли початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = 0$, а початкове

частотне розлаштування $\omega_0 = 3$, та на рис. 4.11 та 4.12 для випадку, коли початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = -3$, а початкове частотне розлаштування $\omega_0 = 0$.

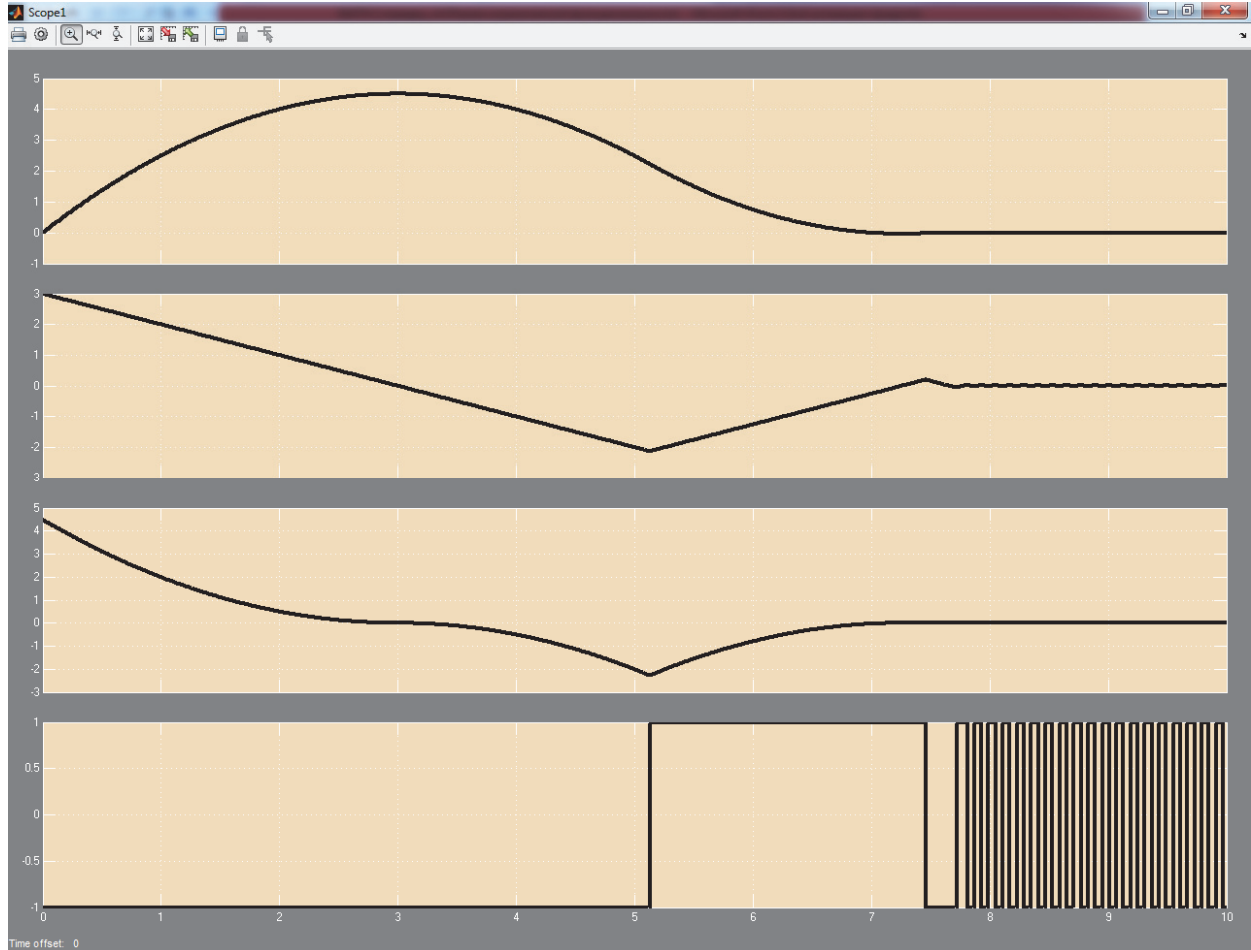


Рис. 4.9. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=0$, $\omega_0=3$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\varphi_d}(t)$.

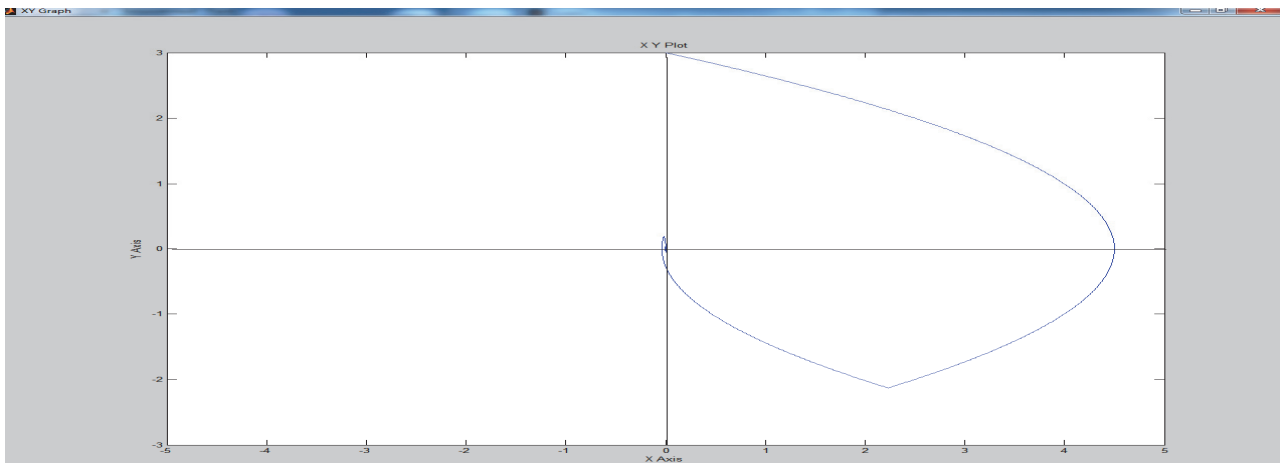


Рис. 4.10. Фазовий портрет оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=0$, $\omega_0=3$)

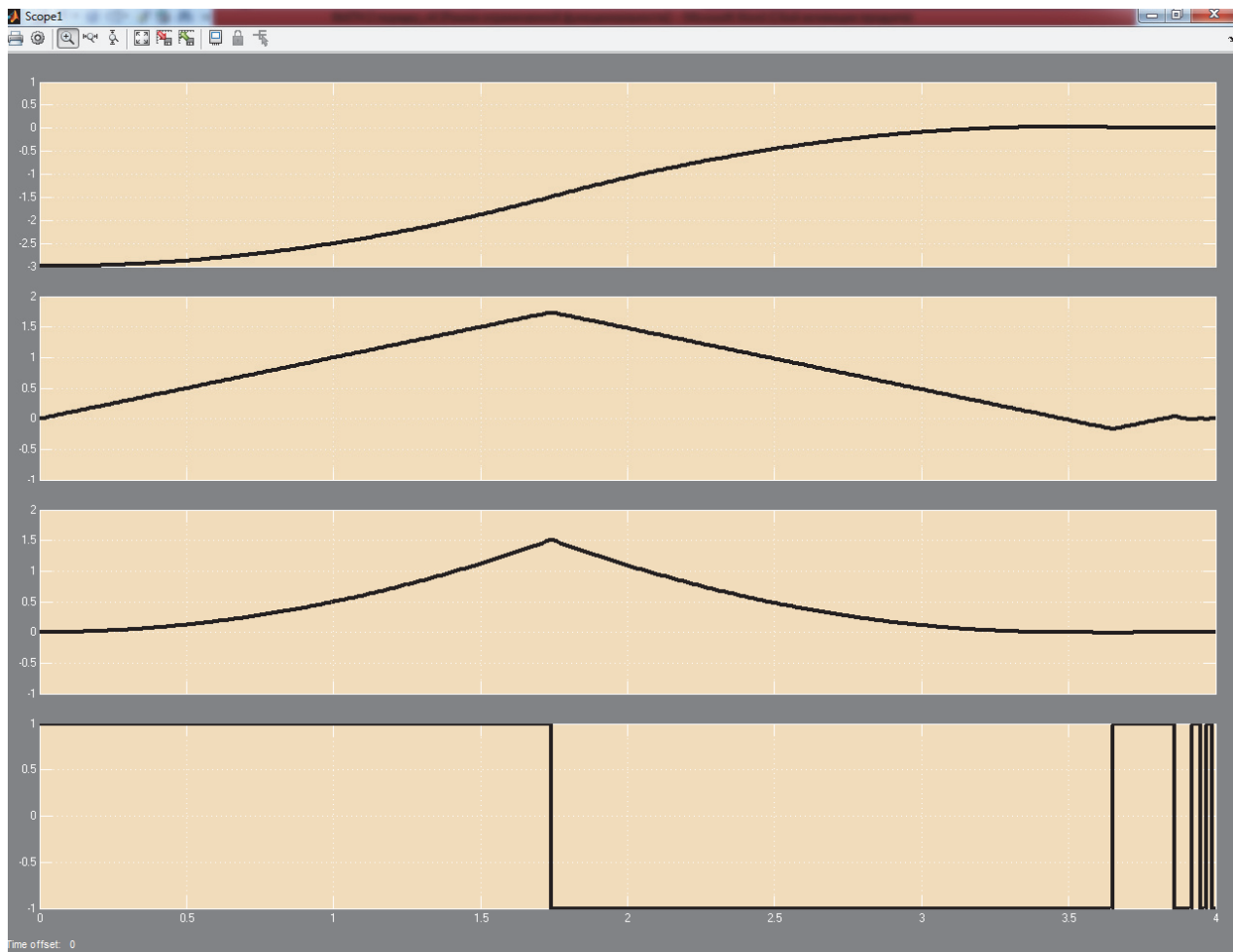


Рис. 4.11. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкодією ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=-3$, $\omega_0=0$)
 верхній графік - $\varphi_{ГКН}(t)$;
 другий графік зверху - $\omega_{ГКН}(t)$;
 третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;
 нижній графік - $u_{\varphi Д}(t)$.

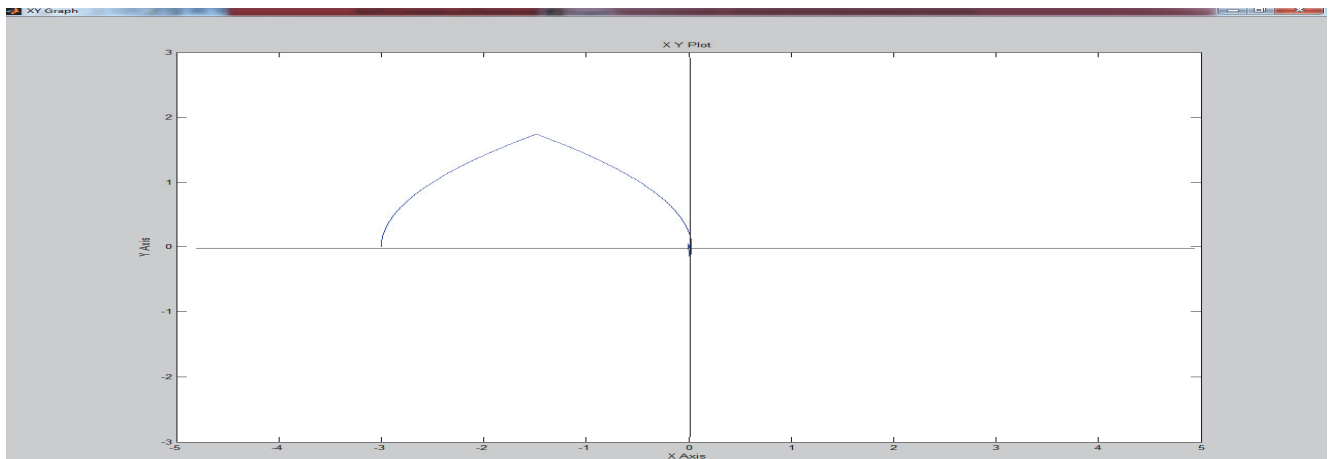


Рис. 4.12. Фазовий портрет оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0 = -3$, $\omega_0 = 0$)

Результати експериментальних досліджень оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ за різних початкових значень фазової похибки φ_0 та початкове частотного розлаштування ω_0 , наведено у Додатку Е.

Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ наочно демонструють стан протікання перехідних процесів, який відповідає визначеному закону оптимального керування (4.21) та відповідність числа переключень теоремі А.А. Фельдбаума про n -інтервалів [11]. Варто зауважити на те, що у режимі синхронізму напруга на виході ФД періодична за часом з постійним періодом, що обумовлений зоною нечутливості релейного елементу «Reley2». Зазначений факт також спостерігається на фазових портретах оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$.

Аналіз результатів імітаційного моделювання оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ підтверджує отримані аналітичні результати.

4.3. Аналітичне визначення вимог до параметрів ПФАПЧ АСК з інтегрувальною ланкою і періодичною характеристикою ФД для реалізації оптимальних за швидкістю перехідних процесів

Розглянемо випадок, коли період T_t керуючої дії $u_{\Phi Д}(t)$ в системі, що містить кільце ФАПЧ, не задано, тобто він є змінним $T_t = \text{var}$ [16-20]. Для цього випадку перехідні процеси в підсистемі ФАПЧ з інтегрувальною ланкою і характеристикою фазового детектора, яка визначається виразом $F[\varphi(t)] \cdot \text{sign } \varphi(t)$ з урахуванням обмежень $U_{\Phi Д \min} \leq U_{\Phi Д} \leq U_{\Phi Д \max}$, зображені на рис. 4.13.

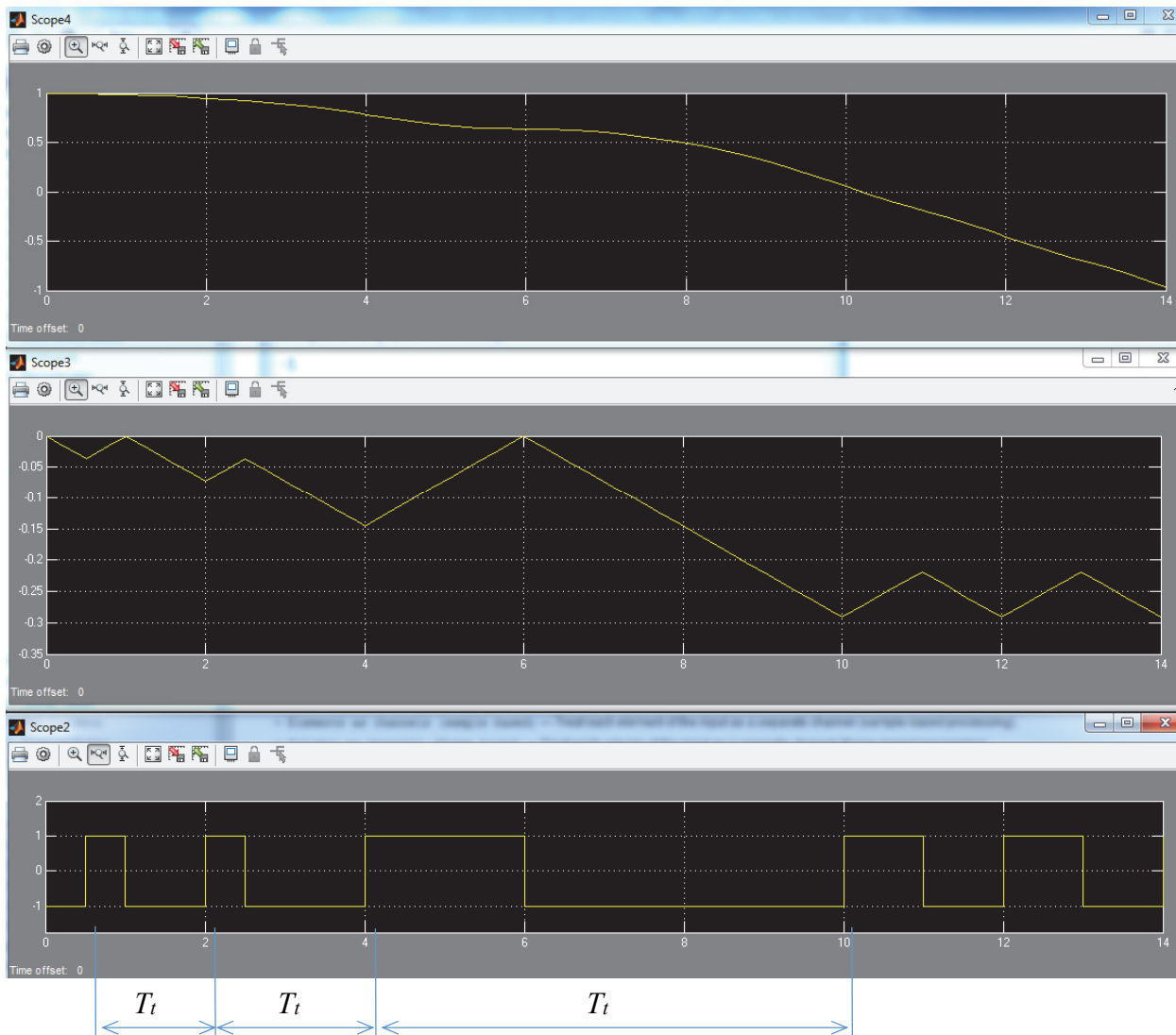


Рис. 4.13. Перехідні процеси в СФАПЧ з інтегрувальною ланкою для випадку, коли період T_t не заданий
 верхня осцилограма - різниця фаз $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$;
 середня осцилограма - різниця частот $\omega(t)$;
 нижня осцилограма - напруга на виході ФД $u_{\Phi Д}(t)$.

Як видно з наведеного рисунка напруга на виході ФД $u_{\text{ФД}}(t)$ є періодичною за часом функцією з періодом T_t . Причому в режимі входження в синхронізм період T_t є змінною величиною, що визначається рівнянням:

$$T_t(t) = \frac{2\pi}{\omega(t)}. \quad (4.23)$$

Також необхідно враховувати обмеження на параметри керуючої дії, які обумовлені реальними обмеженнями на форму характеристики ФД і аналітично сформульовані третім рівнянням та нерівностями підсистеми (4.2). Параметр керування в ПФАПЧ - напруга на виході ФД $u_{\text{ФД}}(t)$ є періодичною функцією різниці фаз $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$. Вказана періодичність є наслідком того, що ПФАПЧ має нескінчене лічене число станів стійкої рівноваги, яке визначається періодичністю різниці фаз:

$$\varphi(t) = \varphi(t) + nT_\varphi, \quad T_\varphi = 2\pi, \quad \forall \quad n = \overline{-\infty, +\infty}. \quad (4.24)$$

Похідною за часом різниці фаз є різниця частот:

$$\omega(t) = \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (4.25)$$

Отже, в реальній підсистемі ФАПЧ крім обмеження на амплітуду керуючої дії в динаміці має місце обмеження на часовий інтервал вказаної дії. Таке обмеження обумовлено періодом $T_t(t)$, який, згідно рівняння (4.25), є обернено-пропорційною величиною частоти $\omega(t)$ - похідної від різниці фаз.

В процесі автопідстроювання відбувається зміна частоти $\omega(t)$ і, згідно рівняння (4.23), відбувається відповідна зміна періоду $T_t(t)$. В динамічному режимі залежність періоду від часу призводить до необхідності розгляду процесу автопідстроювання, як квазіперіодичного процесу з динамічним періодом $T_t(t)$.

Параметр керування в ПФАПЧ - напруга на виході ФД $u_{\text{ФД}}(t)$ залежить від періоду $T_t(t)$, який може впливати на процес автопідстроювання. З метою встановлення можливості такого впливу і його наслідків постає задача в проведенні аналітичного дослідження впливу періоду $T_t(t)$ на перехідні процеси в

оптимальний за швидкодією ПФАПЧ АСК з інтегрувальною ланкою.

Як було показано вище, для того щоб підсистема ФАПЧ другого порядку була оптимальна за швидкодією необхідно формувати характеристику ФД на час протікання перехідних процесів. При цьому зміна знаку керуючої дії на інтервалі оптимального керування відбувається не більше одного разу, що відповідає теоремі А.А. Фельдбаум про n -інтервалів [11], згідно з якою кількість перемикань оптимального керування не може перевищувати одного. Однак, умова $\Theta_{opt} < T_t(t)$ для підсистем ФАПЧ другого порядку не завжди виконується.

Це впливає з порівняння значень Θ_{opt} і $T_t(t)$, які визначаються відповідно з формул (4.19) і (4.23). Тривалість оптимального за швидкодією перехідного процесу визначається параметрами підсистеми та початковими значеннями фазової похибки φ_0 і частотного розлаштування ω_0 .

У разі, коли $\Theta_{opt} > T_t(t)$, то в ПФАПЧ АСК другого порядку може відбуватися зміна знаку (кількість перемикань) керуючої дії більше одного разу на інтервалі оптимального керування.

Це положення ілюструє фазовий портрет оптимальної за швидкодією ПФАПЧ АСК з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = const$, що наведений на рис. 4.14. Припустимо, що відображаюча точка **A** у на фазовій площині (φ, ω) відповідає початковим значенням фазової похибки φ_0 і частотного розлаштування ω_0 . З рис. 4.14 є очевидним, що у разі, коли період T_φ не був би заданим, то фазова траєкторія мала би проходити через точки **ABBGD** і стійка рівновага відповідала величині фазової похибки $\varphi_0 = 2\pi$.

Натомість, з урахуванням умови $T_\varphi = const$, відображаюча точка **A** на фазовій площині (φ, ω) має траєкторію, що проходить через точки **ABEO** 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 **B** і точка **E**, рис.4.14), тобто більше одного разу, що не відповідає теоремі А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

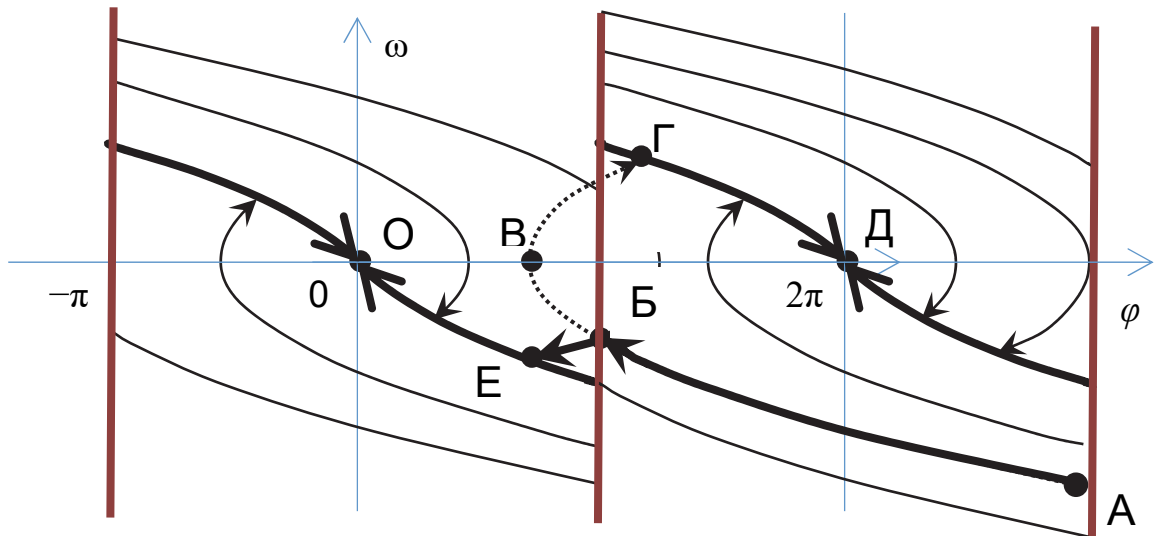


Рис. 4.14. Сімейство фазових траєкторій ПФАПЧ АСК з інтегровальною ланкою та періодичною характеристикою ФД

Визначимо умови, за яких в підсистемі ФАПЧ з інтегровальною ланкою та періодичною характеристикою ФД ($T_\varphi = \text{const}$) оптимальні за швидкодією перехідні процеси закінчуються не більше ніж за два інтервали постійності керуючої дії. Тобто умови за яких справедлива теорема А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

Вихідними даними для визначення зазначених умов є тривалість всього оптимального перехідного процесу Θ_{opt} , що визначається рівнянням (4.19), динамічний період керуючої дії $T_t(t)$, що визначається рівнянням (4.23) та умова дотримання між ними співвідношення

$$\Theta_{opt} < T_t(t), \quad (4.26)$$

за якого в ПФАПЧ є справедливою теорема А.А. Фельдбаум про n -інтервалів.

Запишемо рівняння (4.19) з урахуванням значень тривалості інтервалів оптимальних перехідних процесів:

$$\Theta_{omt} = \left| \frac{1}{K_1 U_{\Phi\text{Декстр}_{-1}}} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| -\frac{1}{K_1 U_{\Phi\text{Декстр}_{-2}}} \omega_1 \right|. \quad (4.27)$$

Покладемо $|U_{\Phi\text{Декстр}_{-1}}| = |U_{\Phi\text{Декстр}_{-2}}| = U_{\Phi\text{Декстр}}$, що часто має місце у багатьох випадках практичної реалізації фазових дискримінаторів систем ФАПЧ. Перепишемо рівняння (4.27) з урахуванням зробленого припущення і введеного позначення в системі рівнянь (4.2):

$$\Theta_{omt} = \left| -\frac{T_\phi}{S_{KE} U_{\Phi\text{Декстр}}} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_\phi}{S_{KE} U_{\Phi\text{Декстр}}} \omega_1 \right|. \quad (4.28)$$

Введемо позначення $\Omega_K = S_{KE} \cdot U_{\Phi\text{Декстр}}$ і отримаємо:

$$\Theta_{omt} = \left| -\frac{T_\phi}{\Omega_K} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_\phi}{\Omega_K} \omega_1 \right|. \quad (4.29)$$

Враховуючи те, що $\omega(t) = \frac{2\pi}{T_i(t)}$ можна записати співвідношення (4.26) у вигляді:

$$\left| -\frac{T_\phi}{\Omega_K} (\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_\phi}{\Omega_K} \omega_1 \right| < \frac{2\pi}{\omega(t)}. \quad (4.30)$$

Отже, в ПФАПЧ АСК другого порядку з інтегрувальною ланкою періодичність характеристики ФД за фазовою координатою, у разі $T_\phi = const$, не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів, за умови виконання нерівності (4.30). В цьому випадку оптимальні за швидкодією перехідні процеси закінчуються 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.

4.4. Синтез оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою

Підвищення стабільності й точності частоти генератора опорного сигналу АСК, за умови мінімізації тривалості перехідних процесів, забезпечується за рахунок ієрархічної структури ПФАПЧ та реалізації оптимальних і адаптивних алгоритмів керування [1-5, 16-20], завдяки використанню розробленого оригінального адаптивного цифрового фазового дискримінатора [21].

На основі теорії оптимального керування за швидкодією систем синхронізації, яка достатньо апробована і знайшла широке застосування [6-8, 13-15, 22-26], що ґрунтується на принципі максимуму Л.С. Понтрягіна виконаємо синтез оптимальної за швидкодією системи з ФНЧ (пропорційно-інтегрувальною ланкою) ПФАПЧ АСК. Схема фільтру побудована на основі RC ланки для якої можна записати наступне рівняння для передатної функції ФНЧ в операторній формі:

$$K(p) = \frac{1 + mT_{\phi}p}{1 + T_{\phi}p}, \quad (4.31)$$

де $T_{\phi} = (R_1 + R_2) \cdot C$;

$$m = \frac{R_2}{R_1 + R_2}.$$

Принципова схема фільтру низьких частот, що відповідає передатній функції в операторній формі (4.31) і яка реалізована з використанням конденсатора, резисторів і операційного підсилювача наведена на рис. 4.15.

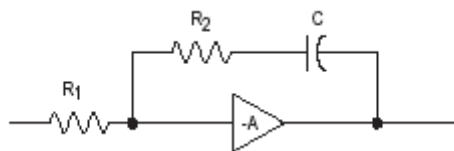


Рис. 4.15. Принципова схема пропорційно-інтегрувального ФНЧ

A – операційний підсилювач.

Покладемо далі, що керування частотою генератора є безінерційним. Тоді перше рівняння (3.1), за умови використання в якості ФНЧ пропорційно-інтегральної ланки, що описується рівнянням (4.31), для випадку коли початкове розлаштування ГКН відносно ПГ є постійним ($\Omega_{II} = const$), буде описуватиметься наступним диференціальним рівнянням [15]:

$$T_{\phi} \frac{d^2 \varphi(t)}{dt^2} + \frac{d\varphi(t)}{dt} = K_1 m T_{\phi} \frac{du_{\phi D}(t)}{dt} + K_1 u_{\phi D}(t), \quad (4.32)$$

де $K_1 = -S_{KE} K_{KG}(t) / T_{\phi}$. У разі коли коефіцієнт передачі кварцового генератора $K_{KG} = 1$, то коефіцієнт K_1 визначається рівнянням $K_1 = -S_{KE} / T_{\phi}$.

Введемо наступні позначення (заміна змінних)

$$\varphi(t) = z_1, \quad \frac{d\varphi(t)}{dt} = z_2. \quad (4.33)$$

З урахуванням нових змінних рівняння (4.32) можна записати у формі Коші у вигляді наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} T_{\phi} \frac{dz_1(t)}{dt} = z_2(t) + K_1 m T_{\phi} u_{\phi D}(t); \\ \frac{dz_2(t)}{dt} = -\frac{1}{T_{\phi}} z_2(t) + K_1 (1-m) u_{\phi D}(t). \end{cases} \quad (4.34)$$

Застосуємо принцип максимуму акад. Л.С. Понтрягіна до системи рівнянь (4.34) з використанням відомих аналітичних підходів [10, 15] отримаємо рівняння для функції Гамільтона

$$H = \psi_1 [z_2(t) - K_1 T_{\phi} u_{\phi D}(t)] + \psi_2 \left[K_1 u_{\phi D}(t) (1-m) - \frac{1}{T_{\phi}} z_2 \right]^{-1} \quad (4.35)$$

та допоміжних змінних ψ_1 та ψ_2

$$\begin{cases} \frac{d\psi_1}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial z_1} = 0, \\ \frac{d\psi_2}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial z_2} = -\psi_1 + \frac{1}{T_{\phi}} \psi_2. \end{cases} \quad (4.36)$$

Аналогічно для допоміжних змінних ψ_1, ψ_2 вектор-функції ψ маємо наступну систему рівнянь

$$\begin{cases} \psi_1 = \psi_{10} = const, \\ \psi_2 = T_\phi \psi_{10} \left(1 - e^{-\frac{t}{T_\phi}} \right) + \psi_2 e^{-\frac{t}{T_\phi}}. \end{cases} \quad (4.37)$$

Рівняння для визначення фазових траєкторій може бути представлено у наступному виді:

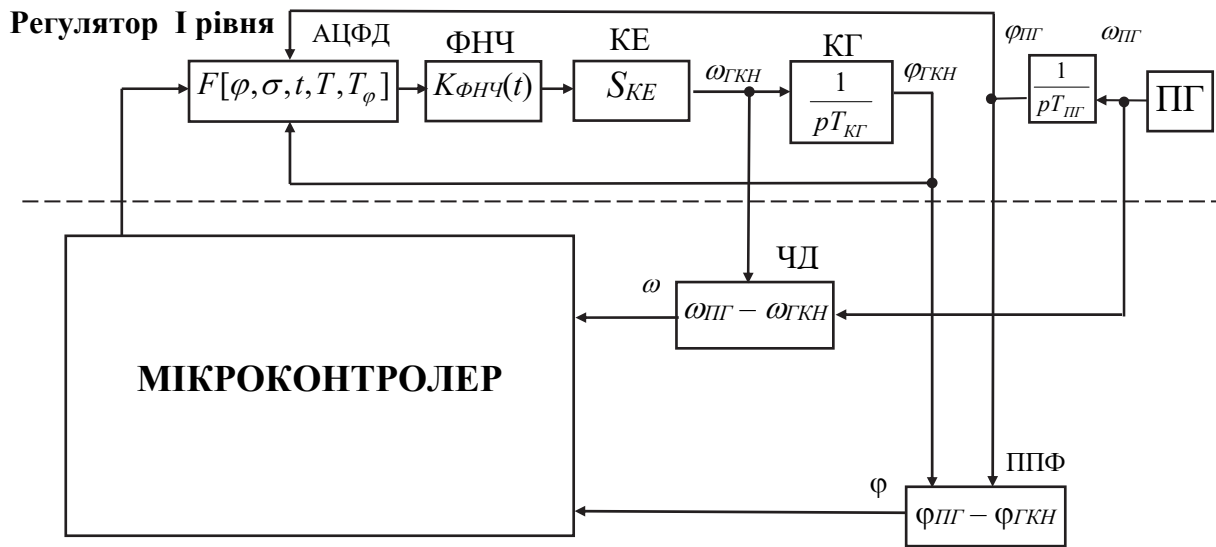
$$z_1(t) = z_2(t) - K_1 T_\phi U_{\phi_{Декстр}} \left| -z_2 + K_1 T_\phi U_{\phi_{Декстр}} (1 - m) \right| + c, \quad (4.38)$$

де c – постійна, що визначається з початкових умов, котрі відповідають оптимальним фазовим траєкторіям у ПФАПЧ АСК.

Для відповідного забезпечення руху відображаючої точки по оптимальним фазовим траєкторіям повинен бути сформований на виході адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД) [21] наступний сигнал керуючої дії:

$$u_{\phi_{Д}}(t) = U_{\phi_{Декстр}} \operatorname{sign} \left[K_1 T_\phi \psi_1 + K_1 (1 - m) (\psi_2 - T_\phi \psi_1) e^{-\frac{t}{T_\phi}} \right]. \quad (4.39)$$

Зміна характеристики АЦФД забезпечується завдяки обчисленням за алгоритмом, що визначається аналітичним виразом у квадратних дужках рівняння (4.39). Зазначені обчислення реалізуються вбудованим мікроконтролером, який показано на структурній схемі оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ АСК з пропорційно-інтегровальною ланкою і дворівневим ієрархічним регулятором (рис. 4.16). В синтезованій оптимальній за швидкодією підсистемі ФАПЧ з АЦФД на основі принципу максимуму реалізуються екстремальні періодичні керуючі дії, що максимізують функцію Гамільтона. Формування оптимальних алгоритмів керування за допомогою мікроконтролера і АЦФД перетворює ПФАПЧ в дворівневу ієрархічну систему [27, 28] з регулятором I-го рівня (підсистема з класичною знакозмінною характеристикою ФД) і регулятором II-го рівня (АЦФД, структура якого знайдена в результаті рішення задачі синтезу й обчислювальний пристрій, у даному випадку мікроконтролер, що розраховує оптимальне керування).



Регулятор II рівня (кусково-періодичне керування)

Рис. 4.16. Підсистема ФАПЧ АСК з дворівневим ієрархічним регулятором

АЦФД – адаптивний цифровий фазовий дискримінатор;

ФНЧ – фільтр нижніх частот;

КЕ – керуючий елемент;

КГ – кварцовий генератор, що керується напругою;

ЧД – частотний дискримінатор;

ППФ – пристрій порівняння фаз;

ПГ – провідний генератор.

4.5. Основні результати та висновки до розділу 4

Виконана оптимізація за швидкодією ПФАПЧ опорного генератора АСК з інтегрувальною та пропорційно-інтегрувальною ланкою. Набув подальшого розвитку метод синтезу оптимальних за швидкодією систем фазового автопідстроювання частоти. Розроблено і досліджено математичну модель оптимальної за швидкодією ПФАПЧ опорного генератора ієрархічної структури.

За результатами проведених досліджень можна сформулювати наступні висновки.

1. Здійснено оптимізацію за швидкодією ПФАПЧ АСК другого порядку з інтегрувальною ланкою. Виконано аналітичне визначення руху відображаючої точки у фазовому просторі та обчислено координати точки перемикання. Знайдено тривалість інтервалів оптимальних перехідних процесів, на основі яких

розраховано тривалість всього оптимального перехідного процесу.

2. Аналітично визначено граничні умови, за яких періодичність характеристики ФД за фазовою координатою в ПФАПЧ з інтегровальною ланкою не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і виконуються умови теореми А.А. Фельдбаума про n -інтервалів.

3. Виконана оптимізація за швидкодією та синтез структури ПФАПЧ другого порядку АСК з пропорційно-інтегруючим фільтром і АЦФД. Виконано аналітичне визначення руху відображаючої точки у фазовому просторі ПФАПЧ та обчислено координати точки перемикання.

4. Розроблена структурна схема оптимальної ПФАПЧ з пропорційно-інтегруючим фільтром, до складу якої включено мікроконтролер та АЦФД, що забезпечують реалізацію дворівневої ієрархічної системи керування: регулятор I-го рівня – підсистема з класичною знакозмінною характеристикою ФД; регулятор II-го рівня – АЦФД та мікроконтролер.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Dmytro Kalian. Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences, Number 1(2018), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.11-18. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/136460>

2. Кальян Д.О., Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецький. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540>

3. Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій: Звіт про НДР за державним замовленням / НУБіП України; Номер державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

4. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.

5. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с.

6. Борщ В.И. Исследование оптимальной САР. Анализ и синтез автоматической системы второго порядка, оптимальной по быстродействию. - Одесса: Изд-во ОЭИС им. А.С. Попова, 1974. - 16 с.

7. Тактовая синхронизация в интегральных цифровых сетях электросвязи / В.И. Борщ, В.П. Гайдар, В.В. Коваль, И.П. Лесовой. – К.: Наукова думка, 1998. – 202 с.

8. Гамкрелидзе Р.В. Оптимальные по быстродействию процессы при ограниченных фазовых координатах. - Докл. АН СССР, т.125, 1959, №3, - С.475-478.

9. Головінський Б.Л. Теорія автоматичного управління : навч. посіб. / Б.Л. Головінський, Ю.В. Шуруб, В.П. Лисенко. – К. : Вид. Центр НУБіП України, 2012. – 233 с.

10. Иванов В.А., Фалдин Н.В. Теория оптимальных систем автоматического управления. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 336 с.

11. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. Изд. 2, испр. и доп. М.: Наука, 1966. – 624 с.

12. Фельдбаум А.А., Бутковский А.Г. Методы теории автоматического управления. М.: Наука, 1971. – 743 с.

13. Павлов А.А. Синтез релейных систем, оптимальных по быстродействию (метод фазового пространства). - М.: Наука, 1966.

14. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой автоподстройки частоты. М.: Связь, 1972.

15. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой синхронизации с

елементами дискретизації. М.: Радио и связь, 1989. - 320 с.

16. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, О.В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с.

17. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Кальян Д.О., Коваль В.В. мол. Комп'ютерне моделювання та статистична оптимізація пристроїв синхронізації з адаптивними властивостями / Тези доповідей VII Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», 21-22 квітня 2016 р. Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2016 – С.98-100.

18. Koval Valerii, Dorogobed Veronica, Kalian Dmytro, Khudyntsev Mykola, Koval Viktor. Optimizing dynamic of synchronization system with phase-locked loop for infocommunication networks // Abstracts XXVIII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 25-30 серпня 2016: Брно, Чехія, – 2016. - С.65.

19. 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

20. Valerii Koval, Dmytro Kalian, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov, Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - pp.269-276.

21. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 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.

22. Петрищев В.И. Вопросы повышения эффективности работы систем фазовой автоподстройки частоты: Дис.... канд. техн. наук. - Москва, 1969.

23. Титенко В.Ф. Повышение быстродействия устройств фазовой автоподстройки частоты: Дис.... канд. техн. наук. - Одесса, 1983.

24. Виктор Олугбемига Сево. Оптимизация управления объектами с периодическими по управляемой величине управляющими воздействиями: Дис.... канд. техн. наук. - Одесса, 1996.

25. Иерархические формирователи сетки частот сетей телекоммуникаций / Борщ В.И., Донец В.А., Коваль В.В., Михайлов Н.К., Туманов Ю.Г. / Под ред. акад. Академии связи Украины, д-ра техн. наук, проф. В.И. Борща. – К.: Наукова думка, 2001. – 212 с.

26. Костік Б.Я. Теорія та практика оптимальних за швидкодією управліннь веденими пристроями синхронізації телекомунікаційних мереж з фазовим автопідстроюванням частоти: Дисс. ... докт. техн. наук. – К., 2005. - 266с.

27. Dmytro Kalian. Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences, Number 1(2018), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.11-18. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/136460>

28. Кальян Д.О., Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецкий. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540>

РОЗДІЛ 5

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ В УМОВАХ БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ВИРОБНИЦТВА

З метою перевірки робочих характеристик АСК показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів, яка створена на основі результатів теоретичних досліджень та розроблених алгоритмів і програмного забезпечення, а також запропонованих схемотехнічних рішень побудови блока первинних перетворювачів контрольованих сигналів з ієрархічною підсистемою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора БПП «TIMETER» було проведено комплекс експериментальних досліджень [1-16].

Для проведення експериментальних досліджень в лабораторних умовах та в умовах багатомоделювального виробництва розроблено лабораторний стенд автоматизованої системи контролю, до складу якого входять лабораторний зразок блоку БПП «TIMETER» і програмне забезпечення P4000winXP [1-16]. Проведення досліджень лабораторного стенду виконувалось в проблемній науково-дослідній лабораторії «Інтелектуальні управляючі системи в АПК» кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І.Мартиненка (ауд.141, корп.11, НУБіП України) та в лабораторії Товариства з обмеженою відповідальністю “Інформаційні сервісні технології ” (м. Київ, вул. Марини Раскової, 15). Експериментальні дослідження виконано згідно розроблених методик, структурних та функціональних схем вимірювань [1-16].

Розроблений лабораторний стенд АСК у разі його комплектування вимірювальними засобами також дає можливість виконувати експериментальні дослідження лабораторних зразків блоків первинного перетворювача БПП «TIMETER». Враховуючи зазначене спочатку розглянемо питання технічного розроблення блока первинного перетворювача БПП «TIMETER».

5.1. Розроблення та виготовлення лабораторного зразка блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» з синтезованою оптимальною за швидкістю ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК

Блок первинного перетворювача БПП «TIMETER» побудований з використанням системи фазового автопідстроювання частоти генератора, що керується напругою, яка формується цифро-аналоговим перетворювачем (ЦАП). Цифрові сигнали, що поступають на входи ЦАП, формуються мікроконтролером згідно розроблених алгоритмів керування. Перевагою такої системи є те, що в процесі її функціонування виконується автоматичне підстроювання частоти керованого генератора під частоту провідного (еталонного) генератора. В результаті автопідстроювання різниця частот і фаз сигналів, які синхронізуються, стає близькою до нуля та може зберігатися певний час при відключенні синхронізуючого сигналу ПГ. Важливим є те, що використання цифрових технологій забезпечує можливість "зберігання" значення частоти і фази у випадку відсутності синхронізуючого сигналу. У цьому разі розходження фаз (частот) ПГ та генератора, що керується напругою буде обумовлено, в основному, випадковою компонентою нестабільності генераторів. Отже, принциповою складовою частиною ПФАПЧ АСК є мікроконтролер, цифро-аналоговий перетворювач та високостабільний термостатований кварцовий генератор, що керується напругою від ЦАП.

Конкретизуємо назви основних дискретних електронних компонентів лабораторного зразку блоку первинного перетворювача БПП «TIMETER»: високостабільний термостатований кварцовий генератор (MXOCS), що керується напругою сформованою ЦАП; мікроконтролер LPC2378FBD144; програмовані логічні інтегральні схеми ПЛІС Altera EPM7128SLC84 та двадцятирозрядний ЦАП DAC1220 фірми BURR-BROWN [11].

Мікроконтролер, після завантаження з асинхронного цифрового фазового дискримінатора АЦФД [17] кодової комбінації про величину кута зсуву фази двох взаємно незалежних періодичних імпульсних послідовностей та її цифрової обробки за встановленим алгоритмом, транслює код на ЦАП. Двадцятирозрядний

ЦАП здійснює перетворення коду в напругу, яка керує частотою кварцового генератора.

Кодові комбінації з АЦФД, які представляють собою результат вимірювання величини кута зсуву фази двох періодичних імпульсних послідовностей, що контролюються, оброблюються в мікроконтролері, а потім через інтерфейс Ethernet надсилаються в IP-мережу.

Розроблено та апробовано принципові електронні схеми лабораторних зразків блоку первинного перетворювача БПП «TIMETER» з синтезованою оптимальною за швидкодією ПФАПЧ та опорним кварцовим генератором (MXOCS), що керується напругою.

Приклад виготовленої плати інтерфейсів БПП «TIMETER» АСК з підключеним послідовним інтерфейсом RS-232 (Local) та інтерфейсом мережі Ethernet RJ-45 наведено на рис. 5.1 [10-16].

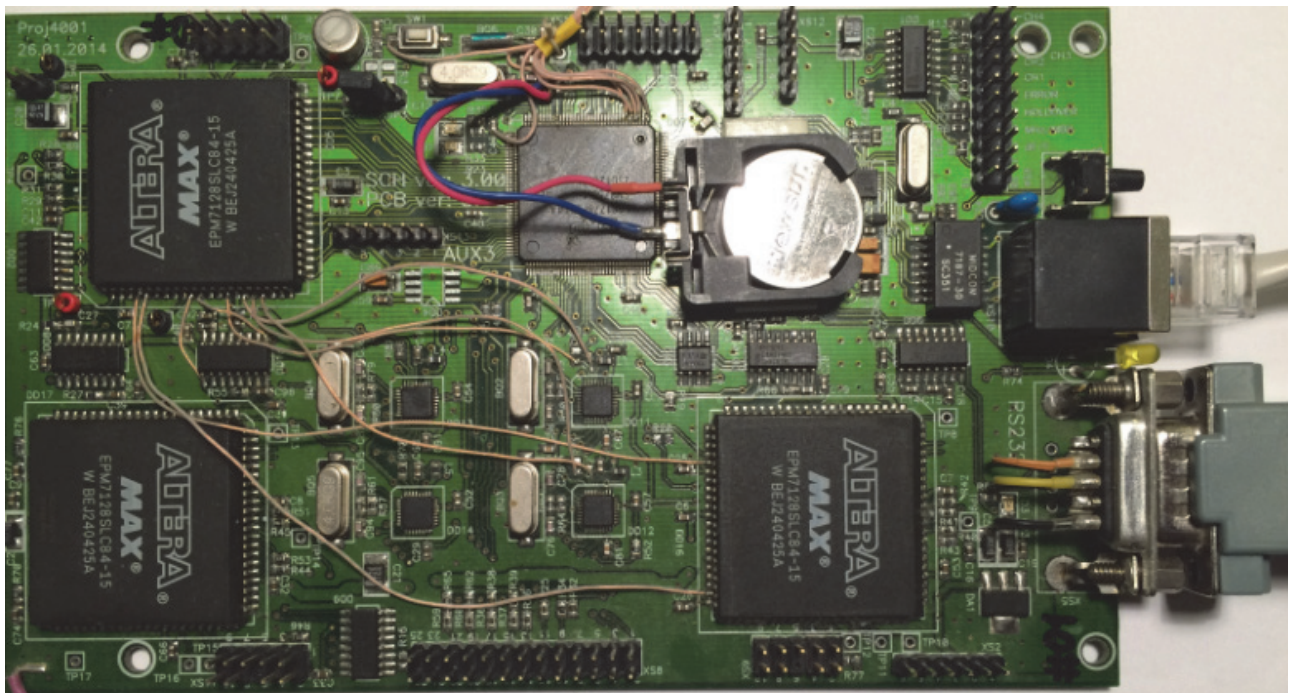


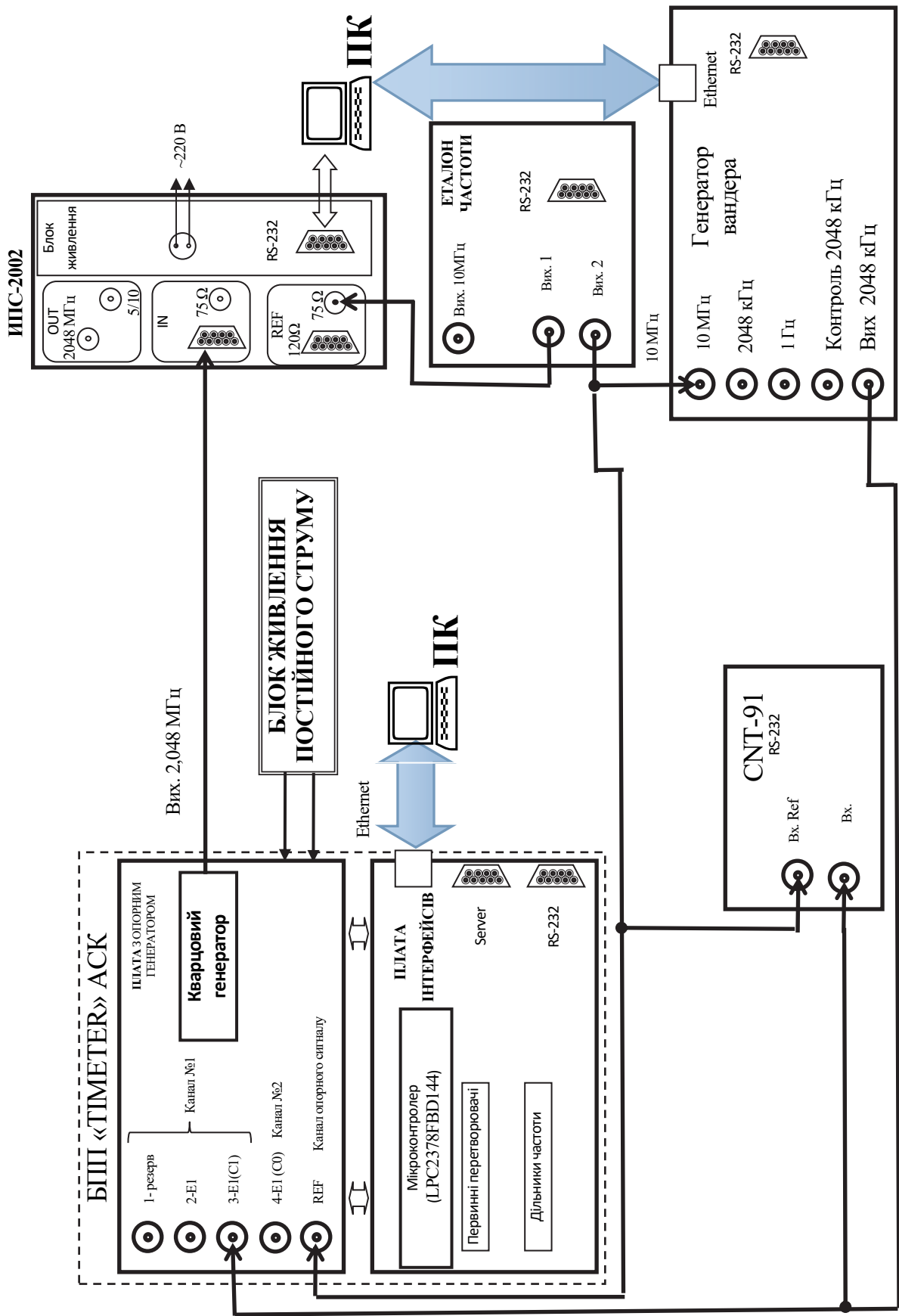
Рис. 5.1. Плата інтерфейсів БПП «TIMETER» АСК

5.2. Експериментальні дослідження точності формування опорного сигналу АСК ПФАПЧ, що синхронізується від еталона частоти

Проведення дослідження ПФАПЧ генератора опорного сигналу БПП «TIMETER» АСК виконувалось згідно розробленої методики та схеми вимірювань (рис. 5.2) з використанням прецизійного вимірювача параметрів синхронізації ИПС-2002, яку наведено на рис. 5.1 [1-16].

Метою експериментальних досліджень є визначення технічних характеристик виготовленого БПП «TIMETER» з ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК. Об'єктом досліджень є розроблена та синтезована на основі результатів теоретичних досліджень ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК, яка входить до складу лабораторного зразка блоку БПП «TIMETER». Завданням досліджень є проведення короткотривалих вимірів параметрів вихідного синхросигналу (частота 2,048 МГц) лабораторного зразка блоку БПП «TIMETER» АСК, статистична обробка та верифікація результатів вимірів. Параметрами, що вимірюються та аналізуються є характеристики синхросигналів, а саме відхилення часового інтервалу ВЧІ (TIE), максимальне відхилення часового інтервалу МВЧІ (MTIE), дисперсія Алана (ADEV), модифікована дисперсія Алана (MDEV), середньоквадратична помилка часового інтервалу (TIE Rms), які визначені згідно міжнародних Рекомендацій ITU-T G.810 та G.823 [18, 19].

Результати короткотривалих вимірів ВЧІ (TIE) вихідного синхросигналу опорного генератора блоку первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти, наведено на рис. 5.3, а значення максимального відхилення часового інтервалу МВЧІ (MTIE), девіації часового інтервалу ДЧІ (TDEV), дисперсії Алана (ADEV), модифікованої дисперсії Алана (MDEV), середньоквадратичної помилки часового інтервалу (TIE Rms), які отримано в результаті обробки даних зазначених вимірів, наведено відповідно на рис. 5.4 - рис. 5.8. Порівняльний аналіз отриманих результатів з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4 вказує на виконання зазначених норм з значним запасом.



ПК – персональний комп'ютер Samsung (ноутбук).

Рис. 5.2. Схема короткотривалих вимірювань вихідного синхросигналу генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПШ «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти

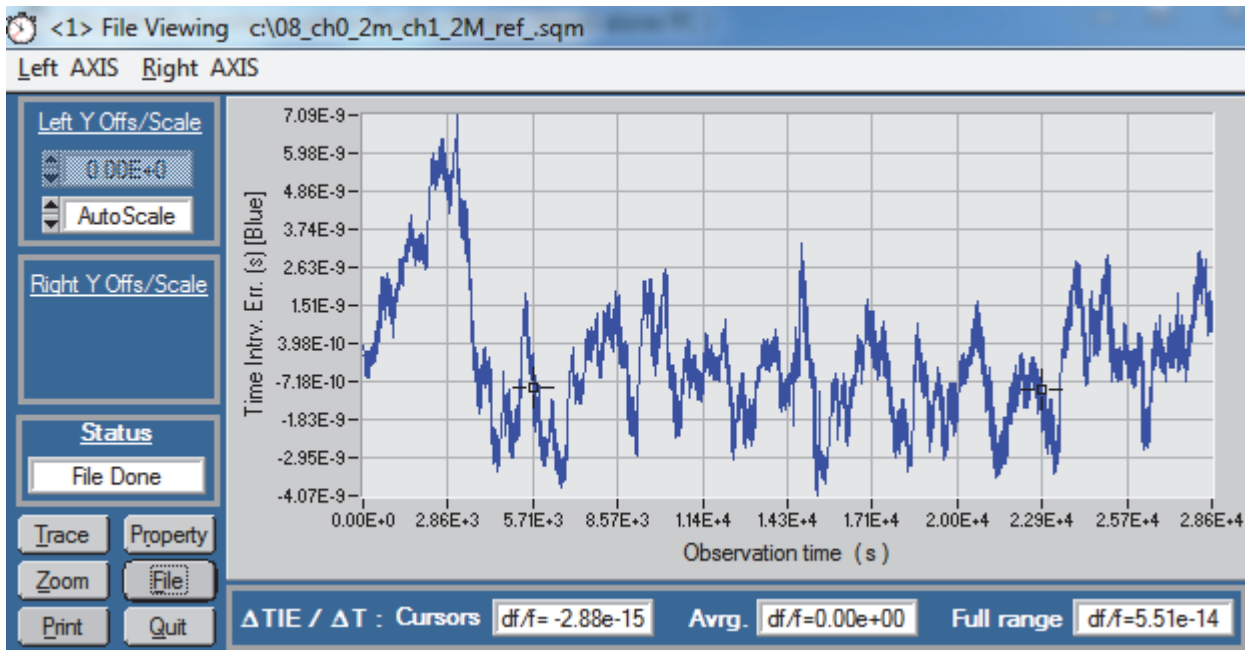


Рис. 5.3. Результати вимірів ВЧІ (ТІЕ) вихідного синхросигналу опорного генератора блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти

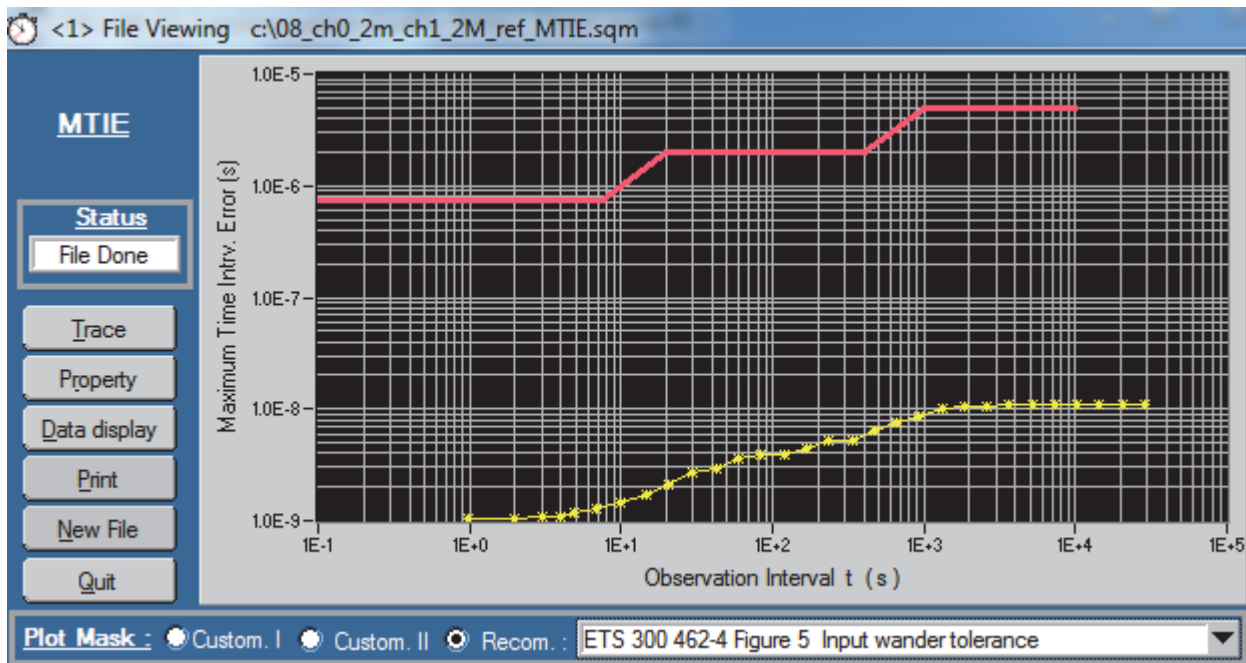


Рис. 5.4. Залежність від часу максимального відхилення часового інтервалу МВЧІ (МТІЕ) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти та її порівняння з нормами європейського стандарту ETS 300 462-4

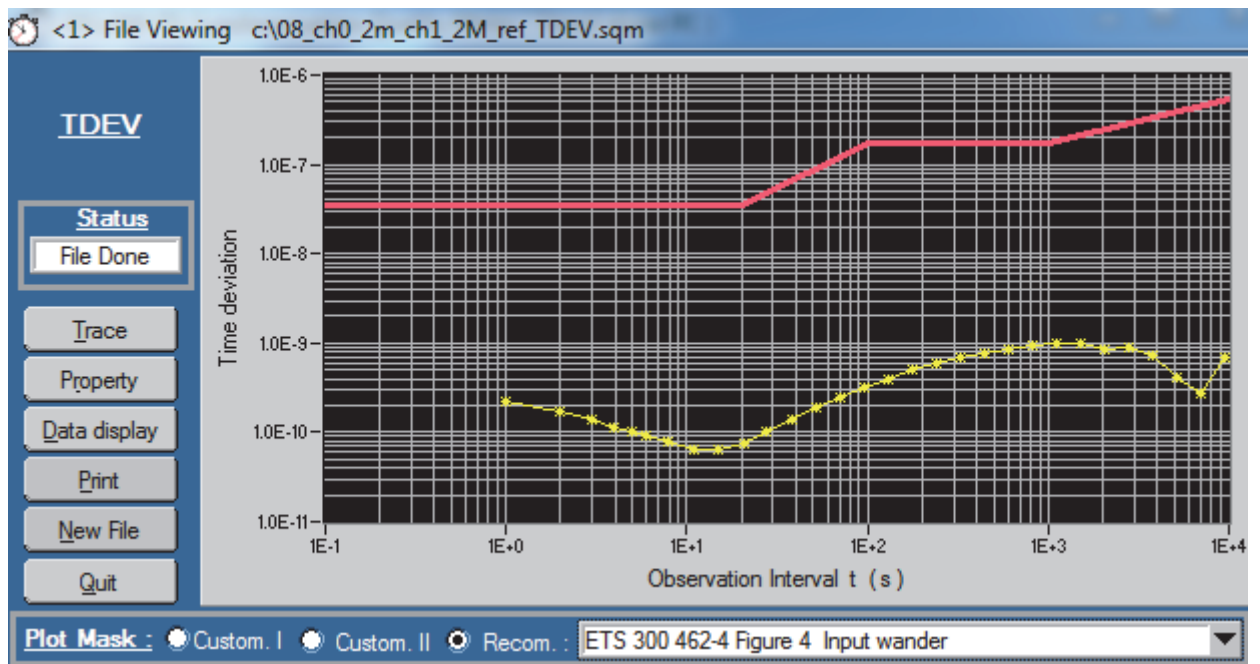


Рис. 5.5. Залежність від часу девіації часового інтервалу ДЧІ (TDEV) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти та її порівняння з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4

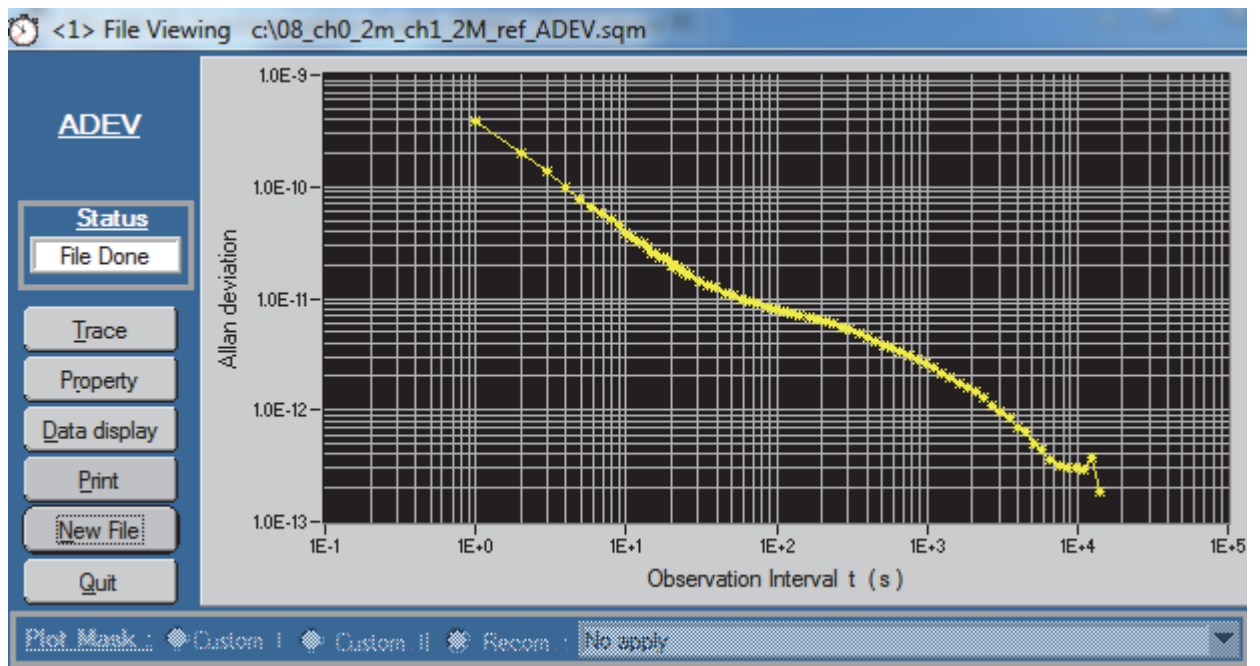


Рис. 5.6. Залежність від часу девіації Алана (ADEV) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти

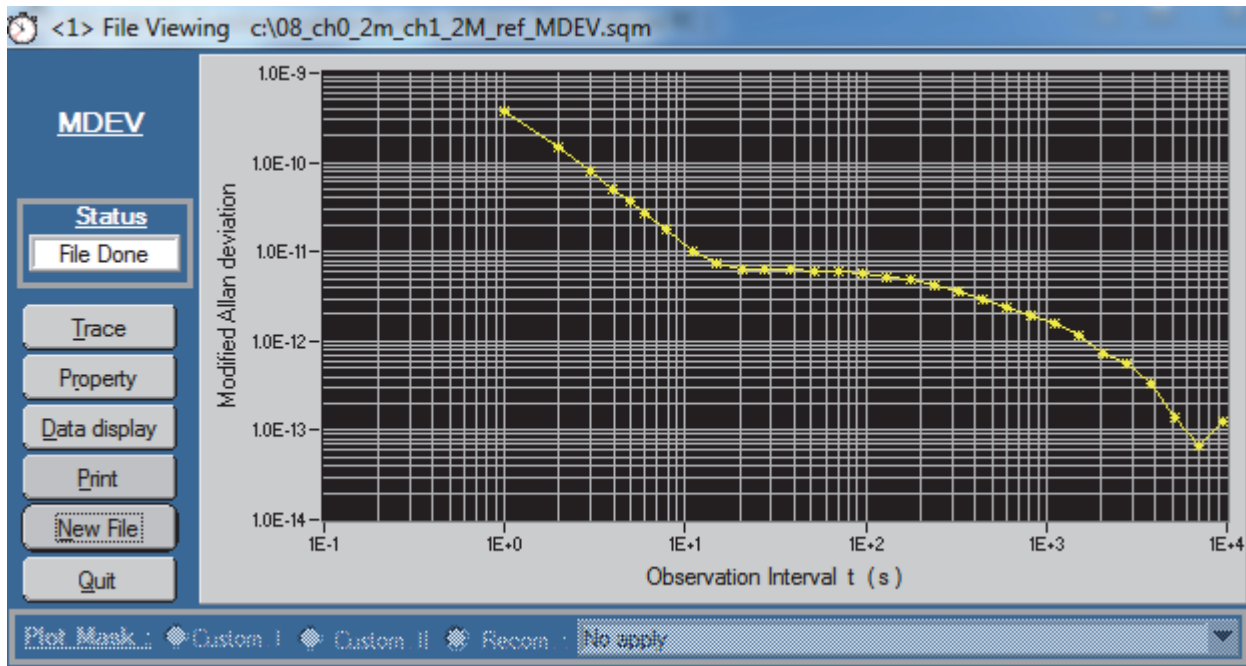


Рис. 5.7. Залежність від часу модифікованої девіації Алана (MDEV) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти

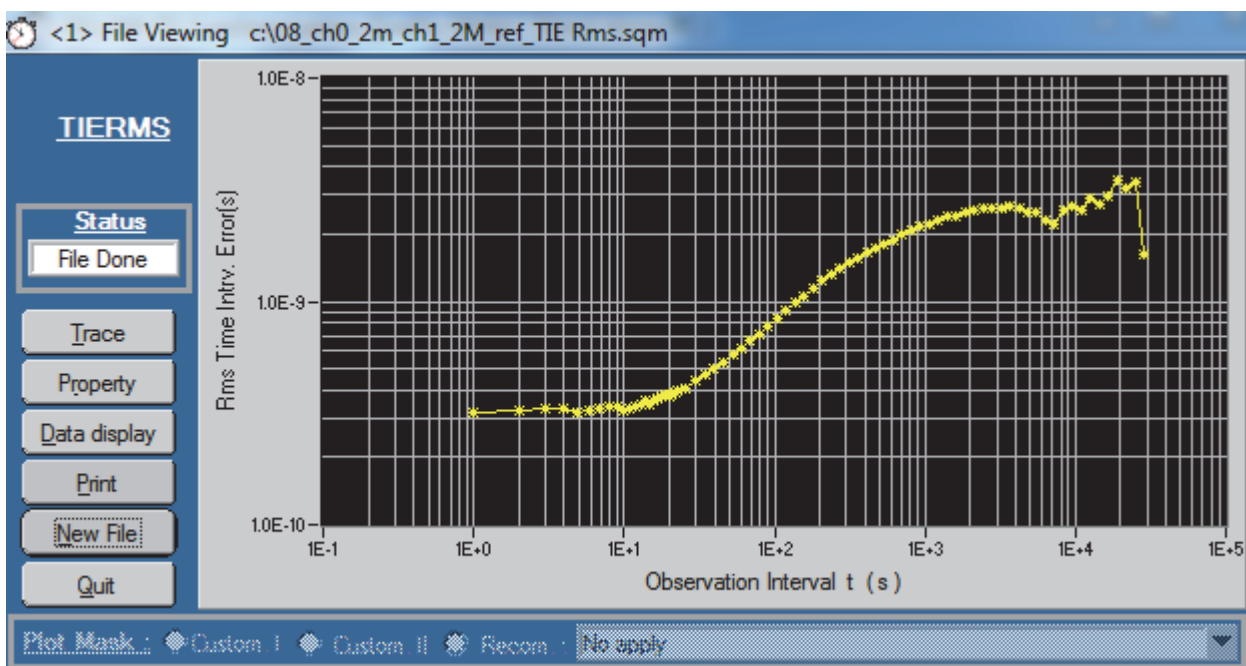


Рис. 5.8. Залежність від часу середньоквадратичної помилки часового інтервалу (TIE Rms) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти

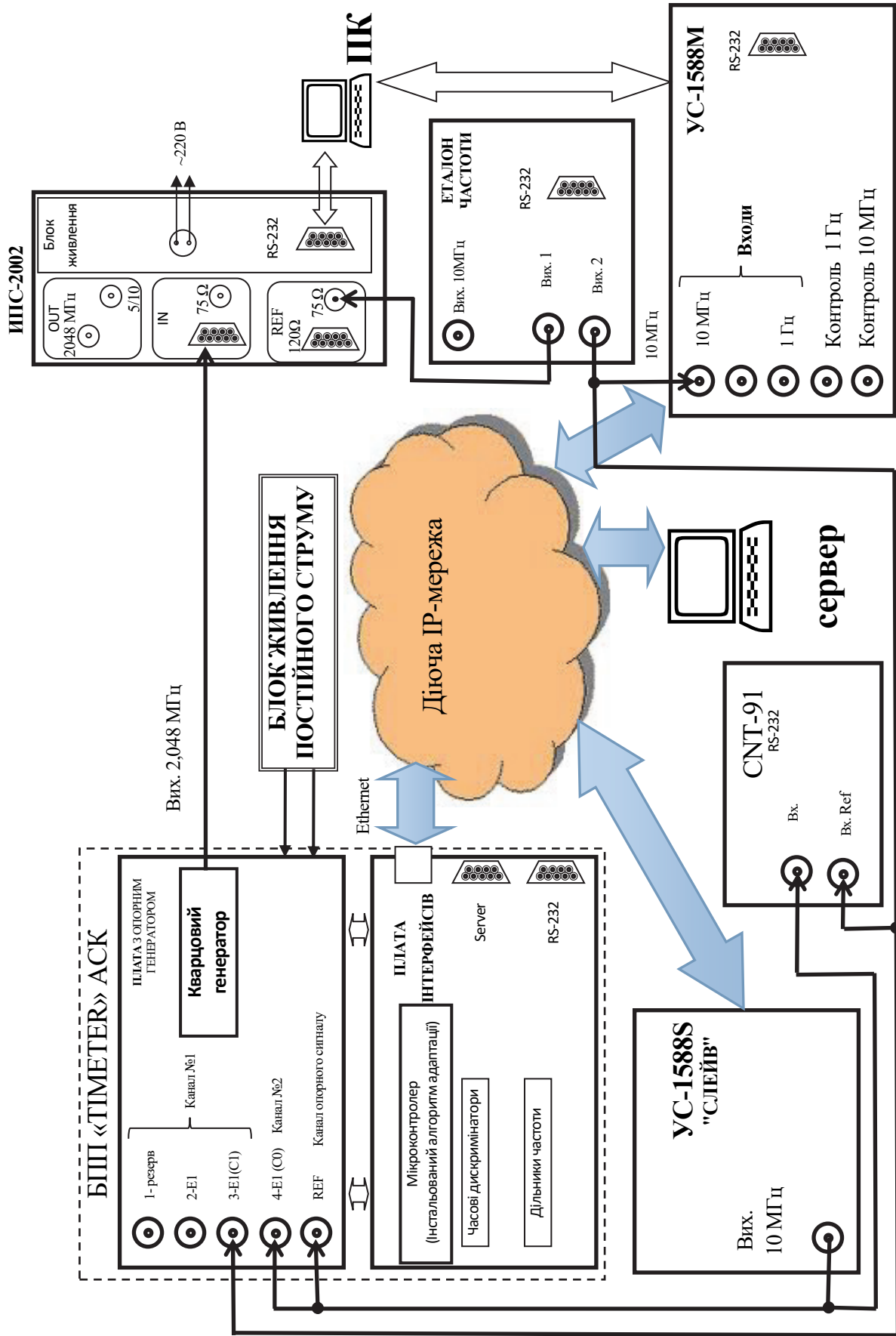
5.3. Експериментальні дослідження точності формування опорного сигналу АСК ПФАПЧ, підключеної з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу

Аналогічно попереднім дослідженням ПФАПЧ генератора опорного сигналу БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти, проведення досліджень у разі підключення до провідного джерела синхросигналу з використанням засобів ІР-технологій виконується згідно зі схемою вимірювань, яку наведено на рис. 5.9 [1-16].

Метою даних експериментальних досліджень також є визначення технічних характеристик виготовленого БПП «TIMETER» з ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК але у цьому разі синхронізуючий сигнал передається з використанням засобів ІР-технологій від провідного джерела синхросигналу. Об'єкт, завдання досліджень, параметри, що вимірюються та аналізуються не змінюються.

Результати короткотривалих вимірів ВЧІ (TIE) вихідного синхросигналу опорного генератора блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК, що підключений з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу (також еталона частоти), наведено на рис. 5.9, а значення максимального відхилення часового інтервалу МВЧІ (MTIE), девіації часового інтервалу ДЧІ (TDEV), дисперсії Алана (ADEV), модифікованої дисперсії Алана (MDEV), середньоквадратичної помилки часового інтервалу (TIErms), які отримано в результаті обробки даних зазначених вимірів, наведено відповідно на рис. 5.10 - рис. 5.14.

Порівняльний аналіз отриманих результатів з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4 вказує на виконання зазначених норм з технологічним запасом.



ПК – персональний комп'ютер Samsung (ноутбук).

Рис. 5.8. Схема короткотривалих вимірювань вихідного синхросигналу генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПШ «TIMETER» ASK, підключеного використанням засобів IP-технологій до провідного джерела синхросигналу

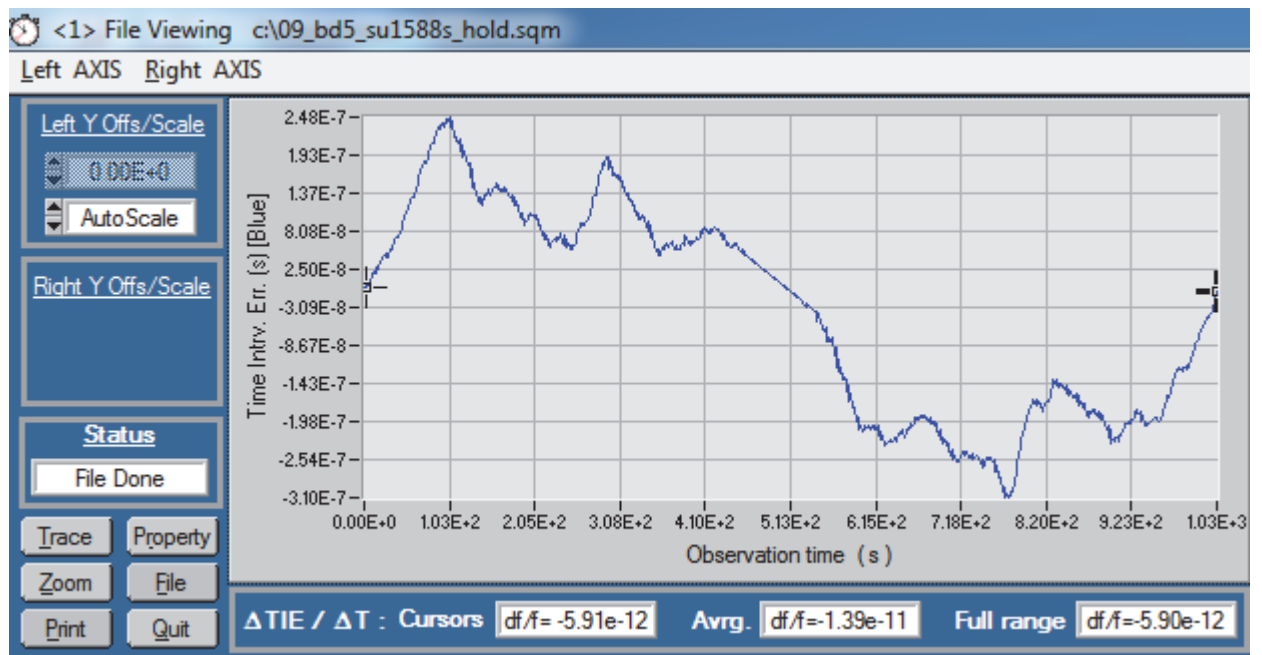


Рис. 5.9. Результати вимірів ВЧІ (ТІЕ) вихідного синхросигналу опорного генератора блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК, підключеного з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу

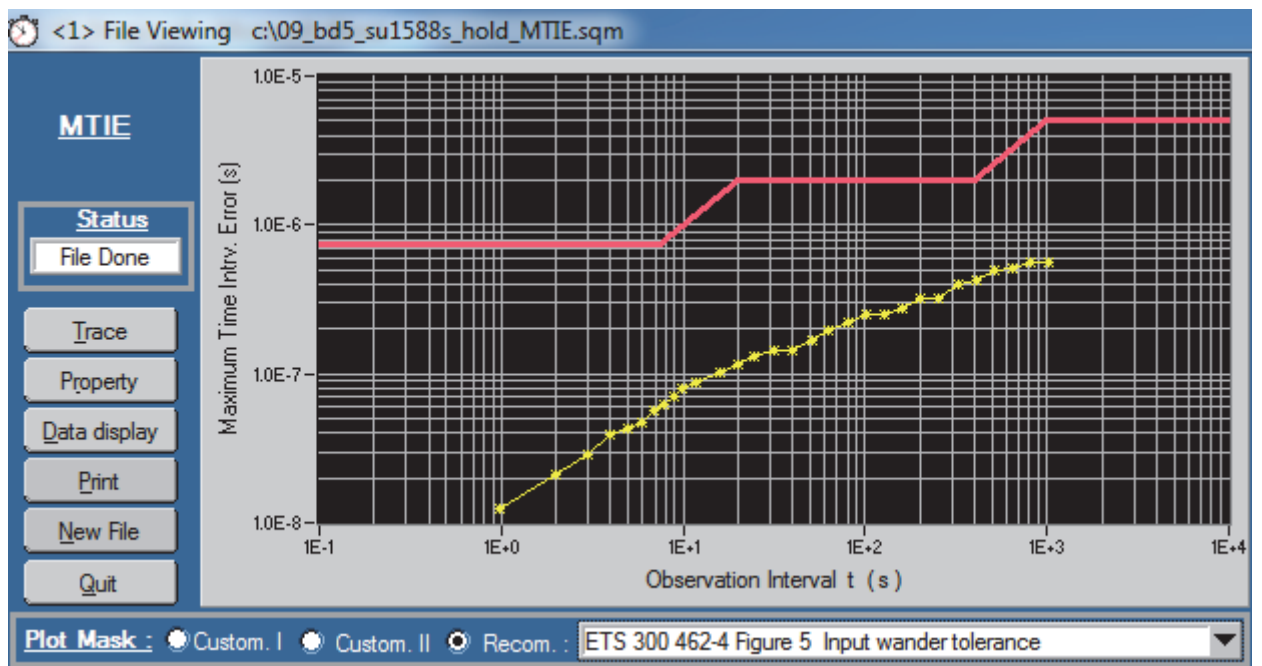


Рис. 5.10. Залежність від часу максимального відхилення часового інтервалу МВЧІ (МТІЕ) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК підключеного з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу та її порівняння з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4

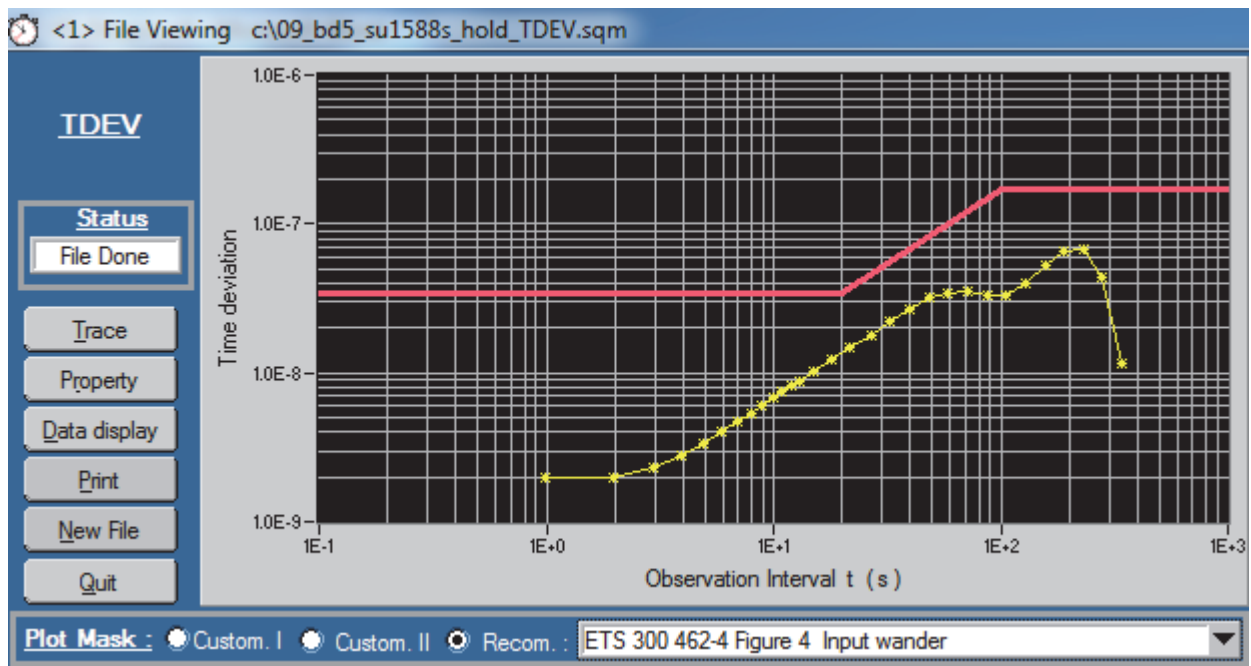


Рис. 5.11. Залежність від часу девіації часового інтервалу ДЧІ (TDEV) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, підключеного з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу та її порівняння з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4

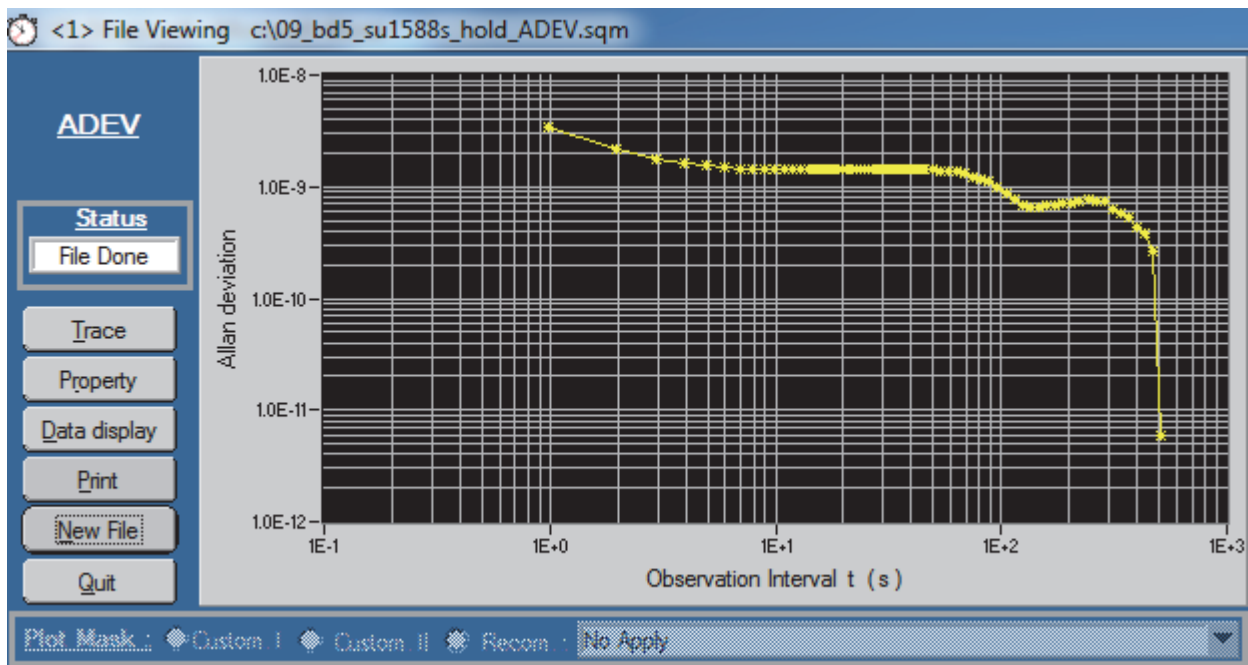


Рис. 5.12. Залежність від часу девіації Алана (ADEV) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, підключеного з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу

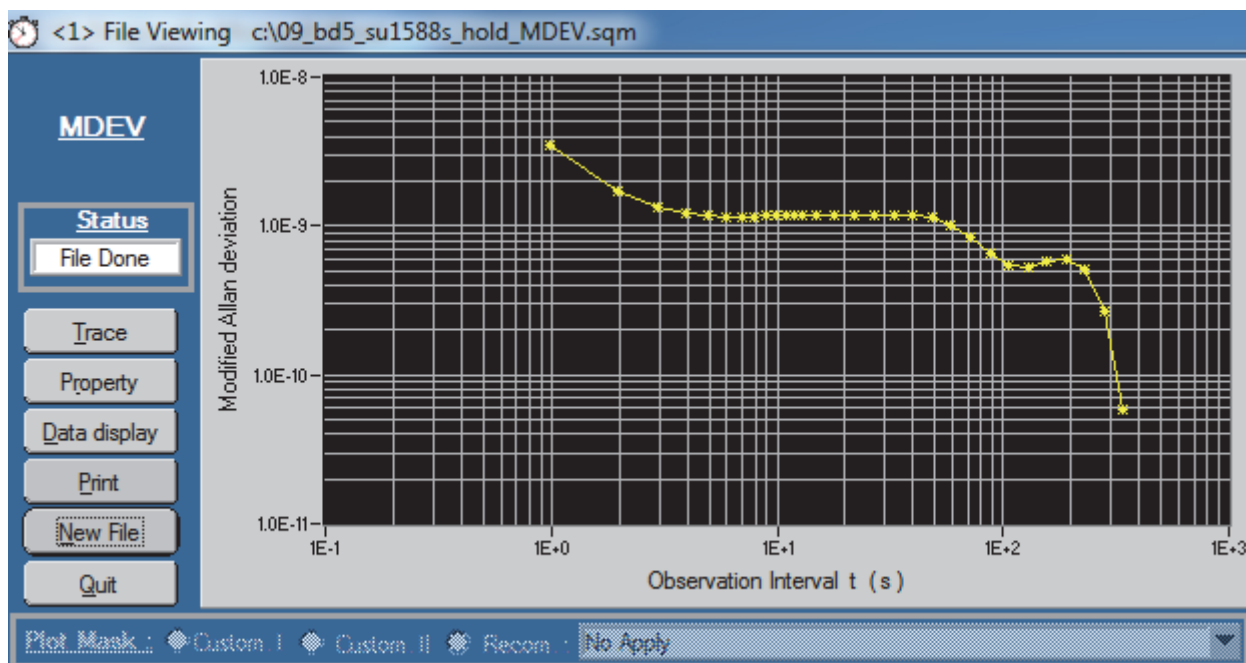


Рис. 5.13. Залежність від часу модифікованої девіації Алана (MDEV) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, підключеного з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу

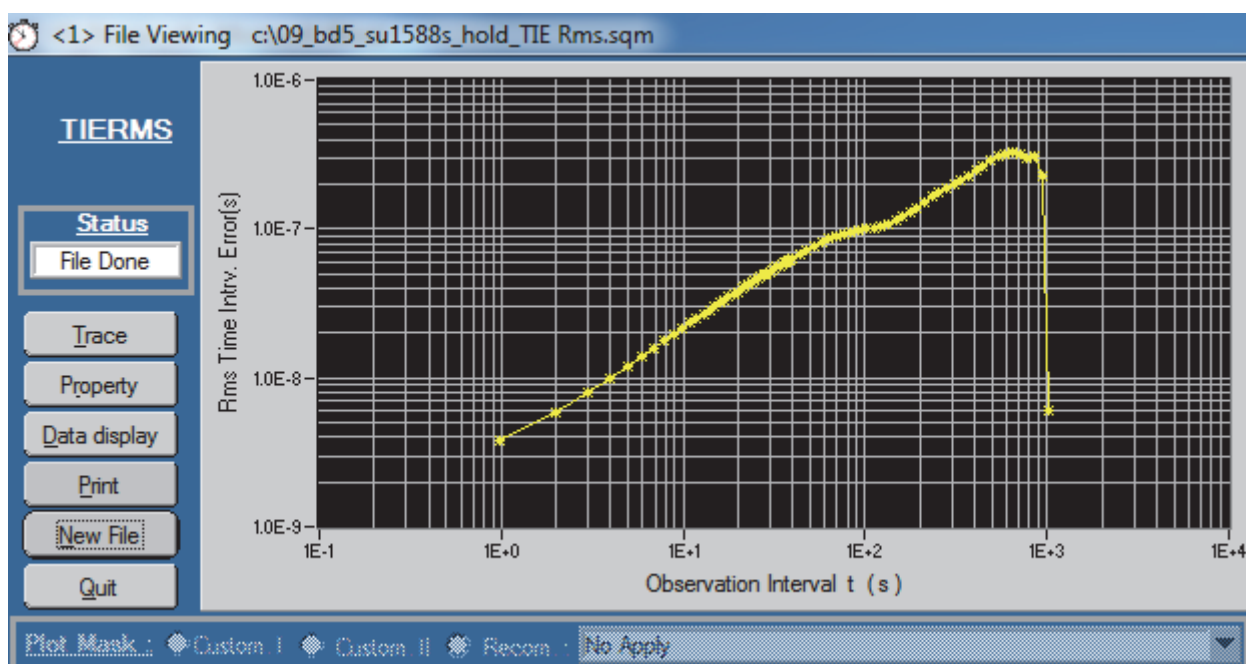


Рис. 5.14. Залежність від часу середньоквадратичної помилки часового інтервалу (TIE Rms) генератора опорного сигналу ПФАПЧ БПП «TIMETER» АСК, підключеного з використанням засобів ІР-технологій до провідного джерела синхросигналу

5.4. Експериментальні дослідження швидкодії ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою

Експериментальні дослідження швидкодії ПФАПЧ генератора опорного сигналу БПП «TIMETER» АСК проводяться за умови, коли її синхронізація від еталона частоти забезпечується за наперед заданою формою синхросигналу, що формується генератором вандера [20]. У цьому разі проведення досліджень виконується за схемою вимірювань, яку наведено на рис. 5.2.

Метою і завданням експериментальних досліджень є визначення технічних характеристик виготовленого БПП «TIMETER» з оптимальною за швидкістю ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК за умови формування генератором вандера синхросигналу, що має стрибок фази на 60 нс. Об'єкт і параметри, що вимірюються та аналізуються не змінюються.

Результати короткотривалих вимірів ВЧІ (TIE) вихідного синхросигналу опорного генератора блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» з оптимальною за швидкістю ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК наведено на рис. 5.15, а значення МВЧІ, ДЧІ, дисперсії Аллана, модифікованої дисперсії Аллана, середньоквадратичної помилки часового інтервалу, які отримано в результаті обробки даних зазначених вимірів, наведено відповідно на рис. 5.16 - рис. 5.20.

Залежність параметру відхилення часового інтервалу ВЧІ (TIE) від часу вихідного синхросигналу оптимальної за швидкістю ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою, яка наведена на рис. 5.15, являє собою перехідний процес, тобто реакцію підсистеми на стрибок фази синхронізуючого сигналу, сформованого генератором вандера (рис. 5.2). Аналіз результатів обчислень МВЧІ, ДЧІ і порівняння їх з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4 вказує на виконання зазначених норм синтезованою оптимальною за швидкістю ПФАПЧ з пропорційно-інтегрувальною ланкою.

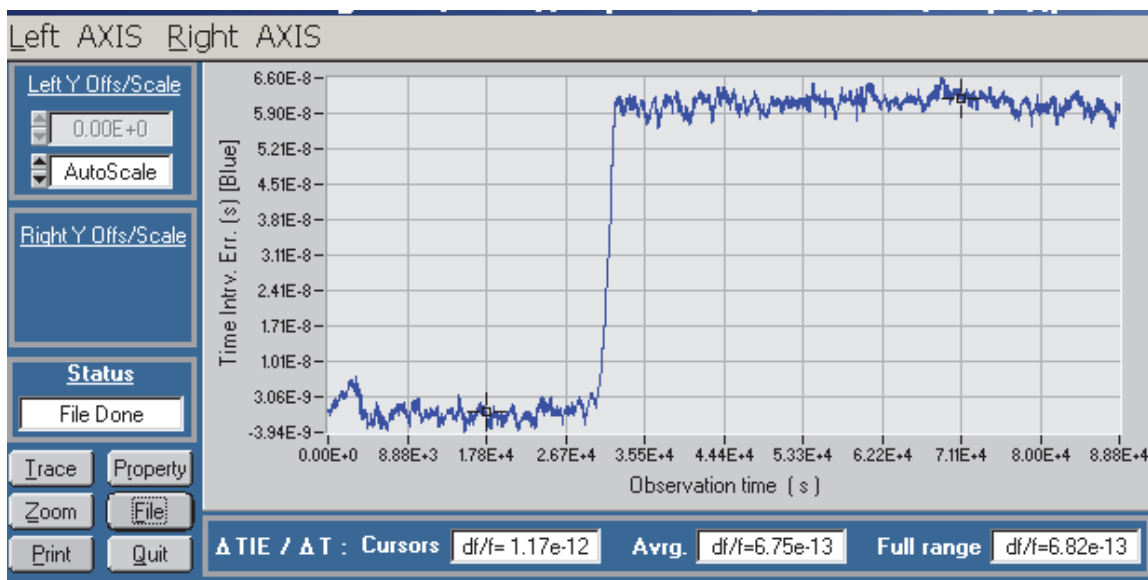


Рис. 5.15. Результати вимірів ВЧІ (TIE) вихідного синхросигналу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою

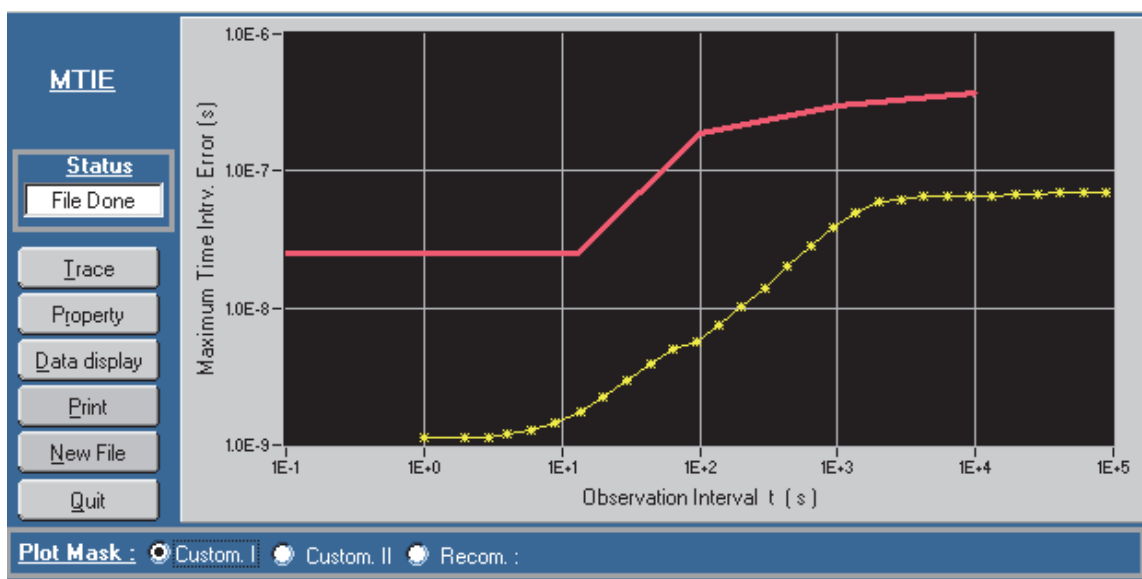


Рис. 5.16. Залежність від часу максимального відхилення часового інтервалу МВЧІ (MTIE) вихідного синхросигналу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою та порівняння її з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4

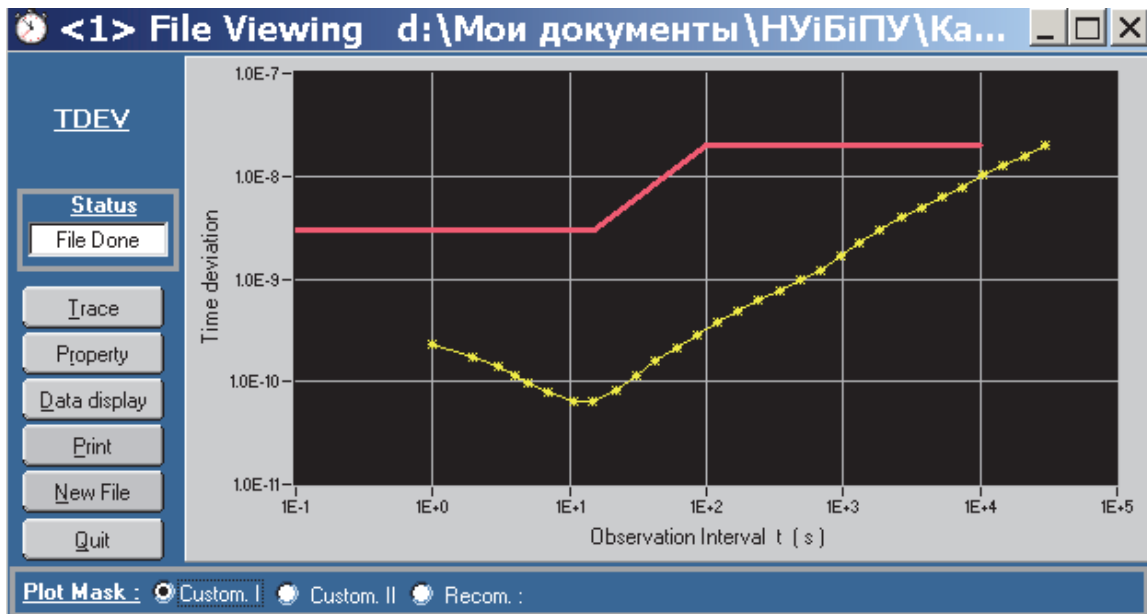


Рис. 5.17. Залежність від часу девіації часового інтервалу ДЧІ (TDEV) вихідного синхросигналу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегровальною ланкою та порівняння її з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4

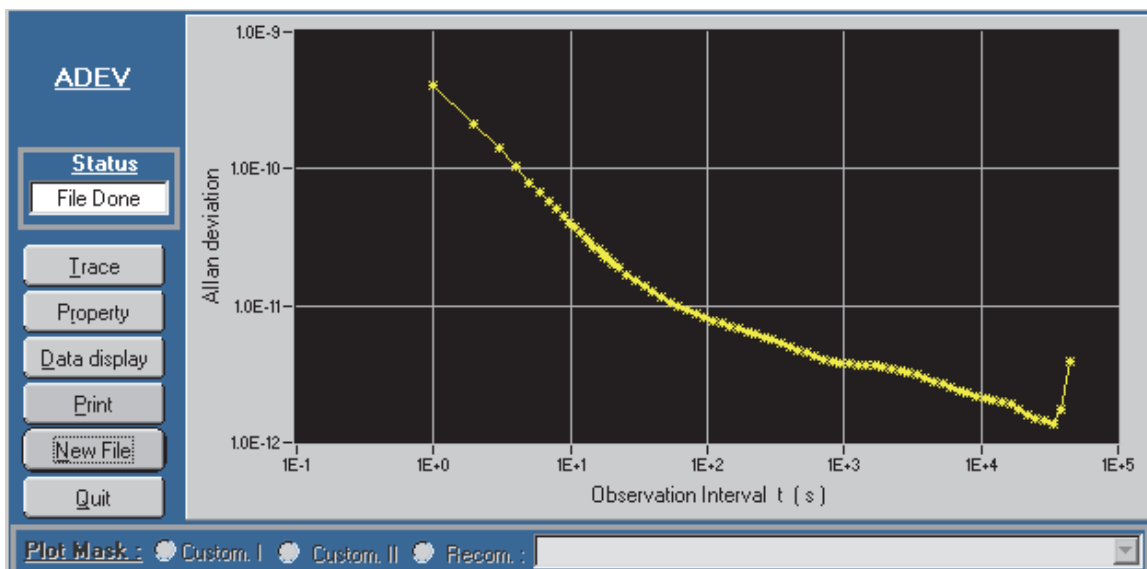


Рис. 5.18. Залежність від часу девіації Алана (ADEV) вихідного синхросигналу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегровальною ланкою

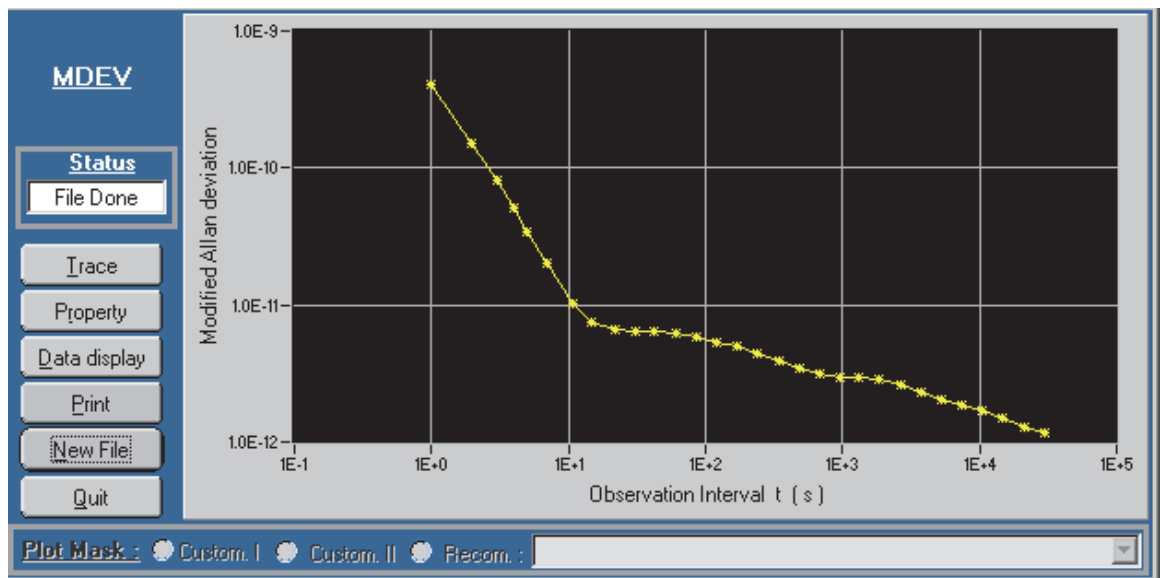


Рис. 5.19. Залежність від часу модифікованої девіації Алана (MDEV) вихідного синхросигналу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою

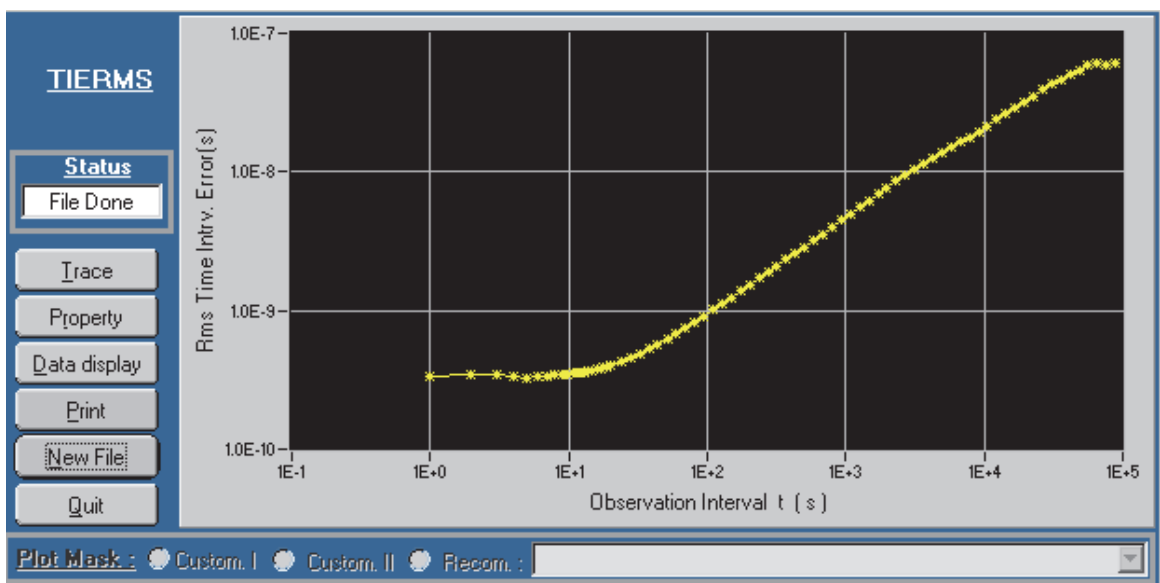


Рис. 5.20. Залежність від часу максимального відхилення часового інтервалу МВЧІ (МТІЕ) вихідного синхросигналу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою

5.5. Результати досліджень продуктивності АСК показників якості ПСЦС в умовах багатомономенклатурного виробництва

З метою перевірки і підтвердження отриманих в роботі теоретичних результатів виготовлено лабораторний стенд автоматизованої системи контролю, до складу якого входять розроблений лабораторний зразок блоку БПП «TIMETER» і програмне забезпечення P4000winXP [1-16].

Апаратна структура блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК (рис. 2.23) реалізована на основі способу багатоканального контролю, що дає можливість проведення одночасного контролю до чотирьох синхросигналів ПСЦС в режимі реального часу. Наразі в процесі виробництва ПСЦС та службах, що забезпечують технічну експлуатацію мереж, систем синхронізації, як правило, використовуються одноканальні вимірювачі параметрів синхронізації, наприклад, ИПС-2002 (виробник ТОВ «ІСТ», Україна) [21], PJS2000compact (виробник PLLB, Італія) [22], ИВО-1М (виробник АЛТО, Росія) [23].

Отже проведення експериментальних досліджень розробленого лабораторного стенду АСК мають за мету визначення технічних особливостей експлуатації та оцінку його продуктивності у разі проведення контролю показників якості ПСЦС.

Важливою особливістю є використання одноланкового повнодоступного комутатора (рис. 2.23), котрий розширює функціональні можливості АСК щодо оперативного вибору диспетчером пари синхросигналів, які можуть підключатись до одного з чотирьох первинних перетворювачів для вимірювання відхилення часового інтервалу ВЧІ (контрольованого показника якості ПСЦС) і перетворення результатів вимірів у цифрові данні. Результати вимірів ВЧІ синхросигналів періодично (з періодом одна секунда) передаються з використанням IP-технології (протокол Ethernet) на комп'ютер. Передбачена можливість підключення комп'ютера для сервісного обслуговування пристрою через послідовний інтерфейс RS-232 (протокол Telnet).

Технічні характеристики лабораторного стенду АСК з розробленим блоком «TIMETER» і програмним забезпеченням P4000winXP забезпечують можливість

одночасного контролю і візуалізації його результатів в реальному часі до чотирьох синхросигналів, що формуються ПСЦС. У разі одночасного підключення до АСК чотирьох синхросигналів контрольованих ПСЦС, відповідно в чотири рази підвищується її продуктивність у порівнянні з одноканальним варіантом.

Для покращення наочності результатів контролю ПСЦС текстові дані, що формуються двома первинними перетворювачами, які обираються оператором, відображаються у вигляді динамічних графіків в реальному часі. Також на екран монітора виводиться службова інформація (режим роботи ПФАПЧ АСК, наявність і формат контрольованих синхросигналів та інш.). Все це спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації у “ручному режимі” прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу одиничного та дрібносерійного гнучкого виробництва ПСЦС.

Проведення експериментальних досліджень лабораторного стенду АСК виконувалось як в лабораторних умовах, так і в умовах виробництва [3, 10].

Результати експериментальних досліджень продуктивності АСК показників якості ПСЦС в лабораторних умовах наведено на рис. 5.21. Для прикладу на графіках рис. 5.21 представлено фрагменти параметрів ВЧІ контрольованих синхросигналів (Channel C0 і Channel C1) двох ПСЦС, що перебувають в різних режимах на інтервалі часу спостереження від 443с до 1153 с [3]. У цьому разі одночасне підключення до АСК синхросигналів двох контрольованих ПСЦС забезпечує підвищення її продуктивності в два рази у порівнянні з одноканальним варіантом.

Також АСК забезпечує прямі, незалежні та достовірні результати контролю синхросигналів з централізованим накопиченням та обробкою даних, що спрощує знаходження можливих причин невідповідності в процесі налаштування та тестування ПСЦС в лабораторних умовах.

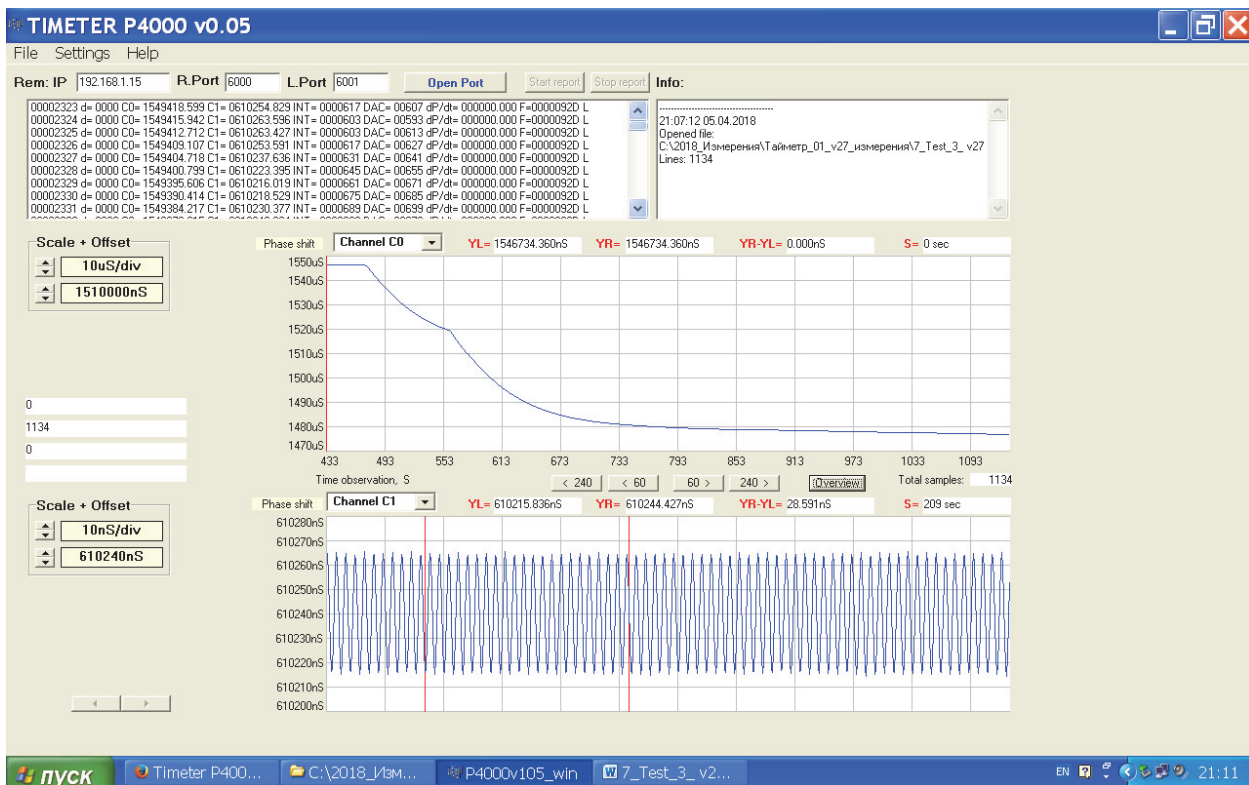


Рис. 5.21. Фрагменти параметрів ВЧІ контрольованих синхросигналів двох ПСЦС, що перебувають в різних режимах

В умовах багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів з використанням гнучких інтегрованих систем, одночасне отримання прямих, незалежних та достовірних результатів контролю сигналів синхронізації декількох ПСЦС з централізованим управлінням та накопиченням даних дозволяє не тільки контролювати якість продукції, а також, при використанні статистичних методів теорії прийняття рішень, своєчасно знаходити і вирішувати виробничі проблеми. Результати експериментальних досліджень лабораторного стенду АСК в виробничих умовах підтверджують можливість збільшення до чотирьох каналів вимірювань, які можуть одночасно оброблятися. Оператор може аналізувати отримані результати моніторингу синхросигналів ПСЦС, які представлені в цифровому і графічному вигляді [10]. Це підвищує продуктивність, а також дає можливість порівняльної оцінки результатів вимірювань всіх чотирьох каналів на відміну від одноканального чи навіть двоканального.

Підтвердженням цьому є отримані результати експериментальних досліджень лабораторного стенду АСК в умовах багатомономенклатурного

виробництва ПСЦС, які наведено на рис. 5.22. У цьому разі одночасне підключення до АСК синхросигналів чотирьох контрольованих ПСЦС забезпечує підвищення її продуктивності в чотири рази у порівнянні з одноканальним варіантом.

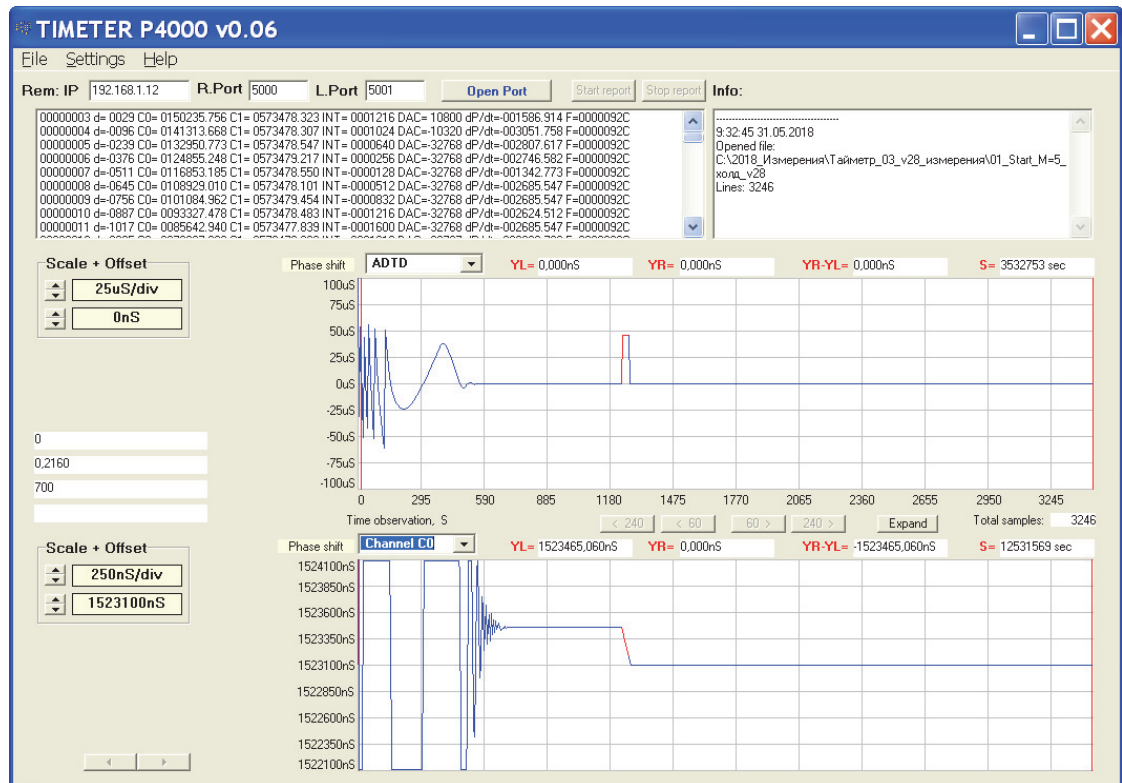


Рис. 5.22. Залежність ВЧІ контрольованих синхросигналів чотирьох ПСЦС в умовах багатомономенклатурного виробництва

АСК показників якості багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації пройшла дослідні випробування і використовувалась у процесі багатомономенклатурного гнучкого виробництва прецизійних ПСЦС різного призначення в ТОВ «Інформаційні системні технології», що засвідчується наведеною в додатку А довідкою від 29.05.2020 р.

Розроблено діючий лабораторний стенд АСК з блоком БПП «TIMETER» і програмним забезпеченням P4000winXP впроваджено в МПП «Анігер» і використано з метою оцінювання показників якості міток точного часу ЕВРП «Регіна-Ч», що експлуатуються на об'єктах Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. Акт впровадження у виробництво від 19.05.2020 р. наведеною в додатку А.

Розроблений лабораторний стенд АСК з блоком «TIMETER» і програмним забезпеченням P4000winXP використовуються у навчальному процесі під час викладання дисципліни «Спеціальні системи» у навчальному процесі кафедри автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка НУБіП України. В перспективі передбачається використання розроблених засобів для моніторингу змін часових затримок передачі синхросигналів, які можуть бути викликані різким підвищенням завантаження IP-мереж в результаті кібератак [6, 16, 24].

Потенційними користувачами розроблених апаратно-програмних засобів можуть бути цифрові підстанції систем електропостачання Smart-технологій, оператори телекомунікаційних систем, провайдери комп'ютерних мереж, метрологічні центри.

5.6. Основні результати та висновки до розділу 5

Розроблено лабораторний стенд АСК показників якості ПСЦС, до складу якого входять блок БПП «TIMETER» і програмне забезпечення P4000winXP, а також методика та відповідні схеми вимірювань. Проведено експериментальні дослідження лабораторного стенду АСК в лабораторних умовах, а також умовах діючого багатомономенклатурного виробництва конкурентоспроможних ПСЦС.

За результатами проведених експериментальних досліджень зроблено наступні висновки:

1. Порівняльний аналіз статистично оброблених даних результатів короткотривалих вимірів ВЧІ (TIE) вихідного синхросигналу опорного генератора блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК, що синхронізується від еталона частоти, з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4 вказує на виконання зазначених норм з значним запасом (в сотні разів).

2. Аналіз статистично оброблених даних результатів короткотривалих вимірів ВЧІ (TIE) вихідного синхросигналу опорного генератора БПП «TIMETER» АСК, що підключений з використанням засобів IP-технологій до провідного джерела

синхросигналу, з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4 вказує на виконання зазначених норм та має суттєві технологічні запаси.

3. Експериментальні дослідження перехідного процесу оптимальної за швидкодією ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК з пропорційно-інтегрувальною ланкою, за умови формування генератором вандера стрибка на 60 нс фази синхронізуючого сигналу, з наступним аналізом результатів обчислень МВЧІ, ДЧІ і порівняння їх з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4 вказують на виконання зазначених норм.

4. Експериментально підтверджено технічні характеристики досліджуваного лабораторного стенду АСК з розробленим блоком «TIMETER» і програмним забезпеченням Р4000winXP по забезпеченню одночасного контролю і візуалізації в режимі реального часу до чотирьох синхросигналів, які формуються ПСЦС. Отримано чисельне значення підвищення продуктивності АСК в чотири рази у порівнянні з одноканальним способом контролю.

5. Практично підтверджено ефективність розширення функціональних можливостей АСК в процесі її експлуатації, які базуються на використанні одноланкового повнодоступного комутатора, реалізації способів динамічного відображення графіків та службової інформації в реальному часі. Зазначене спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації у “ручному режимі” прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу одиничного та дрібносерійного гнучкого виробництва ПСЦС.

Аналіз результатів експериментальних досліджень дає змогу стверджувати, що розроблена автоматизована система забезпечує підвищену продуктивність процесу контролю, високу швидкодію, задану надійність та точність вимірів показників якості ПСЦС, що відповідають нормам світових стандартів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. V.V. Koval, D.O. Kalian, M.M. Khudyntsev, V.P. Lysenko, O.V. Samkov, I.J. Shkliarevskiyi. Automated 24x7 monitoring of synchroinformation in modern digital networks // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

Серія фізико-математичні науки. - 2017. - Випуск №2. - С.88-94. Режим доступу до статті: http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1824870

2. V.P. Lysenko, V.V. Koval, K.V. Nakonechna, D.O. Kalian. Modern information technologies in the control systems for complex biotechnical objects of agricultural appointment // Information and Telecommunication Sciences, Volume 9, Number 2(15), July-December 2017, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.38-43. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/119897>

3. Dmytro Kalian, Nadiia Kazakova, Boris Kravchenko, Valerii Koval. Automated system for Monitoring Synchronizing precise time signals at SMART-GRID power plants. Projectowanie, badania, i eksploatacja. Tom 1. - Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej. Bielsku-Bialej, Poland. 2019. - P.155-160. <http://www.engineerxxi.ath.eu/book/designing-researches-and-exploitation-2019-vol-1/>

4. Коваль В.В., Дорогобед В.В., Кальян Д.О., Твердохліб А.В., Худинцев М.М. Автоматизована система багатоканального моніторингу синхроінформації цифрових телекомунікацій // Матеріали П'ятої міжнародної наук.-практ. конф. “Інфокомунікації – сучасність та майбутнє”, м. Одеса, 29 – 30 жовтня 2015 р.: в 3 ч. Ч.3. - Одеса: ОНАЗ, 2015. – С.40-43.

5. Коваль В.В., Кальян Д.О., Мовчан С.А., Шкляревський І.Ю. Дослідження якості переміщення синхроінформації з використанням протоколу прецизійного часу стандарту IEEE 1588-2008 // Матеріали П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. “Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості”. 8-9 жовтня 2015 р. – Одеса: Одеська державна академія технічного регулювання та якості, 2015. – С.94-95.

6. Коваль В.В., Самков О.В., Кальян Д.А., Дубович-Костецький В.Г. Засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів інформаційно-телекомунікаційних систем / Збірник матеріалів доповідей та тез I Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем»

(PCSITS), м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.; Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2018 – С.100-103.

7. 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. P.618-620.

8. Valerii Koval, Nadiia Kazakova, Dmytro Kalian, Dmytro Komarchuk, Vitaliy Lysenko, Oleksandr Samkov. The use of advanced information and communication technologies to monitor the quality of synchronization signals of IoT terminal devices / 3st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019), Lviv, Ukrain, 2-6 july 2019. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2019. – С.22-25. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8847894>

9. Valerii Koval, Dmytro Kalian, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov, Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - P.269-276.

10. Кальян Д.О., Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., В.Г. Дубович-Костецький. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540>

11. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с.

12. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с.

13. Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій: Звіт про НДР за державним замовленням / НУБіП України; Номер державної реєстрації: 0115U003376. – К., 2016. – 172 с.

14. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням ІР-мереж: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян, О.В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с.

15. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с.

16. Коваль В.В., Кальян Д.А., Шкляревский И.Ю. Использование мониторинга синхросигналов для повышения безопасности информационно-телекоммуникационных систем / Збірник матеріалів доповідей та тез II наук.-практ. конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем», 23-24 березня 2017 р. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2017. – С.123-127.

17. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 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.

18. ITU-T Rec. G.810. Definitions and terminology for synchronization networks. Geneva, 2001.

19. ITU-T Rec. G.823. The control of jitter and wander within digital networks which are based on the 2048 kbit/s hierarchy. Geneva, 2000.

20. Розробка системи контролю синхросигналів телекомунікаційних систем: Звіт про виконання НДР / Державн. ун-т інф.-ком. технологій. (ДУІКТ). -

№ГР0108U009071. – К., 2008. – 67 с.

21. Вандерметры. / [Електронний ресурс] // <http://ist.net.ua/?action=about&page=21>.

22. PJS2000 Synchronization measurement instrument for telecommunications networks. Instruction manual. Fourth Edition Software release 1.20. PLLB Electronica S.p.A., 2001.

23. Измеритель временных отклонений - ИВО-1М / [Електронний ресурс] // http://wircom.ua/?d_id=193.

24. Інформаційна система контролю якості передавання синхросигналів / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, Д.О. Кальян // VIII Міжнародна науково-практична конференція "Технічне регулювання, метрологія та інформаційні технології: європейський вектор" (Одеса, 11-12 жовтня 2018 р.): Збірник наукових праць / Одеська державна академія технічного регулювання та якості. — Одеса: Бондаренко М.О., 2018. — С.123-125.

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційного дослідження вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у створенні автоматизованої системи контролю з використанням сучасних ІР-технологій та розробленні програмного забезпечення і блока первинних перетворювачів контрольованих сигналів з ієрархічною підсистемою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора, що забезпечує підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості в умовах багатомоделного гнучкого автоматизованого виробництва конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів. Внаслідок проведення теоретичних та експериментальних досліджень отримані такі наукові та практичні результати:

1. Основним підходом до забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю є автоматизація процесів вимірювань у часовій області дискретних відліків похибки часу, котрі можуть тривати сотні, тисячі секунд і більше, та статистичної обробки отриманих даних вимірів, що в умовах багатомоделного виробництва та експлуатації ПСЦС вимагає застосування сучасних засобів комп'ютерної техніки та ІР-технологій.

2. Досліджено виробництво ПСЦС як об'єкт автоматизації: визначено на основі аналізу структурних особливостей системи управління ГІС, а також її функцій за збором, передаванням, обробкою й формуванням даних, актуальність дослідження інформаційних функцій ГІС, які забезпечуються підсистемою вимірювань та контролю показників якості; розроблено автоматизовану систему контролю, до складу якої входять діючий лабораторний макет блока БПП «TIMETER» і програмне забезпечення P4000winXP та проведено її експериментальні дослідження.

3. Вперше на основі запропонованого методу багатоканального контролю показників якості розроблено апаратну структуру вимірювального блока БПП «TIMETER» АСК, що забезпечує в порівнянні з одноканальним підвищення в 4 рази продуктивності контролю показників якості ПСЦС в умовах

багатономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва, а також у процесі їх технічної експлуатації в складі сучасних високотехнологічних систем.

4. Вперше розроблено алгоритм контролю часових характеристик синхросигналу ПСЦС і програмне забезпечення для візуалізації та аналізу даних, які використовуються для реалізації у “ручному режимі” прийняття рішення щодо змін параметрів виробничого технологічного процесу гнучких інтегрованих систем.

5. Вперше розроблено структуру і системотехнічну реалізацію адаптивного цифрового фазового дискримінатора у вигляді програмного забезпечення середовища розробки Quartus Prime Lite Edition, яке використано для програмування програмованих логічних схем ALTERA EPM7128SLC84, що забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу (контрольованого показника якості) в цифровий сигнал та можливість керованого формування його статичної характеристики залежно від режиму функціонування ПФАПЧ.

6. Вперше розроблено структуру пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії процесу контролю за рахунок прийняття рішення в кінці кожного періоду сигналу тактової частоти, який формується опорним генератором.

7. Вперше на основі теоретико-ймовірнісних розрахунків формалізовано вимоги до електричних компонентів блока контролю періодичності з метою підвищення якості прийняття рішення оператором щодо зняття невизначеності про наявність або відсутність контрольованого сигналу ПСЦС. Для отримання меншого розкиду температурного коефіцієнта тривалості перехідного процесу інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП необхідно не тільки зменшувати розкид температурних коефіцієнтів її електричних компонентів, але і прагнути до максимальної однорідності їх за середнім значенням температурних коефіцієнтів, а також до точності у виготовленні всіх електричних компонентів.

8. Набуло подальшого розвитку дослідження систем фазового автопідстроювання частоти з нелінійностями, що обумовлені періодичностями керуючої дії в функції фазової координати системи та обмеженнями типу

«насичення». Виконано синтез ієрархічної структури оптимальної за швидкодією системи в три етапи: перший – аналітичний; другий – реалізаційний; третій – імітаційного моделювання (з використанням програми Simulink пакета MATLAB).

9. Розроблено і досліджено математичну модель оптимальної за швидкодією ПФАПЧ опорного генератора ієрархічної структури: аналітично визначено граничні умови, за яких періодичність характеристики ФД за фазовою координатою в підсистемах фазового автопідстроювання частоти з інтегровальною ланкою не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і виконуються умови теореми А.А. Фельдбаума про n -інтервалів; встановлено, що адаптивне формування сигналу керуючої дії в підсистемі за встановленим на основі принципу максимуму акад. Л.С. Понтрягіна оптимальним за швидкодією законом керування дає змогу зменшити тривалість перехідного процесу від 2,7 до 4 разів залежно від значення початкових умов.

10. Проведено експериментальні дослідження АСК ПСЦС з використанням розробленого лабораторного макета блока первинних перетворювачів БПП «TIMETER» і програмного забезпечення P4000winXP, які підтверджують високі якісні й кількісні показники процесу контролю в умовах багатономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

ДОДАТКИ

Додаток А

Акти впровадження результатів дисертаційної роботи



ТОВ «Інформаційні сервісні технології»

29.05.2015 р. №15

Довідка

Видана Кальяну Дмитру Олександровичу в тому, що результати його дисертаційної роботи, виконаної під керівництвом професора Ковалю В.В. «Автоматизована система контролю показників якості багатомоделісного виробництва пристроїв синхронізації» використовувались в порядку експерименту при виробництві пристроїв синхронізації різного призначення.

Особливо важливими, як в теоретичному так і практичному плані є такі результати, отримані Кальяном Д.О.:

- структура автоматизованої системи контролю, що забезпечує збільшення числа каналів та можливість одночасного проведення вимірів показників якості, і як наслідок, підвищення продуктивності контролю, спрощення візуалізації та аналізу отриманих результатів;
- апаратна структура блоку первинного перетворювача на основі якої виконана системотехнічна розробка БПП «TIMETER», що забезпечує можливість збільшення до чотирьох каналів вимірювань показників якості пристроїв синхронізації;
- діючий лабораторний макет автоматизованої системи контролю з блоком БПП «TIMETER» і програмним забезпеченням (ПЗ) P4000winXP, розробленим у середовищі EMBARKADERO;
- дослідні випробування розробленого лабораторного макету автоматизованої системи контролю з блоком БПП «TIMETER» і ПЗ P4000winXP, що підтвердили задані технічні показники та конкурентоспроможність з світовими аналогами.

Отримані результати плануються використовуватись в процесі багатомоделісного гнучкого виробництва прецизійних пристроїв синхронізації.

Директор



І.Ю. Шкляревський

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Заступник директора МПП «АНІГЕР»
д.т.н.


 М.Ф.Сопель
«19» _____ 2020р.
А К Т**впровадження результатів науково-технічних робіт у виробництво**

Даним актом засвідчуємо, що розроблені в Національному університеті біоресурсів і природокористування України аспірантом Кальяном Дмитром Олександровичем під керівництвом д.т.н., проф. Ковалю В.В. апаратні і програмні засоби (діючий лабораторний макет з блоком БПП «TIMETER» і програмне забезпечення R4000/winXP) автоматизованої системи контролю, призначені для безперервного багатоканального моніторингу сигналів, сформованих приймачами супутникових навігаційних систем GNSS, що входять до складу модуля синхронізації ResGNSS, використано МПП «АНІГЕР» в наукових цілях та в порядку експерименту з метою оцінювання показників якості міток точного часу електровимірювальних ресетруючих приладів (ЕВРП) «Регіна-Ч», які впроваджено на об'єктах Об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України.

При подальшому впровадженні ЕВРП «Регіна-Ч» на об'єктах ОЕС України, а також при виконанні науково-технічних розробок за державним замовленням передбачено використання вищезазначених апаратно-програмних засобів.

Від НУБіП України

Від МПП «АНІГЕР»

Професор кафедри автоматики та
робототехнічних систем ім. акад.
І.І.Мартиненка, д.т.н., проф.,

Керівник сектору метрології,
сертифікації та якості, с.н.с., к.т.н.


 (підпис)

В.В.Коваль
(ПІБ)


 (підпис)

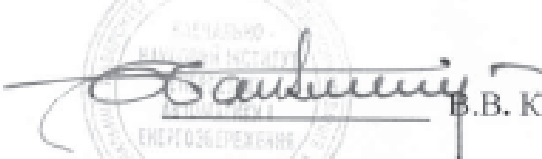
В.М. Слинко
(ПІБ)

Провідний інженер


 (підпис)

Р.Б. Камінський
(ПІБ)

Затверджую
ТВО Директора ННІ енергетики
автоматики і енергозбереження
д.т.н., проф.


В.В. Каплун
« 14 » _____ 2020 р.

А К Т

впровадження результатів кандидатської дисертації аспіранта Кальяна
Дмитра Олександровича на тему "Автоматизація процесу контролю
показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів
багатономенклатурного виробництва"

Ми, що нижче підписалися, завідувач кафедри автоматики та
робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка, доктор технічних наук,
професор Лисенко Віталій Пилипович, доктор технічних наук, професор
Коваль Валерій Вікторович, доктор технічних наук, професор Шворов
Сергій Андрійович, склали цей акт, який засвідчує, що результати
дисертації аспіранта Кальяна Д.О. застосовуються при проведенні
лекційних та лабораторних занять з дисципліни «Спеціальні системи» на
кафедрі автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка
(спеціальність 151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»).

Завідувач кафедри



В.П. Лисенко

Професор кафедри



В.В. Коваль

Професор кафедри



С.А. Шворов

Додаток Б
Патенти на винахід і корисну модель



УКРАЇНА



ПАТЕНТ

НА КОРИСНУ МОДЕЛЬ

№ 116809

**ПРИСТРІЙ КОНТРОЛЮ ПЕРІОДИЧНОСТІ ІМПУЛЬСНОЇ
ПОСЛІДОВНОСТІ ТАКТОВОЇ ЧАСТОТИ**

Видано відповідно до Закону України "Про охорону прав на винаходи і корисні моделі".

Зареєстровано в Державному реєстрі патентів України на корисні моделі 12.06.2017.

Заступник міністра економічного
розвитку і торгівлі України

М.І.Тітарчук




ДОДАТОК В

ЕЛЕМЕНТИ ВИХІДНОЇ МНОЖИНИ АЛЬТЕРНАТИВ СХЕМОТЕХНІЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ФАПЧ

В якості елементів вихідної множини альтернатив схемотехнічної реалізації ФАПЧ наведено десять структурних схем систем ФАПЧ.

Структурна схема В.1 радіоімпульсної системи фазового автопідстроювання частоти, яка розроблена для виділення несівної частоти радіоімпульсного сигналу і збереження (запам'ятовування) її значення в паузі (рис. В.1) [1].

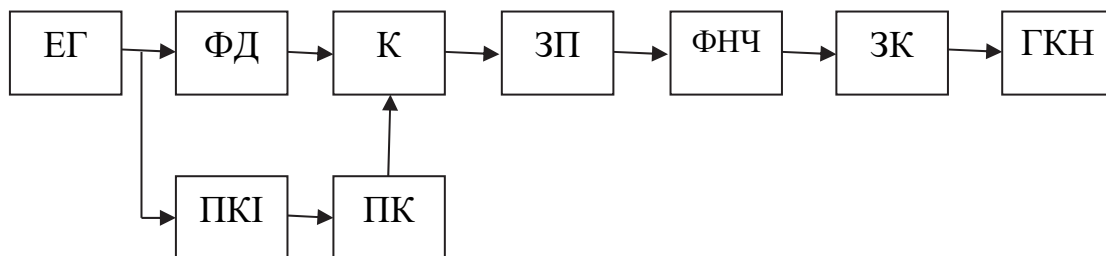


Рис. В.1. Структурна схема радіоімпульсної ФАПЧ [1]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФД – фазовий детектор;
 ФНЧ – фільтр низьких частот;
 ЗК – засіб керування;
 ГКН – генератор, що керується напругою;
 ПК – пристрій керування;
 ПКІ – пристрій контролю імпульсів;
 К – ключ;
 ЗП – запам'ятовуючий пристрій.

В якості наступних варіантів розглянемо дві схеми В.2 та В.3 імпульсно-фазового помножувача і дільника частоти, які представлено відповідно на рис. В.2 та В.3.

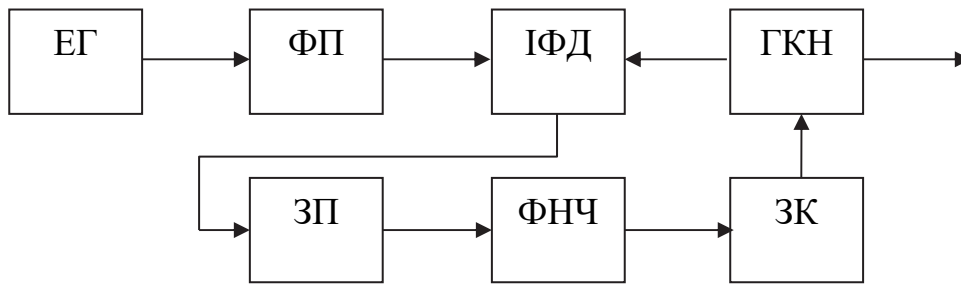


Рис. В.2. Структурна схема імпульсно-фазового помножувача частоти [1]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФП – пристрій формування імпульсного сигналу;
 ІФД – імпульсний фазовий детектор;
 ФНЧ – фільтр низьких частот;
 ЗК – засіб керування;
 ГКН – генератор, що керується напругою;
 ЗП – запам'ятовуючий пристрій.

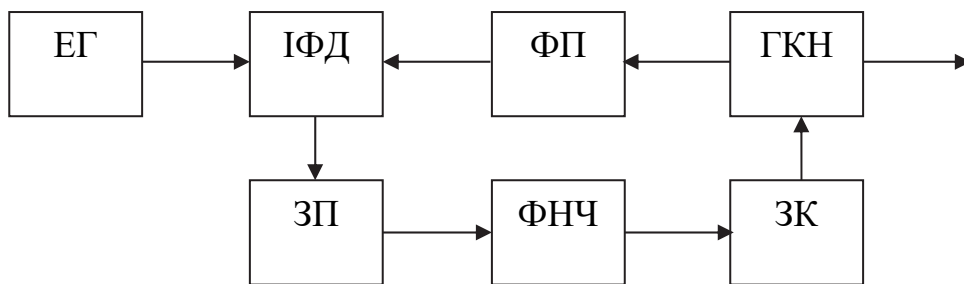


Рис. В.3. Структурна схема імпульсно-фазового дільника частоти [1]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФП – пристрій формування імпульсного сигналу;
 ІФД – імпульсний фазовий детектор;
 ФНЧ – фільтр низьких частот;
 ЗК – засіб керування;
 КГ – генератор, що керується напругою;
 ЗП – запам'ятовуючий пристрій.

Наступним варіантом є схема В.4 імпульсно-фазового синтезатора радіочастот на основі систем и фазового автопідстроювання частоти [2], що використовує апроксимуючі алгоритми синтезу радіочастот (рис. В.4).

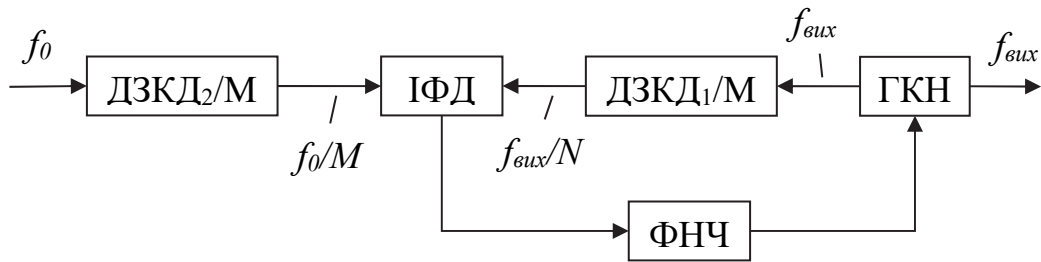


Рис. В.4. Структурна схема імпульсно-фазового синтезатора частот на основі систем и фазового автопідстроювання частоти [2]

ІФД – імпульсний фазовий детектор;

ФНЧ – фільтр низьких частот;

ГКН – генератор, що керується напругою;

ДЗКД – дільник зі змінною кратністю ділення.

На виході імпульсно-фазового синтезатора частот реалізованого на основі систем и фазового автопідстроювання частоти можуть бути отримані частоти, значення яких визначаються співвідношенням $f_{\text{вих}} = Nf_0/M$, де f_0 – частота провідного генератора (еталонного генератора ЕГ); N , M – коефіцієнти ділення ДПКД₁ і ДПКД₂ відповідно [2]. Частота порівняння сигналів у кільці ФАПЧ $f_p = f_0/M$. Якщо допустима реалізація великих значень коефіцієнтів M , N (і відповідно f_0), то можлива апроксимація точного значення необхідної вихідної частоти $f_{\text{вих}}$ із заданою похибкою за досить високих значень частоти f_p .

Наступним варіантом В.5 реалізації ПФАПЧ БПП АСК є схема імпульсно-фазового синтезатора частот з двома кільцями автопідстроювання на основі систем и фазового автопідстроювання (рис. В.5) [1].

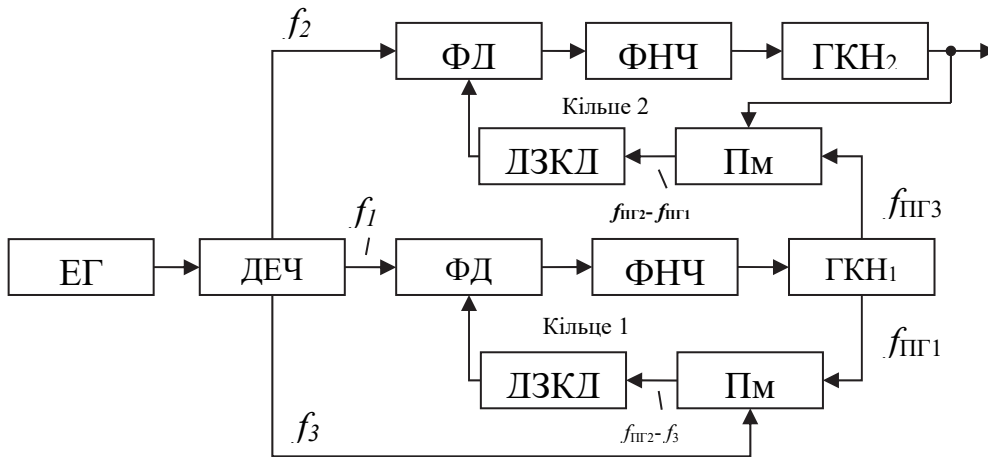


Рис. В.5. Структурна схема імпульсно-фазового синтезатора частот з декількома кільцями автопідстроювання [2]

ЕГ – еталонний генератор;
 ДЕЧ – дільник еталонної частоти;
 ФД – фазовий детектор;
 ФНЧ – фільтр низьких частот;
 ГКН – генератор, що керується напругою;
 Пм – помножувач сигналів;
 ДЗКД – дільник зі змінним коефіцієнтом ділення.

Структурну схему за варіантом В.6, якою є схема цифрової систем и фазового автопідстроювання частоти з цифровим синтезатором частот [5], наведено на рис. В.6.

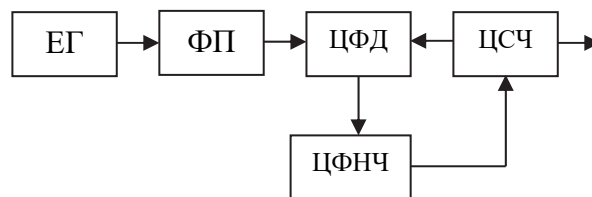


Рис. В.6. Структурна схема цифрової систем и фазового автопідстроювання частоти з цифровим синтезатором частот [5]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФП – формуючий пристрій;
 ЦФД – цифровий фазовий дискримінатор;
 ЦСЧ – цифровий синтезатор частот;
 ЦФНЧ – цифровий фільтр низьких частот.

Структурну схему за варіантом В.7, якою є схема цифрової системи фазового автопідстроювання частоти з пристроєм додавання-віднімання [5], зображено на рис. В.7.

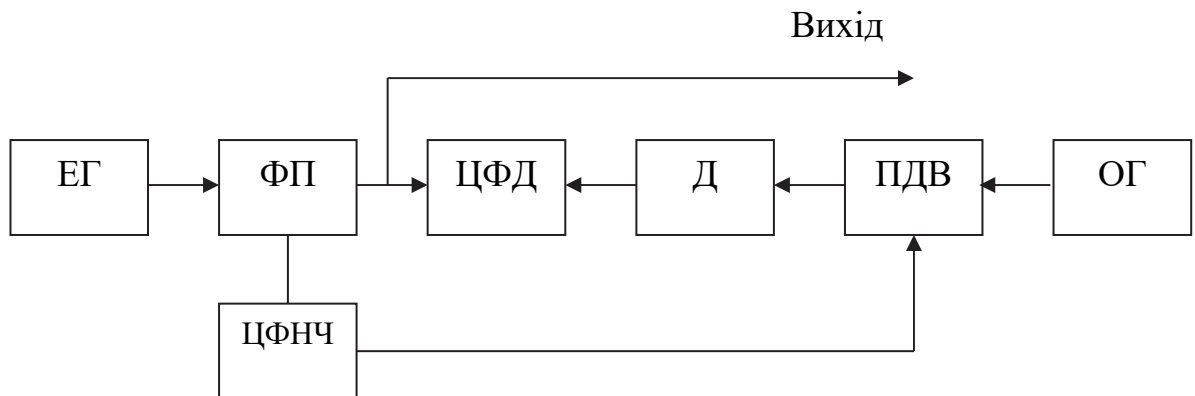


Рис. В.7. Структурна схема цифрової систем и фазового автопідстроювання частоти з пристроєм додавання-віднімання [5]

ЕГ – еталонний генератор;
 ФП – формуючий пристрій;
 ЦФД – цифровий фазовий дискримінатор;
 ЦФНЧ – цифровий фільтр низьких частот.
 ОГ – опорний генератор;
 ПДВ – пристрій додавання-віднімання;
 Д – дільник.

Структурна схема за варіантом В.8, якою є схема цифрового синтезатора частот, побудованого за методом, що заснований на обчисленні вибірок синусоїдального сигналу, зображена на рис. В.8.

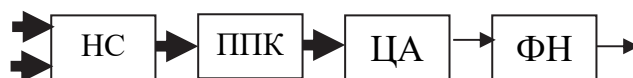


Рис. В.8. Структурна схема цифрового синтезатора частот на обчисленні вибірок синусоїдального сигналу [1]

НС – накопичувальний суматор;
 ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач;
 ППК – пристрій перетворення кодів;

ФНЧ – фільтр низьких частот.

Структурна схема дискретно-неперервної системи ФАПЧ з двоканалним керуванням, яку зображено на рис. В.9, є передостаннім варіантом В.9 вихідної множини альтернатив схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК.

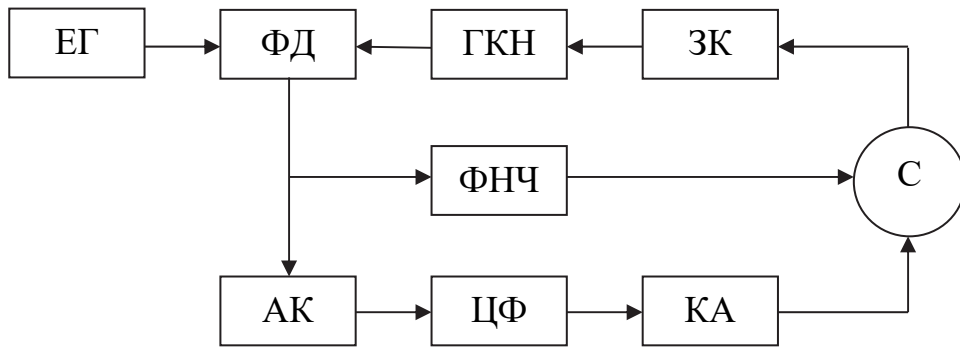


Рис. В.9. Структурна схема дискретно-неперервної систем и фазового автопідстроювання частоти з двоканалним керуванням [1]

ЕГ – еталонний генератор;
 ЦФНЧ – цифровий фільтр низьких частот.
 ПДВ – пристрій додавання-віднімання;
 АК – перетворювач аналог-код;
 КА – перетворювач код-аналог;
 С – суматор;
 ЗК – засіб керування;
 ГКН – генератор, що керується напругою;
 ЦФ – цифровий фільтр.

Структурна схема дискретно-неперервної системи фазового автопідстроювання частоти з одним цифровим колом керування, яку зображено на рис. В.10, є останнім В.10 варіантом з розглянутих варіантів вихідної множини альтернатив схемотехнічної реалізації ПФАПЧ БПП АСК.

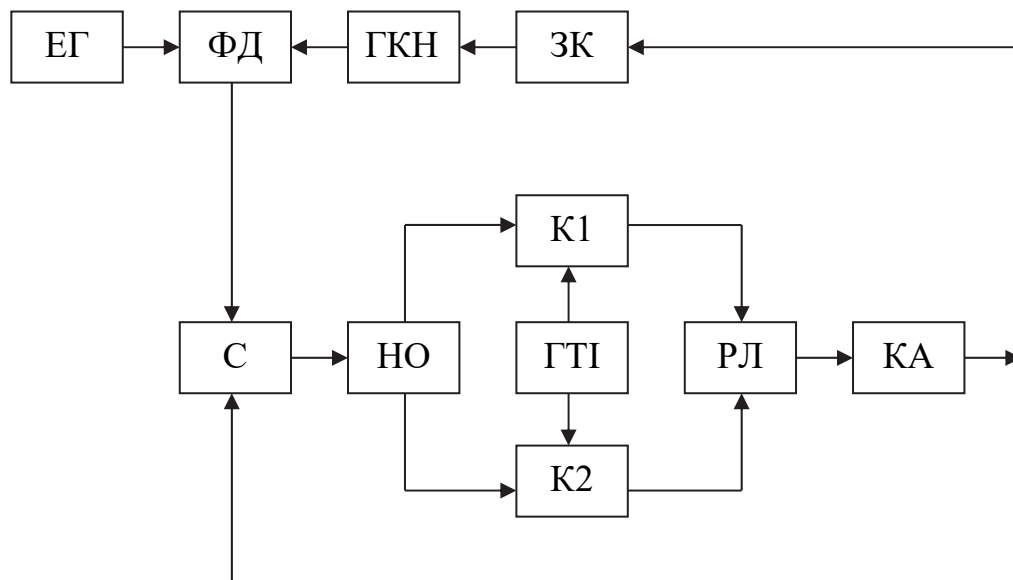


Рис. В.10. Структурна схема дискретно-неперервної системи фазового автопідстроювання частоти з одним цифровим колом керування [1]

ЕГ – еталонний генератор;

НО – нуль-орган;

К1 та К2 – ключі;

РЛ – реверсивний лічильник;

ГКН і ГТІ – відповідно генератор, що керується напругою і тактових імпульсів;

КА – перетворювач код – аналог;

С – суматор;

ЗК – засіб керування;

ФД – фазовий детектор.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шахгильдян В.В., Ляховкин А.А. Системы фазовой синхронизации с элементами дискретизации. М.: Радио и связь, 1989. - 320 с.
2. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, Д.О. Кальян. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с.

ДОДАТОК Г

РОЗКЛАДЕННЯ В РЯД ТЕЙЛОРА ВИРАЗУ ДЛЯ СУМАРНОГО ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЕФІЦІЄНТА

При послідовному з'єднанні n резисторів сумарний температурний коефіцієнт опору α_R визначається наступною формулою:

$$\alpha_R = \sum_{m=1}^n \rho_m \cdot \alpha_m = \sum_{m=1}^n \frac{R_m}{R} \cdot \alpha_{Rm} = \frac{\sum_{m=1}^n R_m \cdot \alpha_{Rm}}{\sum_{m=1}^n R_m}, \quad (\Gamma.1)$$

де $\rho_m = R_m/R$ – питома вага m -го опору в загальному опорі групи резисторів.

Для оцінки можливого відхилення функції в межах її допуску від лінійного закону, розкладемо вираз (3.1) в ряд Тейлора і порівняємо члени цього ряду різного порядку.

$$\alpha_R = (\alpha_R)_0 + \sum_i \left(\frac{\partial \alpha_R}{\partial x_i} \right)_0^{(1)} \Delta x_i + \frac{1}{2} \left[\sum_i \left(\frac{\partial \alpha_R}{\partial x_i} \right)_0^{(2)} \Delta x_i^2 \right]^{(2)} + \dots, \quad (\Gamma.2)$$

де x_i і Δx_i – відповідно кожен з $2n$ аргументів і його похибка, а нуль в індексі означає, що в нульовий член і похідні необхідно підставити ідеальні значення аргументів.

Нульовий член розкладу в ряд Тейлора матиме вигляд:

$$(\alpha_R)_0 = \left(\frac{\sum_{m=1}^n R_m \cdot \alpha_{Rm}}{\sum_{m=1}^n R_m} \right) = \sum_{m=1}^n (\rho_m)_0 \cdot (\alpha_{Rm})_0. \quad (\Gamma.3)$$

Часткові похідні першого порядку від α_R по температурним коефіцієнтам α_m однотипні, їх загальний вигляд буде наступний:

$$\frac{\partial \alpha_R}{\partial \alpha_{Rm}} = \frac{R_m}{\sum_{m=1}^n R_m} = \rho_m \quad (\Gamma.4)$$

і відповідний член першого порядку:

$$\Delta \alpha_{Rm}(\rho_m)_0 \quad (\Gamma.5)$$

Часткові похідні першого порядку по опору також однотипні, їх загальний вигляд буде:

$$\frac{\partial \alpha_R}{\partial R_m} = \frac{\alpha_{Rm} \sum_{m=1}^n R_m - \sum_{m=1}^n R_m \alpha_{Rm}}{\left[\sum_{m=1}^n R_m \right]^2}$$

або після приведення подібних членів в чисельнику:

$$\frac{\partial \alpha_R}{\partial R_m} = \frac{\sum_{k=1}^n R_k (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})}{\left[\sum_{m=1}^n R_m \right]^2} = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{R^2} (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk}).$$

Перетворимо останній вираз до виду, яким буде зручний для наступних міркувань

$$\frac{\partial \alpha_R}{\partial R_m} = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{R^2} (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk}) = \sum_{k=1}^n \frac{R_k}{R} \frac{R_m}{R} (\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk}) \frac{1}{R_m};$$

Введемо позначення питомої ваги ρ_m і ρ_k та отримаємо:

$$\frac{\partial \alpha_R}{\partial R_m} = \rho_m \frac{1}{R_m} \sum_{k=1}^n \rho_k (a_{Rm} - a_{Rk}). \quad (\Gamma.6)$$

Відповідний член першого порядку буде:

$$\Delta R_m \left[\rho_m \frac{1}{R_m} \sum_{k=1}^n \rho_k (a_{Rm} - a_{Rk}) \right] \quad (\Gamma.7)$$

Група другого порядку повинна містити: n членів з другими похідними по a_m виду

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial \alpha_m^2} \right)_0 \alpha_m^2,$$

n членів з другими похідними по R виду

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial R_m^2} \right)_0 \Delta R_m^2$$

Та члени зі змінними похідними виду

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial \alpha_m \partial \alpha_k} \right)_0 \Delta \alpha_m \Delta \alpha_k, \left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial R_m \partial R_k} \right)_0 \Delta R_m \Delta R_k, \left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial \alpha_k \partial R_m} \right)_0 \Delta \alpha_k \Delta R_m$$

загальним числом $n(2n-1)$. Розглянемо усі ці члени.

З рівняння (Г.4) отримаємо:

$$\left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial \alpha_m^2} \right) = 0,$$

у зв'язку з чим будуть рівні нулю всі n членів з такими похідними, а також будуть рівні нулю всі члени з похідними по a_m більш високого порядку.

Очевидно також що дорівнюватимуть нулю всі члени з змішаними похідними виду $\left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial \alpha_m \partial \alpha_k} \right)_0 \Delta \alpha_m \Delta \alpha_k$, так само як і всі члени зі змішаними похідними тільки за цим аргументом більш високого порядку.

Членами другого порядку виду $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial R_m^2} \right)_0 \Delta R_m^2$ можна знехтувати, оскільки ΔR_m^2 являється малими вищого порядку, так як було прийнято, що ΔR_m набагато менше порівняно з R_m . З цієї ж причини можна знехтувати і членами виду $\left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial R_m \partial R_k} \right)_0 \Delta R_m \Delta R_k$ (це вірно до значення $\Delta R / R = 0,3 / 0,4$).

Отже, із всіх членів другого порядку залишаються лише члени виду $\left(\frac{\partial^2 \alpha_R}{\partial \alpha_k \partial R_m} \right)_0 \Delta \alpha_k \Delta R_m$, величина яких заслуговує уваги оскільки Δa_{Rm} може бути одного порядку з a_{Rk} . Разом з тим видно, що ці члени можуть, бути і невеликими, якщо будуть малі ΔR_m , тобто якщо величини опорів будуть мати малий розкид.

Після диференціювання виразу (Г.6) по всім a_{Rk} , множення на Δa_{Rk} і

підсумовування отриманих результатів можна отримати наступний загальний вид членів другого порядку, що містить погрішність опору ΔR_m :

$$\Delta R_m \left[\rho_m \frac{1}{R_m} \sum_{k=1}^n \rho_k (\Delta a_{Rm} - \Delta a_{Rk}) \right]_0.$$

Об'єднуючи останній вираз з (Г.7), можна отримати загальний вигляд групи членів, що містять погрішність опору

$$(\rho_m) \frac{\Delta R_m}{(R_m)_0} \sum_{k=1}^n (A_k) [(\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})_0 + (\Delta \alpha_{Rm} - \Delta \alpha_{Rk})]. \quad (\text{Г.8})$$

З наведеного аналізу членів другого порядку видно що нерівні нулю члени третього і більш високого порядків можуть не прийматися до уваги через їхню малість. Таким чином ряд (Г.1) може бути з достатньою точністю представлений у вигляді суми (Г.2), (Г.5) і (Г.8):

$$\alpha_R \approx \sum_{m=1}^n (\rho_m)_0 \left\{ (\alpha_{Rm})_0 + \Delta \alpha_{Rm} + \frac{\Delta R_m}{(R_m)_0} \sum_{k=1}^n (\rho_k)_0 [(\alpha_{Rm} + \alpha_{Rk})_0 + (\Delta \alpha_{Rm} + \Delta \alpha_{Rk})] \right\},$$

де α_{Rm} і α_{Rk} та $\Delta \alpha_{Rm}$ і $\Delta \alpha_{Rk}$ відповідно температурні коефіцієнти та величини допусків значень m -го і k -го опору послідовно з'єднаних резисторів.

Нуль в індексі означає, що необхідно підставити ідеальні значення температурного коефіцієнта та питомої ваги опору відповідного резистора.

Останній вираз не дає поки що підстав для зневаги членами другого порядку, оскільки вони утворюють в квадратних дужках члени $(\Delta \alpha_{Rm} - \Delta \alpha_{Rk})$, які співрозмірні з членами $(\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})$ або можуть бути більше їх. У зв'язку з цим остаточну оцінку впливу членів другого порядку можна зробити тільки після дисперсії α_R .

ДОДАТОК Д

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ P4000WINXP, ЩО РОЗРОБЛЕНО У СЕРЕДОВИЩІ EMBARCADERO RAD STUDIO XE2 2012

(файл Unit1.h)

```
#include <vcl.h>
#pragma hdrstop

#include "Unit1.h"
#include <Math.h>
//-----
#pragma package(smart_init)
#pragma link "CSPIN"
#pragma link "IdBaseComponent"
#pragma link "IdComponent"
#pragma link "IdUDPBase"
#pragma link "IdUDPClient"
#pragma link "IdUDPServer"
//#pragma link "Spin"
#pragma resource "*.dfm"
TForm1 *Form1;

//-----
__fastcall TForm1::TForm1(TComponent* Owner)
: TForm(Owner)
{
    DecimalSeparator = '.'; // Точка вместо запятой для StrToFloat
    Form1->Caption = "TIMETER P4000 v"+ FloatToStr(VERSION);

    DIVIDER[0] =1;           // pS
    DIVIDER[1] =4;           // pS
    DIVIDER[2] =10;          // pS
    DIVIDER[3] =40;          // nS
    DIVIDER[4] =100;         // nS
    DIVIDER[5] =200;         // nS
    DIVIDER[6] =400;         // nS
    DIVIDER[7] =1000;        // nS
    DIVIDER[8] =2000;        // nS
    DIVIDER[9] =4000;        // nS
    DIVIDER[10] =10000;      // nS
    DIVIDER[11] =20000;     // nS
    DIVIDER[12] =40000;     // uS
    DIVIDER[13] =100000;    // uS
    DIVIDER[14] =200000;    // uS
    DIVIDER[15] =400000;    // uS
    DIVIDER[16] =1000000;    // uS
    DIVIDER[17] =2000000;    // uS
    DIVIDER[18] =4000000;    // uS
    DIVIDER[19] =10000000;   // uS
    DIVIDER[20] =20000000;   // uS
    DIVIDER[21] =40000000;   // uS

    // Отображаем кол-во наносекунд на 1 деление шкалы
    DivStr[0] = "25pS/div";
    DivStr[1] = "100pS/div";
    DivStr[2] = "250pS/div";
    DivStr[3] = "1nS/div";
}
```

```

DivStr[4] ="2.5nS/div";
DivStr[5] ="5nS/div";
DivStr[6] ="10nS/div";
DivStr[7] ="25nS/div";
DivStr[8] ="50nS/div";
DivStr[9] ="100nS/div";
DivStr[10] ="250nS/div";
DivStr[11] ="500nS/div";
DivStr[12] ="1uS/div";
DivStr[13] ="2.5uS/div";
DivStr[14] ="5uS/div";
DivStr[15] ="10uS/div";
DivStr[16] ="25uS/div";
DivStr[17] ="50uS/div";
DivStr[18] ="100uS/div";
DivStr[19] ="250uS/div";
DivStr[20] ="500uS/div";
DivStr[21] ="1000uS/div";

GraphWide = 0; // ширина линии графиков. Может содержать только 3 значения:
0,1,2: 0=1 пиксель, 1=2 пикселя, 2=3 пикселя
tMyColors.BgrndC = clWhite; // цвет фона графиков; old- clInfoBk
tMyColors.GraphC = clBlue; // цвет линии графиков
tMyColors.GraphCHLDV = clRed; // цвет графиков в режиме HOLDOVER
tMyColors.GridC = clSilver; // цвет сетки графиков; old- clGray
tMyColors.MarksC = clRed; // цвет маркеров графиков
tMyColors.SelLineC = clGreen; // цвет маркера для выбранной строки

Image1->Width = IMAGE_WIDTH; // default- 701
Image2->Width = IMAGE_WIDTH; // default- 701

Image1->Canvas->Brush->Color = tMyColors.BgrndC;
Image2->Canvas->Brush->Color = tMyColors.BgrndC;

// Инициализация графика 1
Image1->Canvas->FillRect( Rect(0,0,Image1->Width,Image1->Height) );

// Инициализация графика 2
Image2->Canvas->FillRect( Rect(0,0,Image2->Width,Image2->Height) );

UDPCliet1->Active = FALSE; // запрет работы
UDPServer1->Active = FALSE; // запрет работы
Edit3->Text = "192.168.1.15";
Edit4->Text = IntToStr(6000); // Edit4->Text = IntToStr(5000);
Edit5->Text = IntToStr(6001); // Edit5->Text = IntToStr(5001);

// Инициализация ComboBox1
ComboBox1->Items->Add(" ADTD");
ComboBox1->Items->Add(" Channel C0");
ComboBox1->Items->Add(" Channel C1");
ComboBox1->Items->Add(" Channel C2");
ComboBox1->Items->Add(" Channel C3");
ComboBox1->Items->Add(" IDLE");
//ComboBox1->ItemIndex = 0;

// Инициализация ComboBox2
ComboBox2->Items->Add(" ADTD");
ComboBox2->Items->Add(" Channel C0");
ComboBox2->Items->Add(" Channel C1");
ComboBox2->Items->Add(" Channel C2");
ComboBox2->Items->Add(" Channel C3");
ComboBox2->Items->Add(" IDLE");
//ComboBox2->ItemIndex = 0;

// Инициализация переменных
TForm1::DefaultParam();

```

```

// Инициализация текстовых редакторов
TForm1::Memo1->Clear();

// Инициализация надписи на LABELs
Label6->Caption = IntToStr(0);
Label7->Caption = IntToStr(0);
Label8->Caption = IntToStr(0);
Label9->Caption = IntToStr(0);
Label10->Caption = IntToStr(0);
Label11->Caption = IntToStr(0);
Label12->Caption = IntToStr(0);
Label13->Caption = IntToStr(0);

//UDPServer1->DefaultPort = StrToInt(Edit5->Text);
//UDPServer1->DefaultPort = 6001;
//UDPServer1->Bindings->Add()->IP = "0.0.0.0";
//UDPServer1->Bindings->Add()->Port = 6001;
//UDPServer1->Bindings->Delete()
TForm1::Draw_C();
}
//-----

void __fastcall TForm1::DefaultParam(void)
{
    // Установка параметров по умолчанию, использующиеся более одного раза
    ReviewMode = 0;      // режим обзора, т.е. когда весь график выводится на экран (с
    прореживанием)
    TForm1::ReviewModeSetup( ReviewMode );
    UpDown1->Position = 0;      // Инициализация кнопок горизонт. прокрутки
    iGraphShift = 0; // сброс листателя страниц
    tSelLine.SelectedLineNum = 0;
    tSelLine.ShowedLineNum = 0;
    ComboBox1->ItemIndex = 0;
    ComboBox2->ItemIndex = 0;
    iTotalSamples = 0; // счётчик строк, полученных от P4000
    m1 = DIVIDER_MAXVAL-1;      // Масштаб Image1
    m2 = DIVIDER_MAXVAL-1;      // Масштаб Image2
    f1 = 0;                      // сдвиг по вертикали Image1
    f2 = 0;                      // сдвиг по вертикали Image2
    divider1 = DIVIDER[m1];
    divider2 = DIVIDER[m2];
    shift1 = f1 * DIVIDER[m1];
    shift2 = f2 * DIVIDER[m2];
    Scale1StaticText->Caption = DivStr[m1];
    Offset1StaticText->Caption = IntToStr(f1)+"nS";
    Scale2StaticText->Caption = DivStr[m2];      //Scale2StaticText->Caption = FloatToStr(m2);
    Offset2StaticText->Caption = IntToStr(f2)+"nS";
    TForm1::Yscale1();      // вызов функции пересчёта значений шкалы Y Графика1
    TForm1::Yscale2();      // вызов функции пересчёта значений шкалы Y Графика2
    TForm1::Xscale1(0, IMAGEX_STEP); // вызов функции расстановки значений шкалы X
Графика1
}
//-----

void __fastcall TForm1::Exit1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    Application->Terminate(); //Close();
}
//-----

void __fastcall TForm1::About1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    FormAbout->ShowModal();
    //ShowMessage(IntToStr(UDPServer1->DefaultPort));
}

```



```

        //ShowMessage("UDPServer after bind port "+IntToStr(UDPServer1->DefaultPort));
    }
    //-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton1DownClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВНИЗ
    // Декремент SCALE1 Уменьшение амплитуды Image1 ***
    int tmp;

    tmp = m1;
    if( --tmp <= 0 )
        tmp = 0;
    m1 = tmp;
    divider1 = DIVIDER[m1];      // извлекаем из массива значение делителя
    Scale1StaticText->Caption = DivStr[m1];
    TForm1::Draw_C(); // функция отнократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton1UpClick(TObject * /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВВЕРХ
    // Инкремент SCALE1 Увеличение амплитуды Image1 ***
    int tmp;

    tmp = m1;
    if( ++tmp >= DIVIDER_MAXVAL )
        tmp = DIVIDER_MAXVAL-1;
    m1 = tmp;
    divider1 = DIVIDER[m1];      // извлекаем из массива значение делителя
    Scale1StaticText->Caption = DivStr[m1];
    TForm1::Draw_C(); // функция отнократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton2DownClick(TObject * /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВНИЗ
    // *** Сдвиг Image1 по вниз вертикали ***
    double dtmp;
    shift1 += 5 * DIVIDER[m1];
    dtmp = (double)shift1 / 1000.0;
    Offset1StaticText->Caption = FloatToStr(dtmp)+"nS";
    //Offset1StaticText->Caption = IntToStr(shift1)+"nS";
    TForm1::Draw_C(); // функция отнократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton2UpClick(TObject * /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВВЕРХ
    // *** Сдвиг Image1 по вверх вертикали ***
    double dtmp;
    shift1 -= 5 * DIVIDER[m1];
    dtmp = (double)shift1 / 1000.0;
    Offset1StaticText->Caption = FloatToStr(dtmp)+"nS";
    //Offset1StaticText->Caption = IntToStr(shift1)+"nS";
    TForm1::Draw_C(); // функция отнократной отрисовки Imagea
}
//-----

```

```

void __fastcall TForm1::CSpinButton4DownClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВНИЗ
    // *** Сдвиг Image2 по вниз вертикали ***
    double dtmp;
    shift2 += 5 * DIVIDER[m2];
    dtmp = (double)shift2 / 1000.0;
    Offset2StaticText->Caption = FloatToStr(dtmp)+"nS";
    //Offset2StaticText->Caption = IntToStr(shift2)+"nS";
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton4UpClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВВЕРХ
    // *** Сдвиг Image2 по вверх вертикали ***
    double dtmp;
    shift2 -= 5 * DIVIDER[m2];
    //Offset2StaticText->Caption = IntToStr(shift2)+"nS";
    dtmp = (double)shift2 / 1000.0;
    Offset2StaticText->Caption = FloatToStr(dtmp)+"nS";
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton3DownClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВНИЗ
    // Декремент SCALE2 Уменьшение амплитуды Image2 ***
    int tmp;

    tmp = m2;
    if( --tmp <= 0 )
        tmp = 0;
    m2 = tmp;
    divider2 = DIVIDER[m2]; // извлекаем из массива значение делителя
    Scale2StaticText->Caption = DivStr[m2];
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::CSpinButton3UpClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Стрелка ВВЕРХ
    // Инкремент SCALE2 Увеличение амплитуды Image2 ***
    int tmp;

    tmp = m2;
    if( ++tmp >= DIVIDER_MAXVAL )
        tmp = DIVIDER_MAXVAL-1;
    m2 = tmp;
    divider2 = DIVIDER[m2]; // извлекаем из массива значение делителя
    Scale2StaticText->Caption = DivStr[m2];
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::LoadFile1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // *** Пункт меню 'FILE->LOAD FILE' ***
    TForm1::LoadFile(); // Вызов функции открытия файла
}

```

```

TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::SaveAs1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // *** Пункт меню 'FILE->SAVE AS' ***
    // *** Функция диалога SAVE AS.. ***
    if(SaveDialog1->Execute())
    {
        ListBox1->Items->SaveToFile(SaveDialog1->FileName);
    }
}
//-----

void TForm1::LoadFile(void)
{
    // *** Load File function ***
    AnsiString str; // строковая переменная для хранения одной строки
    int iFileHandle=0; // File Handle
    TDateTime tNow;

    tNow = Now();
    Memo1->Clear();

    if( OpenFileDialog1->Execute() )
    {
        // Проверяем, открылся ли файл
        if( iFileHandle < 0 )
        {
            ShowMessage("File can't be opened!");
        }
        else
        {
            //iGraphShift = 0; // сброс листателя страниц
            TForm1::DefaultParam(); // Уст. все параметры по умолчанию
            ListBox1->Items->Clear();
            ListBox1->Items->LoadFromFile(OpenDialog1->FileName);
            iTotalSamples = ListBox1->Items->Count; // получаем число считанных из
            файла строк (т.е. выборок)
            Label45->Caption = IntToStr(iTotalSamples); // выводим число строк на форму

            // Выводим некоторую информацию в Информационное Окно
            Memo1->Lines->Add( "-----" );
            str = TimeToStr(tNow);
            str += " ";
            str += DateToStr(tNow);
            Memo1->Lines->Add(str);
            Memo1->Lines->Add("Opened file: ");
            str= OpenFileDialog1->FileName;
            Memo1->Lines->Add( str );
            Memo1->Lines->Add( "Lines: "+IntToStr(iTotalSamples) );

            // закрываем открытый файл
            FileClose( iFileHandle );

            // Готовим смещение, чтобы отображать только последние 700 выборок
            // Такой же участок кода в функции UDPServer1UDPread()
            if( (ListBox1->GetCount()-IMAGE_WIDTH) > 0 )
            iGraphShift = ListBox1->GetCount()-IMAGE_WIDTH;
            else
            iGraphShift = 0;

```

```

    }
}
//-----

void __fastcall TForm1::Image1MouseDown(TObject* /*Sender*/,
    TMouseButton /*Button*/, TShiftState /*Shift*/, int X, int Y)
{
    // *** MouseDown Click on Image1 ***
    static int cnt;    // счётчик нажатий. Считаем только два нажатия

    if( cnt == 0 )
    {
        tImgCursor.tImg1.XA = X;    // Координата X точки 1 на графике Image1
        tImgCursor.tImg1.YA = Y;    // Координата Y точки 1 на графике Image1
        cnt = 1;
    }
    else
    {
        tImgCursor.tImg1.XB = X;    // Координата X точки 2 на графике Image1
        tImgCursor.tImg1.YB = Y;    // Координата Y точки 2 на графике Image1
        cnt = 0;
    }
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::Image2MouseDown(TObject* /*Sender*/,
    TMouseButton /*Button*/, TShiftState /*Shift*/, int X, int Y)
{
    // *** MouseDown Click on Image2 ***
    static int cnt;    // счётчик нажатий. Считаем только два нажатия

    if( cnt == 0 )
    {
        tImgCursor.tImg2.XA = X;    // Координата X точки 1 на графике Image2
        tImgCursor.tImg2.YA = Y;    // Координата Y точки 1 на графике Image2
        cnt = 1;
    }
    else
    {
        tImgCursor.tImg2.XB = X;    // Координата X точки 2 на графике Image2
        tImgCursor.tImg2.YB = Y;    // Координата Y точки 2 на графике Image2
        cnt = 0;
    }
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button2Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // *** Кнопка ZOOM канала C0 ***
    Form3->Show();
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button5Click(TObject* /*Sender/ */)
{
    // *** Кнопка ZOOM канала C1 ***
    Form4->Show();
}
//-----

```

```

void __fastcall TForm1::Set1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // Меню UDP SETTINGS

    Form5->Show();
    // При закрытии формы ShowModal() возвращает 2
    //if( Form5->ShowModal() == 2 )
    //{
    //    Label52->Caption = Form5->Str5;
    //}
}
//-----

void __fastcall TForm1::Xscale1(int Start, int Step)
{
    // Расстановка горизонтальных меток на Графике2
    Label21->Caption = IntToStr(Start);
    Label22->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label23->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label24->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label25->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label26->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label27->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label28->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label29->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label30->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label31->Caption = IntToStr(Start += Step);
    Label32->Caption = IntToStr(Start += Step);
}
//-----

void __fastcall TForm1::UDPServer1UDPRead(TIdUDPListenerThread* /*AThread*/, TBytes AData,
TIdSocketHandle* /*ABinding*/)
{
    int strpos;
    AnsiString aStr;

    // С каждым пакетом UDP от P4000 добавляем строку в ListBox1
    aStr = BytesToString(AData);
    // удаляем два последних \r\n, которые добавляет, по всей видимости, метод Add()
    strpos = aStr.Pos("\r\n");
    if(strpos != 0)
        aStr.Delete(strpos,2);
    ListBox1->Items->Add(aStr);
    Label45->Caption = IntToStr(iTotalSamples);           // выводим число принятых от P4000
выборок

    // Готовим смещение, чтобы отображать только последние 700 выборки
    // Такой же участок кода в функции LoadFile
    if( (ListBox1->GetCount()-IMAGE_WIDTH) > 0 )
        iGraphShift = ListBox1->GetCount()-IMAGE_WIDTH;
    else
        iGraphShift = 0;

    // Следующие 2 строки делают так, чтобы активной всегда была последняя строка
    (авт.скроллинг вверх при поступлении новых данных)
    iTotalSamples = ListBox1->GetCount();
    ListBox1->ItemIndex = iTotalSamples-1;
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::BitBtn1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка "CONNECT"

```

```

static int flag;
int r;

//BitBtn1->PressedImageIndex
// Отправка первого пакета для создания канала
if( flag == 0 )
{
    flag = 1;

    ListBox1->Clear();      // Удаляем содержимое ListBox1
    TForm1::DefaultParam(); // Инициализация переменных

    AnsiString Str = "Test string from Builder";
    AnsiString StrTmp;
    TDateTime tNow;
    tNow = Now();

    // Включение UDP Client
    UDPClient1->Host = Edit3->Text; // "192.168.1.15"
    UDPClient1->Port = StrToInt(Edit4->Text); // port: 5000
    UDPClient1->Active = TRUE;
    // Включение UDP Server
    UDPServer1->Bindings->Clear();
    //UDPServer1->DefaultPort = StrToInt(Edit5->Text); // port: 5001
    UDPServer1->Bindings->Add()->Port = StrToInt(Edit5->Text);
    //UDPServer1->Bindings->Add()->IP = "0.0.0.0";
    UDPServer1->Active = TRUE;

    // Отключение полей редактирования IP и портов
    Edit3->Enabled = FALSE; // отключаем редактор адреса IP
    Edit4->Enabled = FALSE; // отключаем редактор удалённого порта UDP (5000)
    Edit5->Enabled = FALSE; // отключаем редактор локального порта UDP (5001)
    LoadFile1->Enabled = FALSE; // отключаем пункт меню LoadFile
    // Включение кнопок
    // Меняем надпись на кнопке BITBTN1
    BitBtn1->Font->Style = BitBtn1->Font->Style << fsBold;
    BitBtn1->Font->Color = clRed;
    BitBtn1->Caption = "Close Port+Save";

    Button3->Enabled = TRUE;
    Button6->Enabled = TRUE;
    // Отправляем сообщение в плату TIMETER P4000
    UDPClient1->Send(Str);
    // Выдаём положительное сообщение пользователю

    Memo1->Lines->Add("-----");
    StrTmp = TimeToStr(tNow);
    StrTmp += " ";
    StrTmp += DateToStr(tNow);
    Memo1->Lines->Add(StrTmp);
    Memo1->Lines->Add("Remote IP:" + Edit3->Text);
    Memo1->Lines->Add("Rem. Port:" + Edit4->Text);
    Memo1->Lines->Add("Local Port:" + Edit5->Text);
    Memo1->Lines->Add("To the P4000 was sent: "+Str);
}
else
{
    flag = 0;
    // Отключение кнопок
    // Меняем надпись на кнопке BITBTN1
    BitBtn1->Font->Style = BitBtn1->Font->Style << fsBold;
    BitBtn1->Font->Color = clBlue;
}

```

```

BitBtn1->Caption = "Open Port";

Button3->Enabled = FALSE;
Button6->Enabled = FALSE;
// Включение полей редактирования IP и портов
Edit3->Enabled = TRUE; // включаем редактор адреса IP
Edit4->Enabled = TRUE; // включаем редактор удалённого порта UDP (5000)
Edit5->Enabled = TRUE; // включаем редактор локального порта UDP (5001)
LoadFile1->Enabled = TRUE; // включаем пункт меню LoadFile
// Отключение UDP Client
UDPCClient1->Active = FALSE;
// Отключение UDP Server
//UDPServer1->Binding->CloseSocket();
UDPServer1->Active = FALSE;
//UDPServer1->DefaultPort = RemPort; // 5001
//UDPServer1->Binding->Bind();
UDPServer1->Bindings->Clear();

// *** Открываем диалог SAVE FILE ***
// чтобы сохранить содержимое ListBox1
if(SaveDialog1->Execute())
{
    ListBox1->Items->SaveToFile(SaveDialog1->FileName);
}
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button3Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка "START REPORT"
    AnsiString StrTmp;
    TDateTime tNow;
    tNow = Now();

    // Отправка пакета с командой начать передачу отчёта
    //ShowMessage("Start report");
    //UDPCClient1->Host = ERemIP->Text;
    //UDPCClient1->Host = "192.168.1.15";
    //UDPCClient1->Port = StrToInt(ERemPort->Text);
    //UDPCClient1->Port = 5000;
    UDPCClient1->Host = Edit3->Text; // "192.168.1.15"
    UDPCClient1->Port = StrToInt(Edit4->Text); // port: 5000
    UDPCClient1->Connect();

    Memo1->Lines->Add("-----");
    StrTmp = TimeToStr(tNow);
    StrTmp += " ";
    StrTmp += DateToStr(tNow);
    Memo1->Lines->Add(StrTmp);
    Memo1->Lines->Add("Remote IP:" + Edit3->Text);
    Memo1->Lines->Add("Rem. Port:" + Edit4->Text);
    Memo1->Lines->Add("Local Port:" + Edit5->Text);

    if( UDPCClient1->Connected() == TRUE )
    {
        UDPCClient1->Send("r");
        // Выдаём положительное сообщение пользователю
        Memo1->Lines->Add("Was sent command <r>");
    }
    else
    {

```

```

        // Выдаём отрицательное сообщение пользователю
        Memo1->Lines->Add("Socket could not be opened");
    }
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button6Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка "START REPORT"

    AnsiString StrTmp;
    TDateTime tNow;
    tNow = Now();
    // Отправка пакета с командой прекратить передачу отчёта
    //ShowMessage("Stop report");
    //UDPClient1->Host = ERemIP->Text;
    //UDPClient1->Host = "192.168.1.15";
    //UDPClient1->Port = StrToInt(ERemPort->Text);
    //UDPClient1->Port = 5000;
    UDPClient1->Host = Edit3->Text;      // "192.168.1.15"
    UDPClient1->Port = StrToInt(Edit4->Text);      // port: 5000

    Memo1->Lines->Add("-----");
    StrTmp = TimeToStr(tNow);
    StrTmp += " ";
    StrTmp += DateToStr(tNow);
    Memo1->Lines->Add(StrTmp);
    Memo1->Lines->Add("Remote IP:" + Edit3->Text);
    Memo1->Lines->Add("Rem. Port:" + Edit4->Text);
    Memo1->Lines->Add("Local Port:" + Edit5->Text);

    UDPClient1->Connect();
    if( UDPClient1->Connected() == TRUE )
    {
        UDPClient1->Send("s");
        // Выдаём положительное сообщение пользователю
        Memo1->Lines->Add("Was sent command <s>");
    }
    else
    {
        // Выдаём отрицательное сообщение пользователю
        Memo1->Lines->Add("Socket could not be opened");
    }
}
//-----

void __fastcall TForm1::Yscale1(void)
{
    // *** Функция пересчёта значений шкалы Y графика ***
    AnsiString str;
    __int64 Y0, Y25, Y50, Y75, Y100, Y125, Y150, Y175, Y200, i64div, i64shf;

    // Определяем масштаб выводимых подписей: pS, nS, uS, mS
    // Если произведение делителя на размер шкалы по вертикали больше 1000 -
    // значит, диапазон в микросекундах
    i64div = (__int64)divider1;
    i64shf = (__int64)shift1;

    if( divider1 < 100 )
    {
        Y0  = (100 * i64div) + i64shf;
        Y25 = (75  * i64div) + i64shf;
        Y50 = (50  * i64div) + i64shf;
    }
}

```



```

        Y75 = (25 * i64div) + i64shf;
        Y100 = (0 * i64div) + i64shf;
        Y125 = (-25 * i64div) + i64shf;
        Y150 = (-50 * i64div) + i64shf;
        Y175 = (-75 * i64div) + i64shf;
        Y200 = (-100 * i64div) + i64shf;
        str = "pS";
    }
    else if( (divider1 >= 100) && (divider1 < 50000) )
    {
        Y0 = (100 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y25 = (75 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y50 = (50 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y75 = (25 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y100 = (0 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y125 = (-25 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y150 = (-50 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y175 = (-75 * i64div + i64shf) / 1000;
        Y200 = (-100 * i64div + i64shf) / 1000;
        str = "nS";
    }
    else
    {
        Y0 = (100 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y25 = (75 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y50 = (50 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y75 = (25 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y100 = (0 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y125 = (-25 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y150 = (-50 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y175 = (-75 * i64div + i64shf) / 1000000;
        Y200 = (-100 * i64div + i64shf) / 1000000;
        str = "uS";
    }
    Label_G1_Y0->Caption = IntToStr(Y0)+ str; // +100
    Label_G1_Y25->Caption = IntToStr(Y25)+ str; // +75
    Label_G1_Y50->Caption = IntToStr(Y50) + str; // +50
    Label_G1_Y75->Caption = IntToStr(Y75) + str; // +25
    Label_G1_Y100->Caption = IntToStr(Y100) + str; // 0
    Label_G1_Y125->Caption = IntToStr(Y125) + str; // -25
    Label_G1_Y150->Caption = IntToStr(Y150) + str; // -50
    Label_G1_Y175->Caption = IntToStr(Y175) + str; // -75
    Label_G1_Y200->Caption = IntToStr(Y200) + str; // -100
}
//-----

void __fastcall TForm1::Yscale2(void)
{
    // *** Функция пересчёта значений шкалы Y графика ***
    AnsiString str;
    __int64 Y0, Y25, Y50, Y75, Y100, Y125, Y150, Y175, Y200, i64div, i64shf;

    // Определяем масштаб выводимых подписей: pS, nS, uS, mS
    // Если произведение делителя на размер шкалы по вертикали больше 1000 -
    // значит, диапазон в микросекундах
    i64div = (__int64)divider2;
    i64shf = (__int64)shift2;

    if( divider2 < 100 )
    {
        Y0 = (100 * i64div) + i64shf;
        Y25 = (75 * i64div) + i64shf;
        Y50 = (50 * i64div) + i64shf;
        Y75 = (25 * i64div) + i64shf;
        Y100 = (0 * i64div) + i64shf;
        Y125 = (-25 * i64div) + i64shf;
        Y150 = (-50 * i64div) + i64shf;
        Y175 = (-75 * i64div) + i64shf;
        Y200 = (-100 * i64div) + i64shf;
        str = "pS";
    }
}

```

```

else if( (divider2 >= 100) && (divider2 < 50000) )
{
    Y0 = (100 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y25 = (75 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y50 = (50 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y75 = (25 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y100 = (0 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y125 = (-25 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y150 = (-50 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y175 = (-75 * i64div + i64shf) / 1000;
    Y200 = (-100 * i64div + i64shf) / 1000;
    str = "nS";
}
else
{
    Y0 = (100 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y25 = (75 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y50 = (50 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y75 = (25 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y100 = (0 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y125 = (-25 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y150 = (-50 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y175 = (-75 * i64div + i64shf) / 1000000;
    Y200 = (-100 * i64div + i64shf) / 1000000;
    str = "uS";
}
Label_G2_Y0->Caption = IntToStr(Y0) + str; // +100
Label_G2_Y25->Caption = IntToStr(Y25) + str; // +75
Label_G2_Y50->Caption = IntToStr(Y50) + str; // +50
Label_G2_Y75->Caption = IntToStr(Y75) + str; // +25
Label_G2_Y100->Caption = IntToStr(Y100) + str; // 0
Label_G2_Y125->Caption = IntToStr(Y125) + str; // -25
Label_G2_Y150->Caption = IntToStr(Y150) + str; // -50
Label_G2_Y175->Caption = IntToStr(Y175) + str; // -75
Label_G2_Y200->Caption = IntToStr(Y200) + str; // -100
}
//-----

void __fastcall TForm1::Draw_C(void)
{
    Graphics::TBitmap *BmpTmp1; // указатель на глобальный временный буфер
    Graphics::TBitmap *BmpTmp2; // указатель на временный граф.буфер
    int Lines, c;
    int OffsetX; // смещение от начала массива строк, с которого начинается вывод на График1
и 2
    int EndX, Step;
    int StartX; // начальная позиция
    int sec;
    int iteration=0; // 1- разрешает производить итерацию вычисления
    DATA_SAMPLE tDataA1={0}, tDataA2={0}, tDataB1={0}, tDataB2={0}, tDataC={0}, tDataL1={0},
tDataR1={0}, tDataL2={0}, tDataR2={0};
    MARK_SAMPLE tMarks1, tMarks2;
    double dError, dStep;
    int TmpCnt;

    // *** Подготовка временного буфера для графика Image1 ***
    BmpTmp1 = new Graphics::TBitmap; // указатель на глобальный временный буфер
    BmpTmp1->PixelFormat = pf8bit; // включаем самый быстрый режим
    //BmpTmp1->PixelFormat = pf24bit; // включаем не самый быстрый режим
    BmpTmp1->Width = Image1->Width; // задаём размер X временный буфера
    BmpTmp1->Height = Image1->Height; // задаём размер Y временный буфера
    //BmpTmp1->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GraphC;
    BmpTmp1->Canvas->Pen->Width = GraphWide+1; // ширина линии графиков. Может
содержать только 3 значения: 0,1,2: 0=1 пиксель, 1=2 пикселя, 2=3 пикселя

    // *** Подготовка временного буфера для графика Image2 ***
    BmpTmp2 = new Graphics::TBitmap; // указатель на глобальный временный буфер
    BmpTmp2->PixelFormat = pf8bit; // включаем самый быстрый режим

```

```

//BmpTmp2->PixelFormat = pf24bit; // включаем не самый быстрый режим
BmpTmp2->Width = Image2->Width; // задаём размер X временный буфера
BmpTmp2->Height = Image2->Height; // задаём размер Y временный буфера
BmpTmp2->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GraphC;
BmpTmp2->Canvas->Pen->Width = GraphWide+1; // ширина линии графиков. Может
содержать только 3 значения: 0,1,2: 0=1 пиксель, 1=2 пикселя, 2=3 пикселя

// Закрашиваем фон Image1
BmpTmp1->Canvas->Brush->Color = tMyColors.BgrndC; // Выбираем цвет кисти
BmpTmp1->Canvas->FillRect(Rect(0,0,Image1->Width,Image1->Height)); // заполняем буфер
выбранным цветом
// Закрашиваем фон Image2
BmpTmp2->Canvas->Brush->Color = tMyColors.BgrndC; // Выбираем цвет кисти
BmpTmp2->Canvas->FillRect(Rect(0,0,Image2->Width,Image2->Height)); // заполняем буфер
выбранным цветом

BmpTmp1->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GridC;
BmpTmp2->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GridC;

// Рисуем горизонтальные линии сетки Images
for(int y=0; y < Image1->Height; y += 25 )
{
    if(y == 100)
    {
        // Рисуем центральную линию удвоенной ширины
        BmpTmp1->Canvas->Pen->Width = 2; // ширина линии сетки 3 пикселя
        BmpTmp2->Canvas->Pen->Width = 2; // ширина линии сетки 3 пикселя
    }
    else
    {
        BmpTmp1->Canvas->Pen->Width = 0; // ширина линии сетки 1 пиксель
        BmpTmp2->Canvas->Pen->Width = 0; // ширина линии сетки 1 пиксель
    }
    BmpTmp1->Canvas->MoveTo(0,y);
    BmpTmp1->Canvas->LineTo(Image1->Width,y);
    BmpTmp2->Canvas->MoveTo(0,y);
    BmpTmp2->Canvas->LineTo(Image1->Width,y);

    //
    //
    //
    //
    //
    for (int x = 0; x <= Image1->Width; x++)
    {
        BmpTmp1->Canvas->Pixels[x][y] = tMyColors.GridC;
        BmpTmp2->Canvas->Pixels[x][y] = tMyColors.GridC;
    }
}

// Рисуем вертикальные линии сетки Images
for(int x=0; x < Image1->Width; x += 60 ) // old-70; old- 100
{
    BmpTmp1->Canvas->MoveTo(x,0);
    BmpTmp1->Canvas->LineTo(x,Image1->Height);
    BmpTmp2->Canvas->MoveTo(x,0);
    BmpTmp2->Canvas->LineTo(x,Image1->Height);

    //
    //
    //
    //
    //
    for (int y = 0; y <= Image1->Height; y++)
    {
        BmpTmp1->Canvas->Pixels[x][y] = tMyColors.GridC;
        BmpTmp2->Canvas->Pixels[x][y] = tMyColors.GridC;
    }
}

// Рисуем вертикальные линии маркеров

```

```

for (int y = 0; y <= Image1->Height; y++)
{
    BmpTmp1->Canvas->Pixels[tImgCursor.tImg1.XA][y] = tMyColors.MarksC;
    BmpTmp1->Canvas->Pixels[tImgCursor.tImg1.XB][y] = tMyColors.MarksC;
    BmpTmp2->Canvas->Pixels[tImgCursor.tImg2.XA][y] = tMyColors.MarksC;
    BmpTmp2->Canvas->Pixels[tImgCursor.tImg2.XB][y] = tMyColors.MarksC;
    // Рисуем линию выбранной строки
    if( tSelLine.SelectedLineNum > 0 )
    {
        BmpTmp1->Canvas->Pixels[tSelLine.SelectedLineNum][y] = tMyColors.SelLineC;
        BmpTmp2->Canvas->Pixels[tSelLine.SelectedLineNum][y] = tMyColors.SelLineC;
    }
}

// Выбираем режим отображения пикселей на графике.
// Если полученных данных (т.е. строк) меньше чем размер поля по X, каждый
// новый пиксель добавляем справа, не изменяя положения ранее выведенных пикселей.
// Если данных получено больше, то новые пиксели добавляем в самую правую позицию, при
этом
// ранее выведенные пиксели смещаются на один влево.
Lines = ListBox1->GetCount(); // Получаем количество строк в ListBox1 (полученных от P4000)

// Предварительные установки.
// На экраны выводятся первые 700 элементов массива выборок
OffsetX = 0;
EndX = IMAGE_WIDTH; // EndX = 25;
if( Lines <= IMAGE_WIDTH ) // if( Lines <= 25 )
{
    if(Lines > 1)
    {
        OffsetX = 0;
        EndX = Lines;
    }
    else
    {
        // Установкой нулей отключаем вывод пикселя на график
        OffsetX = 0;
        EndX = 0;
    }
}
else
{
    // смещаем окно графиков в конец массива, чтобы отобразить только последние 700 выборок
    OffsetX = iGraphShift;
    EndX = IMAGE_WIDTH; // EndX = 25;
}

if( (OffsetX < 0) || (OffsetX > (Lines-IMAGE_WIDTH)) ) // OffsetX >= 1449
    OffsetX = 0;
StartX = OffsetX; // сохраняем число, пригодится в конце функции

//Label41->Caption = IntToStr(OffsetX);
//Label42->Caption = IntToStr(Lines);
//Label51->Caption = IntToStr(OffsetX);
//Label52->Caption = IntToStr(EndX);
//Label41->Caption = IntToStr(iGraphShift);
//Label42->Caption = IntToStr(iUDPlines);
//Label51->Caption = IntToStr(OffsetX);
//Label52->Caption = IntToStr(Lines-Image1->Width);

// Проверяем, включен ли режим ОБЗОР (OVERVIEW)

```

```

    if( ReviewMode == 1 ) // если режим обзора, выводится на экран весь график (с
    прореживанием)
    {
        // Если число данных (строк) больше чем разрешение экранчика по горизонтали
        if( ListBox1->GetCount() > (IMAGE_WIDTH + 10) )
        {
            dStep = (double)IMAGE_WIDTH / (double)ListBox1->GetCount();
        }
        else
        {
            dStep = 1.0;
        }
        Label42->Caption = FloatToStrF(dStep,ffFixed, 4,4);
        EndX = ListBox1->GetCount();
        OffsetX = 0;
    }
    dError = 0;
    TmpCnt = 0;

    //-----
    // Считывание в цикле массива выборок из ListBox1
    for( c=0; c<EndX; c++ )
    {
        long Yd1, Yd2, PX1, PY1, PX2, PY2;
        unsigned long idx;
        int INTEG, DAC;
        double dt, tmp1, tmp2;
        AnsiString aStr;

        PX1 = PX2 = c;

        // Чтение строки данных из ListBox
        // Вычисление индекса массива. Вынесено в отдельную строку чтобы
        // проконтролировать его возможный выход за границы массива.
        idx = c + OffsetX;

        // Проверяем, включен ли режим ОБЗОР (OVERVIEW)
        if( ReviewMode == 1 ) // если режим обзора, выводится на экран весь график (с
        прореживанием)
        {
            dError += dStep; // Вычисление ошибки
            if( dError > 1.0 )
            {
                dError -= 1.0;
                iteration = 1; // 1- разрешает производить итерацию вычисления
                TmpCnt++;
                PX1 = PX2 = TmpCnt;
            }
            else
            {
                iteration = 0; // 0- запрещает производить итерацию вычисления
                idx = 0;
            }
        }
        else
        {
            iteration = 1; // 1- разрешает производить итерацию вычисления
        }

        // Защита от превышения индекса массива
        if( idx < 0 )
            idx = 0;
    }

```

```

        if( iteration == 1 )
        {
            //if( c < 30 )
            //{
//Memo1->Lines->Add(IntToStr((int)idx)+" ");
//}

            aStr = ListBox1->Items->Strings[idx];
            //Label51->Caption = "[" + IntToStr((int)(c+OffsetX));
            sscanf( aStr.c_str(), "%8d d=%5d C0=%12lf C1=%12lf INT=%d DAC=%6d
dP/dt=%11lf F=%8X",
            &tDataC.u32time, &tDataC.adtd, &tDataC.c0, &tDataC.c1, &INTEG, &DAC, &dt,
            &tDataC.Flags );

            // Для Графика1
            // Сохраняем в структурах выборки фаз.детекторов, когда совпадут номера
выборок с красными верт. маркерами
            if( c == tImgCursor.tImg1.XA )
            {
                tDataA1 = tDataC;
                tMarks1.A = c;
            }
            if( c == tImgCursor.tImg1.XB )
            {
                tDataB1 = tDataC;
                tMarks1.B = c;
            }

            // Для Графика2
            // Сохраняем в структурах выборки фаз.детекторов, когда совпадут номера
выборок с красными верт. маркерами
            if( c == tImgCursor.tImg2.XA )
            {
                tDataA2 = tDataC;
                tMarks2.A = c;
            }
            if( c == tImgCursor.tImg2.XB )
            {
                tDataB2 = tDataC;
                tMarks2.B = c;
            }

            // Выбор канала измерения для Графиков 1 и 2
            TForm1::ChannelSel( &tDataC, &tmp1, &tmp2 );

            // Вначале смещаем график по вертикали на величину, зависящую от
            // масштаба усиления.
            // Порядок действий: смещение, а затем ослабление, - обязателен!
            // График1
            tmp1 -= shift1;
            Yd1 = (long)( tmp1 / (double)divider1 );
            // График2
            tmp2 -= shift2;
            Yd2 = (long)( tmp2 / (double)divider2 );

            // Масштабируем входное (знаковое) значение, чтобы он не выходило
            // за границы +100 и -100
            // График1
            if(Yd1 > 100 ) Yd1 = 99;

```

```

if(Yd1 < -100) Yd1 = -99;
// График2
if(Yd2 > 100) Yd2 = 99;
if(Yd2 < -100) Yd2 = -99;

// Выравниваем отмасштабированное значение по Y-центру графика
PY1 = (Yd1 * (-1)) + 100; // График1
PY2 = (Yd2 * (-1)) + 100; // График2

// Защита от выхода за пределы рабочего поля График1
if(PX1 > Image1->Width) PX1 = Image1->Width - 2;
if(PX1 < 1) PX1 = 1;
if(PY1 > Image1->Height) PY1 = Image1->Height - 2;
if(PY1 < 1) PY1 = 1;

// Защита от выхода за пределы рабочего поля График2
if(PX2 > Image2->Width) PX2 = Image2->Width - 2;
if(PX2 < 1) PX2 = 1;
if(PY2 > Image2->Height) PY2 = Image2->Height - 2;
if(PY2 < 1) PY2 = 1;

// *** Изменение цвета графиков в режиме HOLDOVER ***
// Если установ. биты 20 или 1 (HOLDOVER_PHASE или HOLDOVER_FREQ),
график рисуем КРАСНОЙ линией
if( ((tDataC.Flags & 1<<20) != 0) || ((tDataC.Flags & 1<<1) != 0) )
{
    BmpTmp1->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GraphCHLDV;
    BmpTmp2->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GraphCHLDV;
}
else
{
    BmpTmp1->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GraphC;
    BmpTmp2->Canvas->Pen->Color = tMyColors.GraphC;
}

// Если это первая итерация цикла то линию не рисуем, а лишь перемещаем
// курсор, иначе появляется прямая от лев. верхн. угла к середине шкалы
if( c != 0 )
//if((c != 0) || (c != Image1->Width-3))
{
    BmpTmp1->Canvas->LineTo(PX1,PY1); // График1
    BmpTmp2->Canvas->LineTo(PX2,PY2); // График2
}
else
{
    BmpTmp1->Canvas->MoveTo(PX1,PY1); // График1
    BmpTmp2->Canvas->MoveTo(PX2,PY2); // График2
}
}

}

Label51->Caption = IntToStr(TmpCnt);

//if( iteration == 1 )
{
    // График1
    Image1->Canvas->Lock(); // защита от многопоточности
    //Image1->Canvas->CopyRect(Rect(0,0,Image2->Width,Image2->Height), BmpTmp1-
    >Canvas, Rect(0,0,BmpTmp1->Width,BmpTmp1->Height));

```

```

Image1->Canvas->Draw(0,0,BmpTmp1);           // Работает как и предыдущая
строка
Image1->Canvas->Unlock();
delete BmpTmp1;
// График2
Image2->Canvas->Lock(); // защита от многопоточности
//Image2->Canvas->CopyRect(Rect(0,0,Image2->Width,Image2->Height), BmpTmp2-
>Canvas, Rect(0,0,BmpTmp2->Width,BmpTmp2->Height));
Image2->Canvas->Draw(0,0,BmpTmp2);           // Работает как и предыдущая
строка
Image2->Canvas->Unlock();
delete BmpTmp2;
}

// График1
// Определяем, какая из линий находится левее, а какая правее
// Если XA находится левее XB
if( tMarks1.A < tMarks1.B )
{
    tDataL1 = tDataA1;
    tDataR1 = tDataB1;
    sec = tMarks1.B - tMarks1.A; // получаем разность секунд по шкале X
}
else
{
    tDataL1 = tDataB1;
    tDataR1 = tDataA1;
    sec = tMarks1.A - tMarks1.B; // получаем разность секунд по шкале X
}
Label9->Caption = IntToStr(sec)+" sec";

// График2
// Определяем, какая из линий находится левее, а какая правее
// Если XA находится левее XB
if( tMarks2.A < tMarks2.B )
{
    tDataL2 = tDataA2;
    tDataR2 = tDataB2;
    sec = tMarks2.B - tMarks2.A; // получаем разность секунд по шкале X
}
else
{
    tDataL2 = tDataB2;
    tDataR2 = tDataA2;
    sec = tMarks2.A - tMarks2.B; // получаем разность секунд по шкале X
}
Label13->Caption = IntToStr(sec)+" sec";

// Заполняем поля Label вычисленными значениями, взятыми по маркерам
TForm1::MarksDataCalc( &tDataL1, &tDataR1, &tDataL2, &tDataR2 );

Step = IMAGEX_STEP; // default value
if( ReviewMode == 1 ) // если режим обзора, изменяем разметку по X
{
    StartX = 0;
    Step = ListBox1->GetCount() / 11;           // делим число строк в массиве на
число меток по X
}

TForm1::Xscale1(StartX, Step);           // вызов функции пересчёта значений шкалы X
}
//-----

```



```

void __fastcall TForm1::ChannelSel( DATA_SAMPLE* tDataC, double* Dg1, double* Dg2 )
{
    // Выбор канала измерения для Графика1
    // Умножение на 1000 переводит пикосекунды в целочисленный диапазон значений
    if( ComboBox1->ItemIndex == 0 ) // ADTD
        *Dg1 = (double)tDataC->adtd * ADTD_CONST * 1000;
    else if( ComboBox1->ItemIndex == 1 ) // Channel C0
        *Dg1 = tDataC->c0 * 1000;
    else if( ComboBox1->ItemIndex == 2 ) // Channel C1
        *Dg1 = tDataC->c1 * 1000;
    else if( ComboBox1->ItemIndex == 3 ) // Channel C2
        *Dg1 = tDataC->c2 * 1000;
    else if( ComboBox1->ItemIndex == 4 ) // Channel C3
        *Dg1 = tDataC->c3 * 1000;
    else
        *Dg1 = 0; // ничего не отображаем

    // Выбор канала измерения для Графика2
    if( ComboBox2->ItemIndex == 0 ) // ADTD
        *Dg2 = (double)tDataC->adtd * ADTD_CONST * 1000;
    else if( ComboBox2->ItemIndex == 1 ) // Channel C0
        *Dg2 = tDataC->c0 * 1000;
    else if( ComboBox2->ItemIndex == 2 ) // Channel C1
        *Dg2 = tDataC->c1 * 1000;
    else if( ComboBox2->ItemIndex == 3 ) // Channel C2
        *Dg2 = tDataC->c2 * 1000;
    else if( ComboBox2->ItemIndex == 4 ) // Channel C3
        *Dg2 = tDataC->c3 * 1000;
    else
        *Dg2 = 0; // ничего не отображаем
}
//-----

void __fastcall TForm1::MarksDataCalc( DATA_SAMPLE *tDataL1, DATA_SAMPLE *tDataR1,
DATA_SAMPLE *tDataL2, DATA_SAMPLE *tDataR2 )
{
    // Заполняем поля Label вычисленными значениями, взятыми по маркерам
    // Отображаем значения графика1, обозначенные красными линиями-метками
    double d_S=0;

    if(ComboBox1->ItemIndex== 0)
    {
        double d_L=0, d_R=0;
        d_L = (double)tDataL1->adtd * ADTD_CONST;
        d_R = (double)tDataR1->adtd * ADTD_CONST;
        d_S = d_R - d_L; // получаем разность амплитуд по шкале Y
        Label6->Caption = FloatToStrF(d_L,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label7->Caption = FloatToStrF(d_R,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label8->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox1->ItemIndex== 1)
    {
        d_S = tDataR1->c0 - tDataL1->c0;
        Label6->Caption = FloatToStrF(tDataL1->c0,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label7->Caption = FloatToStrF(tDataR1->c0,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label8->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox1->ItemIndex== 2)
    {
        d_S = tDataR1->c1 - tDataL1->c1;
        Label6->Caption = FloatToStrF(tDataL1->c1,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
}

```

```

        Label7->Caption = FloatToStrF(tDataR1->c1,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label8->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox1->ItemIndex== 3)
    {
        d_S = tDataR1->c2 - tDataL1->c2;
        Label6->Caption = FloatToStrF(tDataL1->c2,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label7->Caption = FloatToStrF(tDataR1->c2,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label8->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox1->ItemIndex== 4)
    {
        d_S = tDataR1->c3 - tDataL1->c3;
        Label6->Caption = FloatToStrF(tDataL1->c3,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label7->Caption = FloatToStrF(tDataR1->c3,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label8->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }

    // Отображаем значения графика2, обозначенные красными линиями-метками
    if(ComboBox2->ItemIndex== 0)
    {
        double d_L=0, d_R=0;
        d_L = (double)tDataL2->adtd * ADTD_CONST;
        d_R = (double)tDataR2->adtd * ADTD_CONST;
        d_S = d_R - d_L;
        Label10->Caption = FloatToStrF(d_L,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label11->Caption = FloatToStrF(d_R,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label12->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox2->ItemIndex== 1)
    {
        d_S = tDataR2->c0 - tDataL2->c0;
        Label10->Caption = FloatToStrF(tDataL2->c0,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label11->Caption = FloatToStrF(tDataR2->c0,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label12->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox2->ItemIndex== 2)
    {
        d_S = tDataR2->c1 - tDataL2->c1;
        Label10->Caption = FloatToStrF(tDataL2->c1,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label11->Caption = FloatToStrF(tDataR2->c1,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label12->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox2->ItemIndex== 3)
    {
        d_S = tDataR2->c2 - tDataL2->c2;
        Label10->Caption = FloatToStrF(tDataL2->c2,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label11->Caption = FloatToStrF(tDataR2->c2,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label12->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    else if(ComboBox2->ItemIndex== 4)
    {
        d_S = tDataR2->c3 - tDataL2->c3;
        Label10->Caption = FloatToStrF(tDataL2->c3,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label11->Caption = FloatToStrF(tDataR2->c3,ffFixed,9,3)+"nS";
        Label12->Caption = FloatToStrF(d_S,ffFixed,9,3)+"nS";
    }
    TForm1::Yscale1(); // вызов функции пересчёта значений шкалы Y
    TForm1::Yscale2(); // вызов функции пересчёта значений шкалы Y
}
//-----

```

```

void __fastcall TForm1::ComboBox1Change(TObject* /*Sender*/)
{
    // Выбор из списка ComboBox1
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::ComboBox2Change(TObject* /*Sender*/)
{
    // Выбор из списка ComboBox2
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::PageMinusClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка '<<'
    // Используется для горизонтального пролистывания графика влево на страницу
    //iGraphShift -= TURN_OVER_LONG;

    int tmp0, tmp1;
    tmp0 = iGraphShift;
    tmp1 = tmp0 - TURN_OVER_LONG;
    if( tmp1 < 0 )
    {
        iGraphShift = 0;
    }
    else
    {
        iGraphShift -= TURN_OVER_LONG;
    }
    //Label41->Caption = IntToStr(iGraphShift);
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::PagePlusClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка '>>'
    // Используется для горизонтального пролистывания графика вправо на страницу
    //iGraphShift += TURN_OVER_LONG;

    int tmp0, tmp1;
    tmp0 = iGraphShift;
    tmp1 = tmp0 + TURN_OVER_LONG;
    // Если после инкремента счётчик страниц превысил число элементов выборок (без 700,
    // которые отображаются) - запрещаем увеличение счётчика страниц
    if( tmp1 <= (ListBox1->GetCount() - IMAGE_WIDTH) )
    {
        iGraphShift += TURN_OVER_LONG;
    }
    //Label41->Caption = IntToStr(iGraphShift);
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::PageLeftClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка '<'
    // Используется для горизонтального смещения графика влево на 50 пикселей
    //iGraphShift -= TURN_OVER_SHORT;

```

```

int tmp0, tmp1;
tmp0 = iGraphShift;
tmp1 = tmp0 - TURN_OVER_SHORT;
if( tmp1 < 0 )
{
    iGraphShift = 0;
}
else
{
    iGraphShift -= TURN_OVER_SHORT;
}
//Label41->Caption = IntToStr(iGraphShift);
TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::PageRightClick(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка '>'
    // Используется для горизонтального смещения графика вправо на 50 пикселей
    //iGraphShift += TURN_OVER_SHORT;

    int tmp0, tmp1;
    tmp0 = iGraphShift;
    tmp1 = tmp0 + TURN_OVER_SHORT;
    // Если после инкремента счётчик страниц превысил число элементов выборки (без 700,
    // которые отображаются) - запрещаем увеличение счётчика страниц
    if( tmp1 <= (ListBox1->GetCount() - IMAGE_WIDTH) )
    {
        iGraphShift += TURN_OVER_SHORT;
    }
    //Label41->Caption = IntToStr(iGraphShift);
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::UpDown1Click(TObject* /*Sender*/, TUDBtnType /*Button*/)
{
    // Кнопка '<<'
    // Используется для горизонтального пролистывания графика влево на страницу
    //iPageScr = UpDown1->Position;
    //StaticText1->Caption = IntToStr(UpDown1->Position);
    //StaticText1->Caption = IntToStr(iPageScr);
    //TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Image1
}
//-----

void __fastcall TForm1::ListBox1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // Пользователь нажал лев.кнопку мыши на окне ListBox1 и попал на строку ListBox1-
    >ItemIndex
    int tmp;

    Label41->Caption = IntToStr(ListBox1->ItemIndex);
    if( ListBox1->GetCount() <= IMAGE_WIDTH )
    {
        tSelLine.SelectedLineNum = ListBox1->ItemIndex;
    }
    else
    {
        tmp = ListBox1->GetCount() - IMAGE_WIDTH;
        iGraphShift = tmp;
    }
}

```

```

        //tSelLine.SelectedLineNum = ListBox1->ItemIndex - tmp;
        tSelLine.SelectedLineNum = ListBox1->ItemIndex;
    }
    Label42->Caption = IntToStr(tSelLine.SelectedLineNum);
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::Button1Click(TObject* /*Sender*/)
{
    // Кнопка "OVERVIEW" ВКЛЮЧАЕТ / ВЫКЛЮЧАЕТ режим обзора

    static int flag;
    if( flag == 0 )
    {
        flag = 1;
        ReviewMode = 1; // уст. режим обзора - выводится на экран весь график (с
прореживанием)
    }
    else
    {
        flag = 0;
        ReviewMode = 0; // выключаем режим обзора - выводится на экран только часть
графика но без прореживания
    }
    TForm1::ReviewModeSetup( ReviewMode );
    TForm1::Draw_C(); // функция однократной отрисовки Images
}
//-----

void __fastcall TForm1::ReviewModeSetup( int ReviewMode )
{
    if( ReviewMode == 1 )
    {
        // Устанавливаем режим обзора - выводится на экран весь график (с прореживанием)
        Button1->Caption = "Expand";
        // Деактивация кнопок
        PageMinus->Enabled = FALSE; // отключаем прокрутку экрана влево
        PageLeft->Enabled = FALSE; // отключаем прокрутку экрана влево
        PagePlus->Enabled = FALSE; // отключаем прокрутку экрана вправо
        PageRight->Enabled = FALSE; // отключаем прокрутку экрана вправо
    }
    else
    {
        // Выключаем режим обзора - выводится на экран только часть графика но без
прореживания
        Button1->Caption = "Overview";
        Label41->Caption = IntToStr(0);
        Label42->Caption = IntToStr(ListBox1->GetCount());
        // Активация кнопок
        PageMinus->Enabled = TRUE; // включаем прокрутку экрана влево
        PageLeft->Enabled = TRUE; // включаем прокрутку экрана влево
        PagePlus->Enabled = TRUE; // включаем прокрутку экрана вправо
        PageRight->Enabled = TRUE; // включаем прокрутку экрана вправо
    }
}
//-----

void __fastcall TForm1::Help2Click(TObject *Sender)
{
    FormHelp1->ShowModal();
}
//-----

```

ДОДАТОК Е

**РЕЗУЛЬТАТИ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ
ДОСЛІДЖУВАНИХ ПІДСИСТЕМ ФАПЧ АСК З ВИКОРИСТАННЯМ
ПРОГРАМИ SIMULINK ПАКЕТУ MATLAB**

**Результати експериментальних досліджень ПФАПЧ з необмеженою
смугою пропускання ФНЧ за різних початкових значень фазової похибки**

Результати експериментальних досліджень ПФАПЧ, що має два ієрархічних рівня керування, а також ФНЧ з необмеженою смугою пропускання та АЦФД (файл Test_8_1poradok.mdl) за різних початкових значень фазової похибки φ_0 , що виконані з використанням програми Simulink пакету MATLAB, представлено на рис. Е.1 – рис. Е.8.

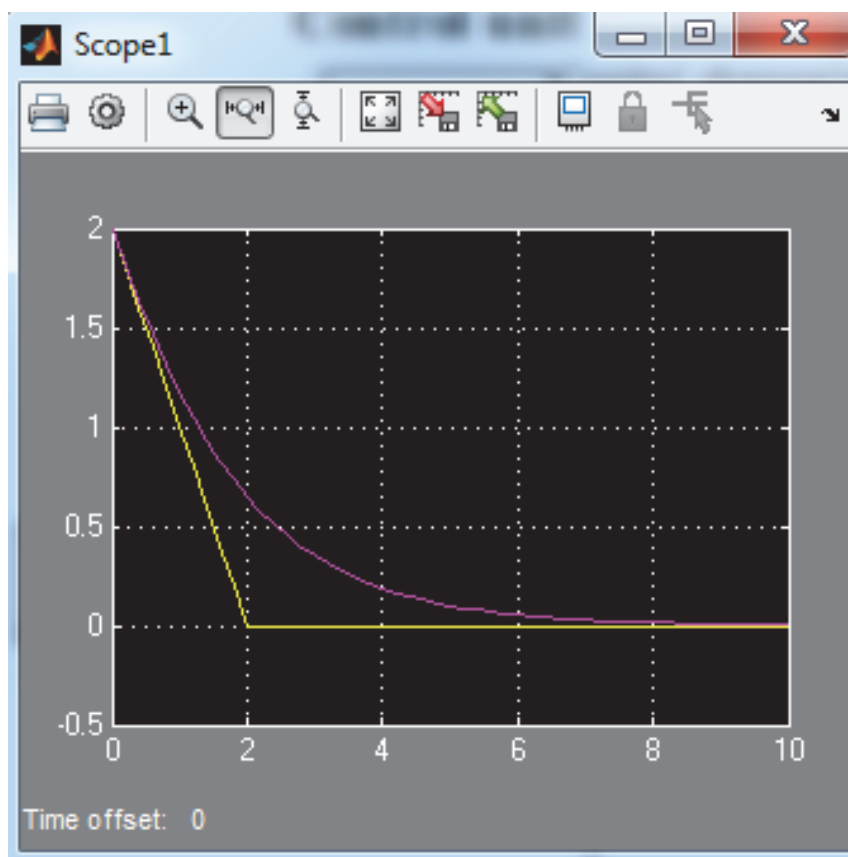


Рис. Е..1. Осцилограми сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = 2$)
(нижній графік - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, верхній – не оптимізована)

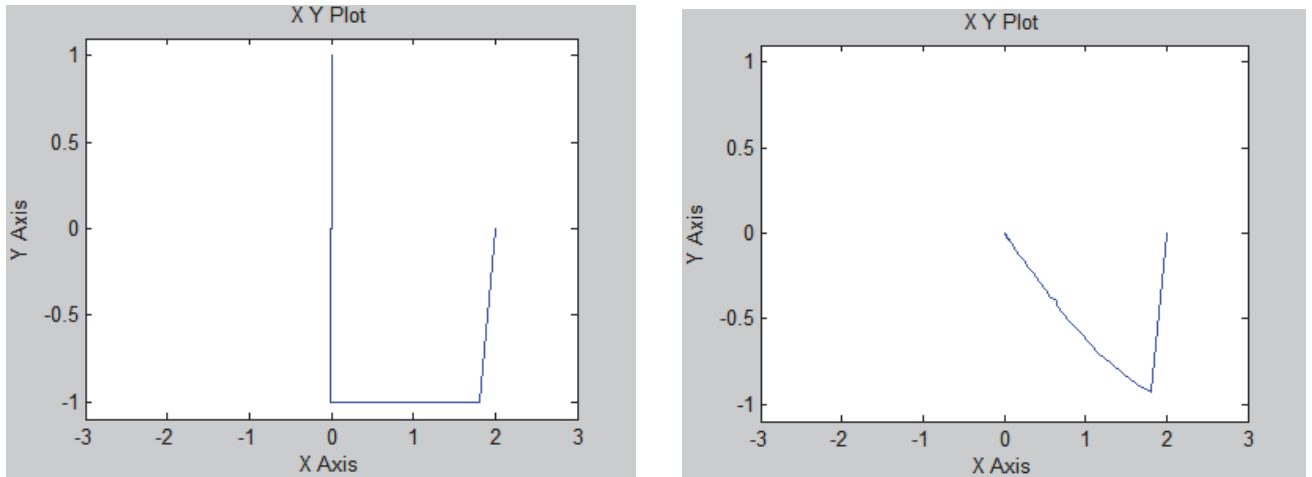


Рис. Е.2. Фазові портрети ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за початкового значення фазової похибки $\varphi_0 = 2$

(графік зліва - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

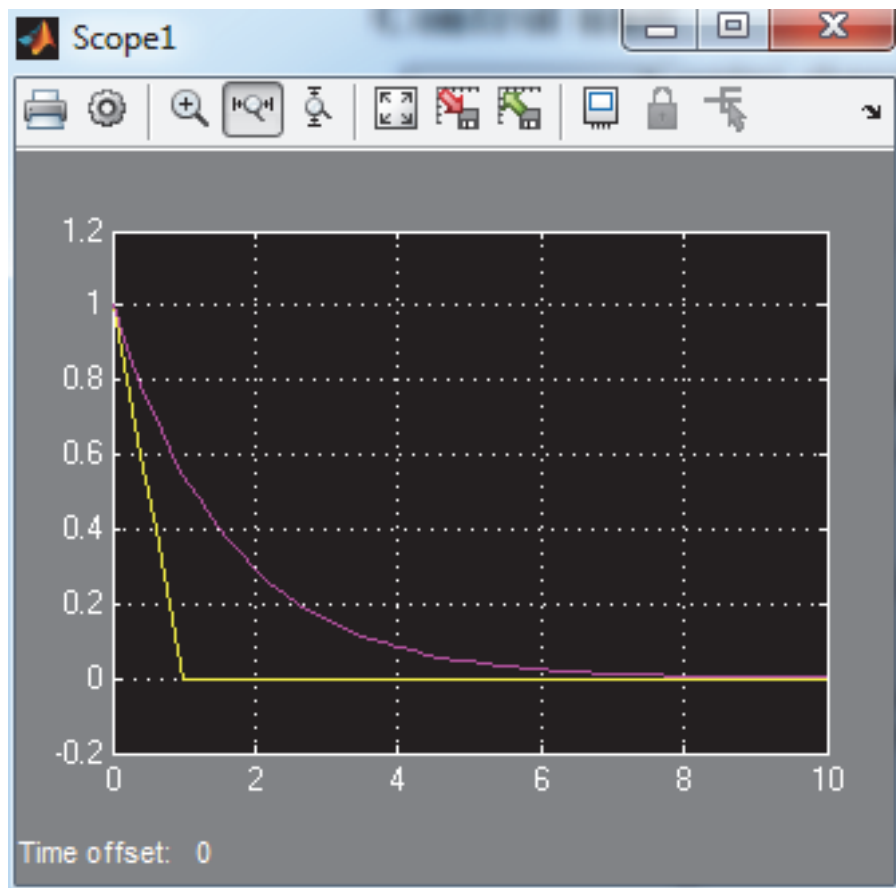


Рис. Е.3. Осцилограми сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = 1$)

(нижній графік - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, верхній – не оптимізована)

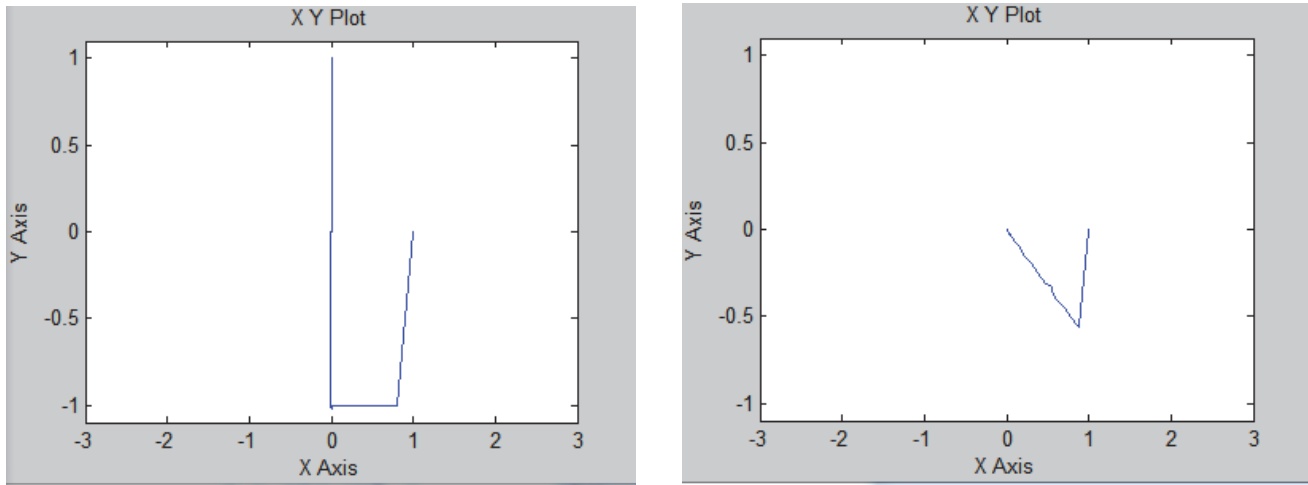


Рис. Е.4. Фазові портрети ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за початкового значення фазової похибки $\varphi_0 = 1$ (графік зліва - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

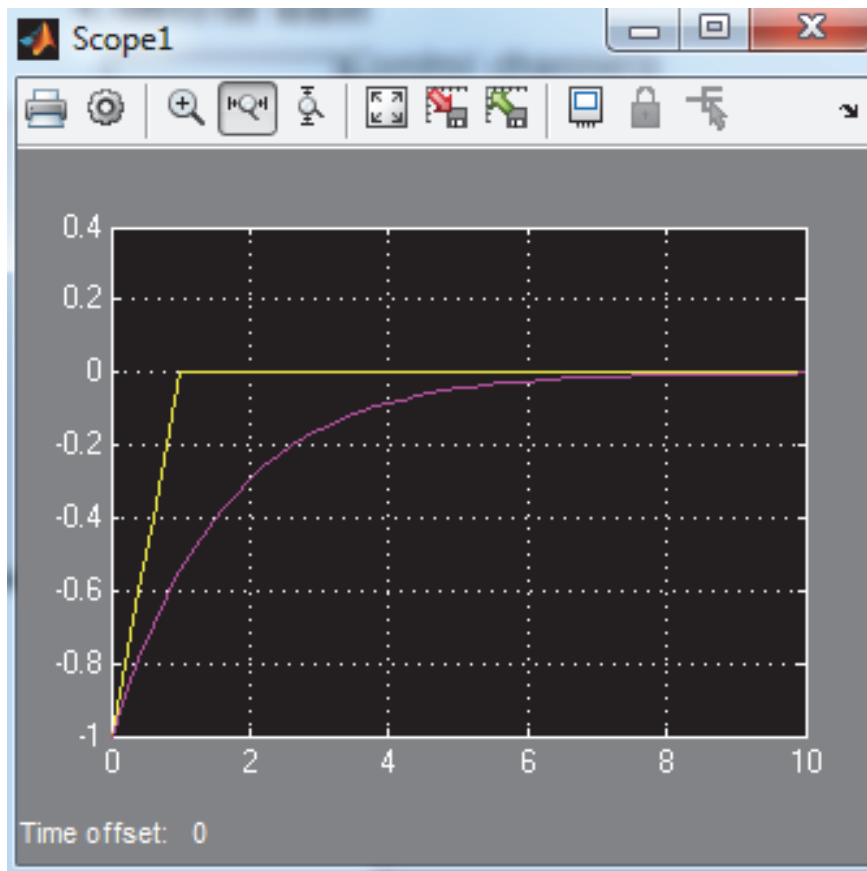


Рис. Е.5. Осцилограми сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = -1$)

(верхній графік - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, нижній – не оптимізована)

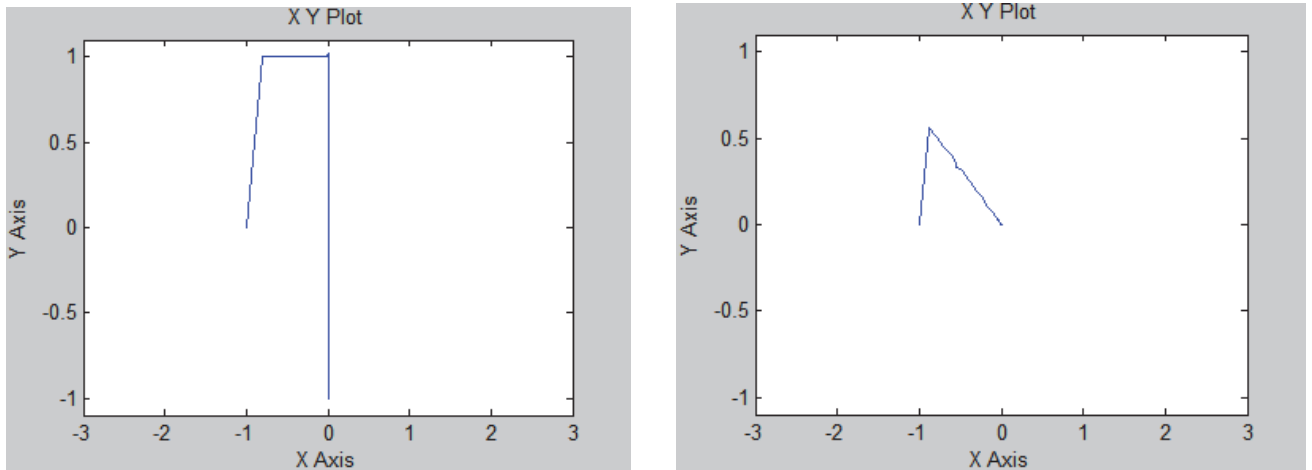


Рис. Е.6. Фазові портрети ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за початкового значення фазової похибки $\varphi_0 = -1$

(графік зліва - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

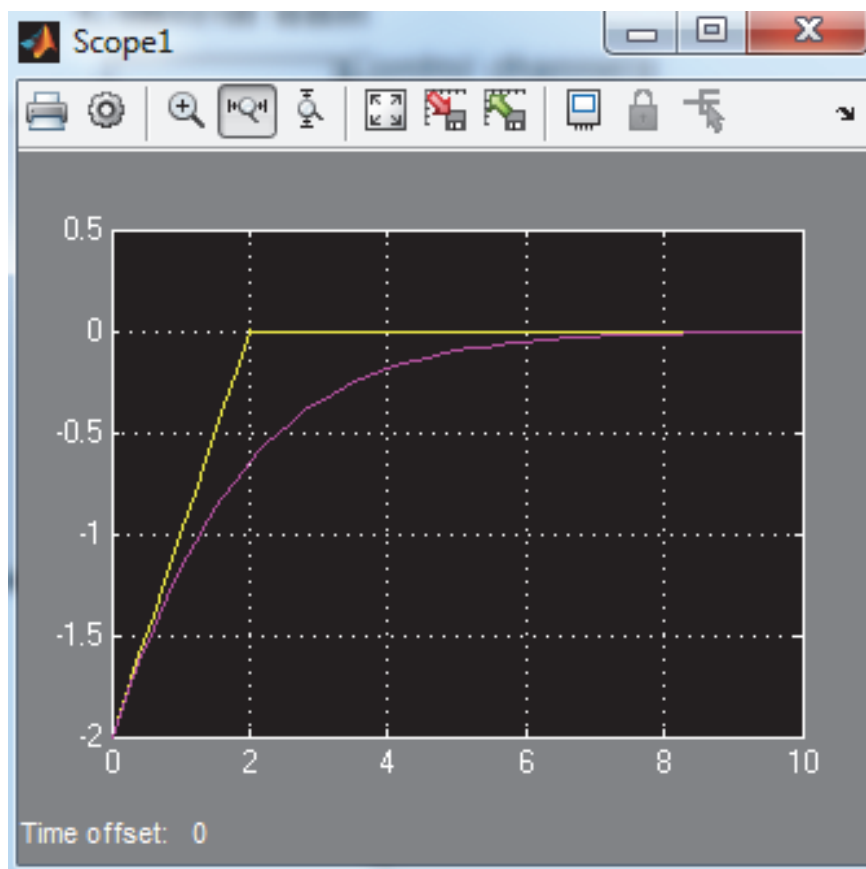


Рис. Е.7. Осцилограми сигналів на виходах ГКН ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (початкове значення фазової похибки $\varphi_0 = -2$)

(верхній графік - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, нижній – не оптимізована)

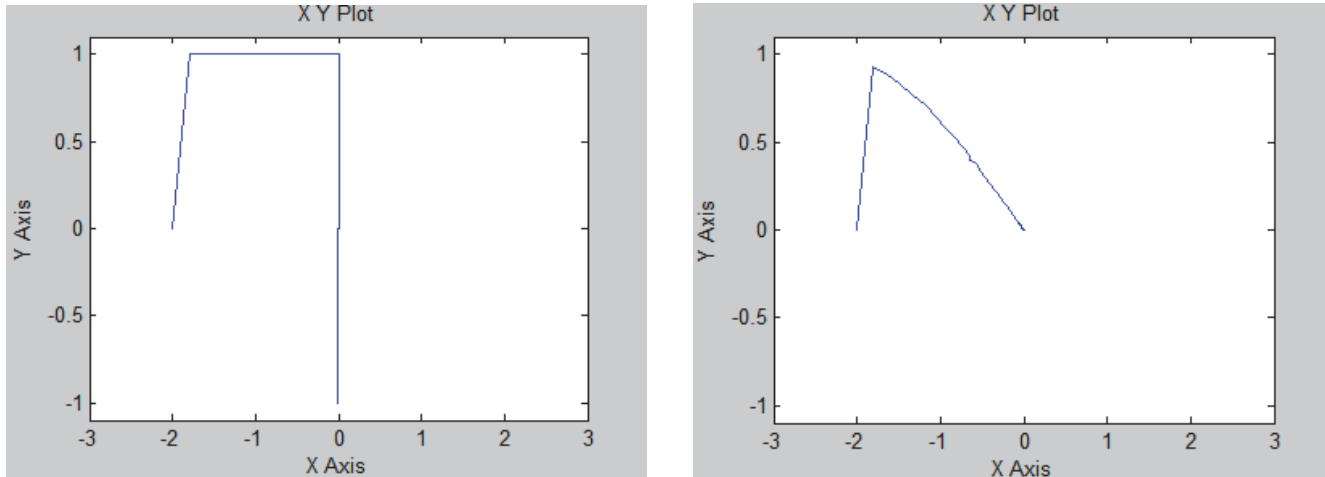


Рис. Е.8. Фазові портрети ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ за початкового значення фазової похибки $\varphi_0 = -2$

(графік зліва - оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

Результати експериментальних досліджень оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за різних початкових умов

Результати експериментальних досліджень оптимальної за швидкодією ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою для випадків, коли початкові значення фазової похибки φ_0 та початкові частотні розлаштування ω_0 мають різні наперед встановлені значення представлено на рис. Е.9 - Е.20.

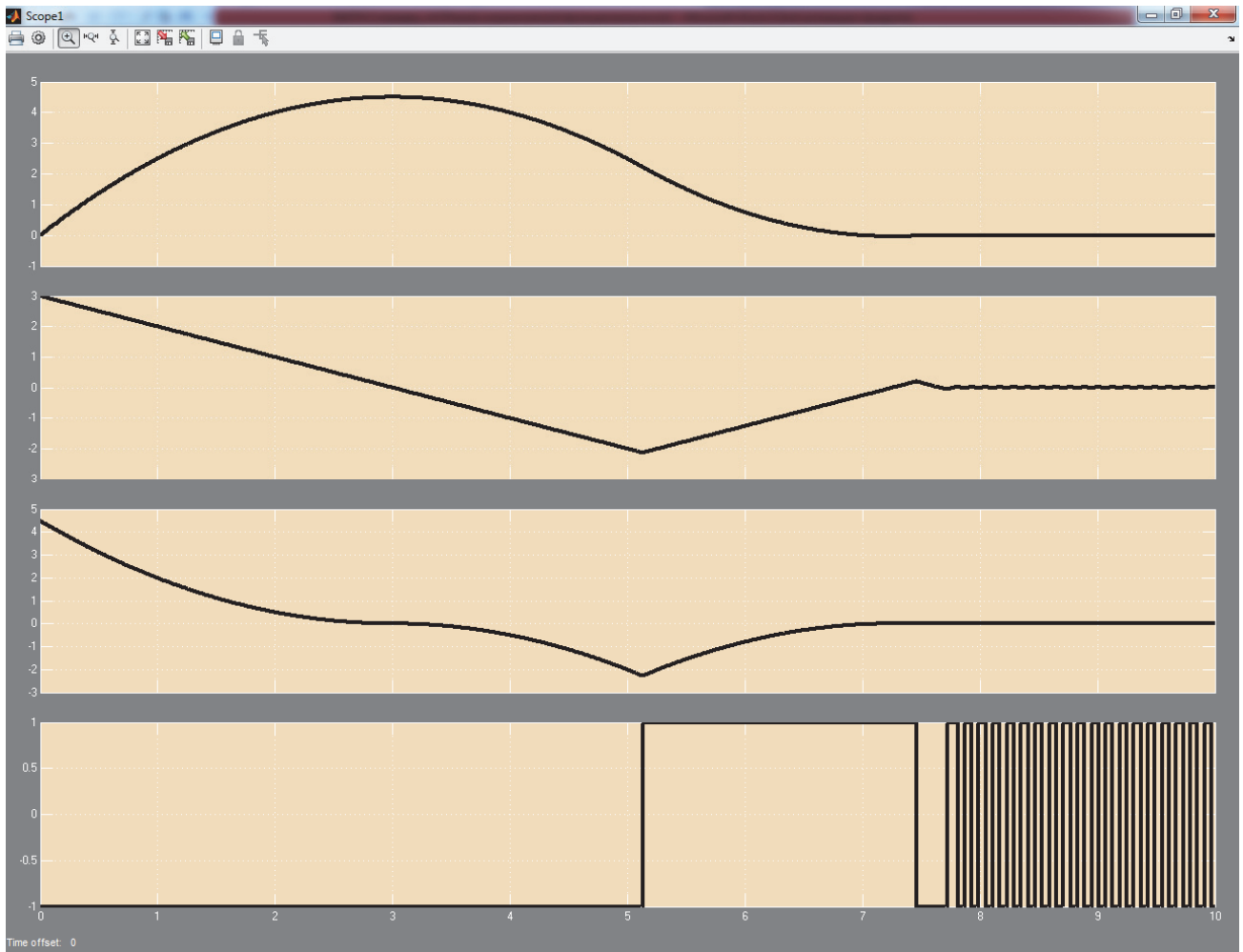


Рис. Е.9. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=0, \omega_0=3$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\varphi\text{Д}}(t)$.

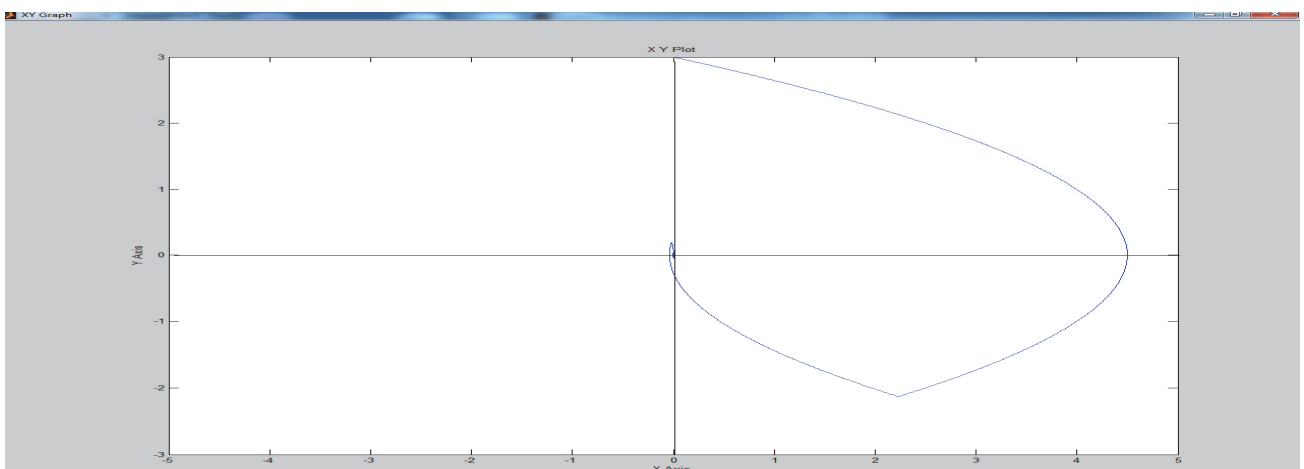


Рис. Е.10. Фазовий портрет оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=0, \omega_0=3$)

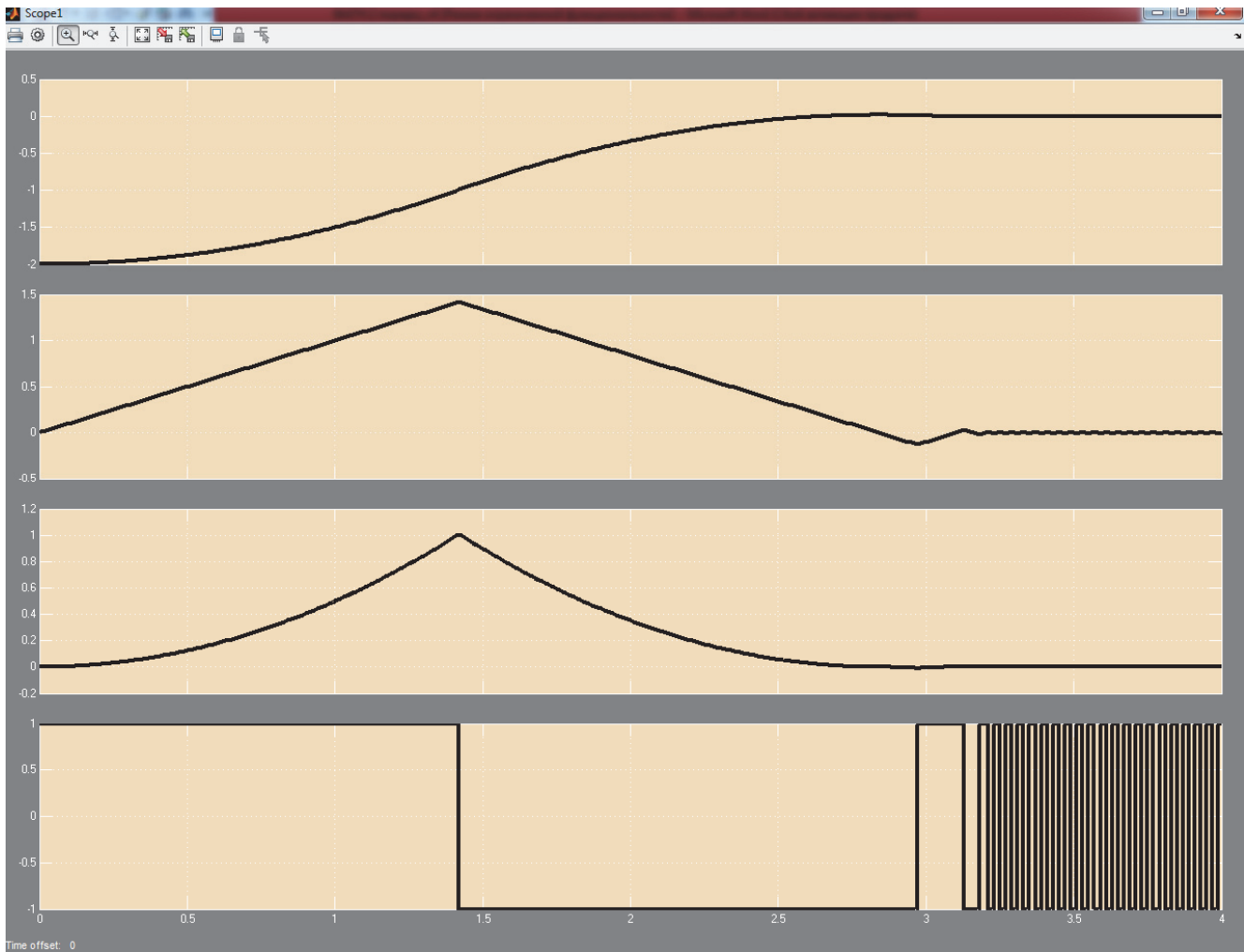


Рис. Е.9. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0 = -2$, $\omega_0 = 0$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\text{ФД}}(t)$.

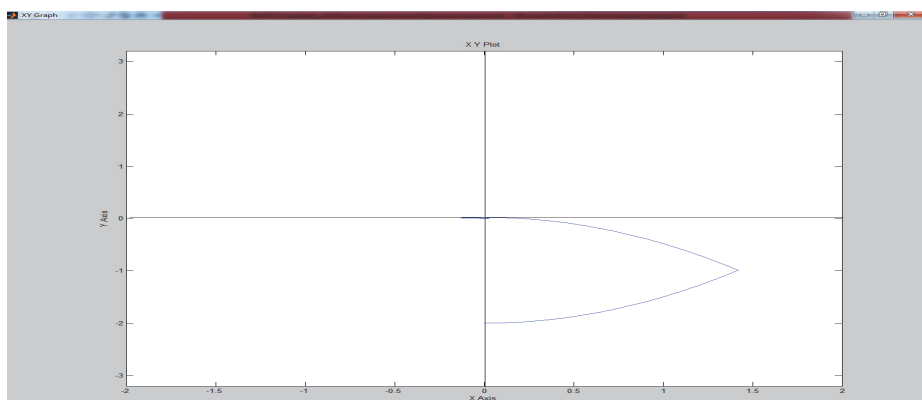


Рис. Е.10. Фазовий портрет оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0 = -2$, $\omega_0 = 0$)

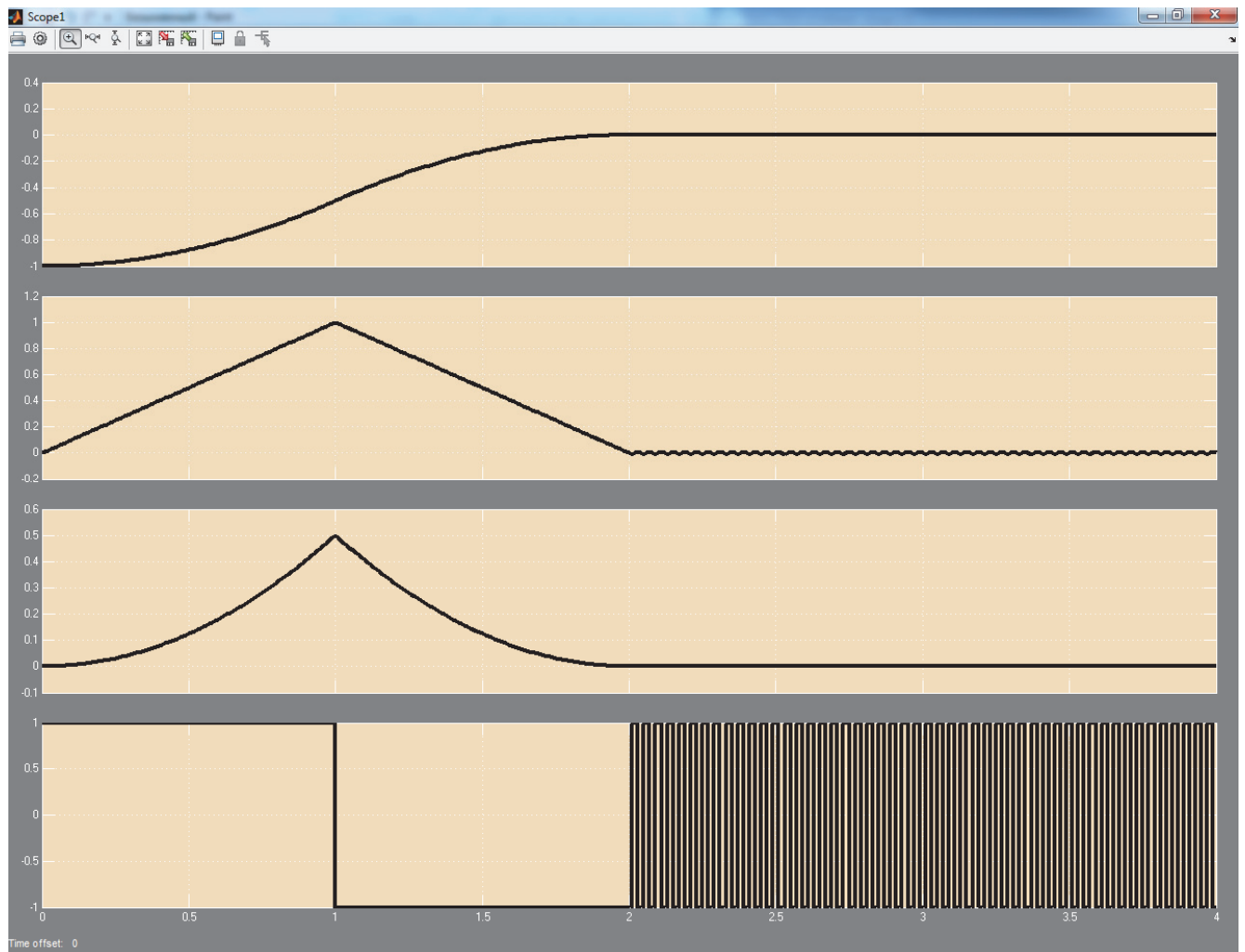


Рис. Е.11. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0 = -1, \omega_0 = 0$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\text{ФД}}(t)$.

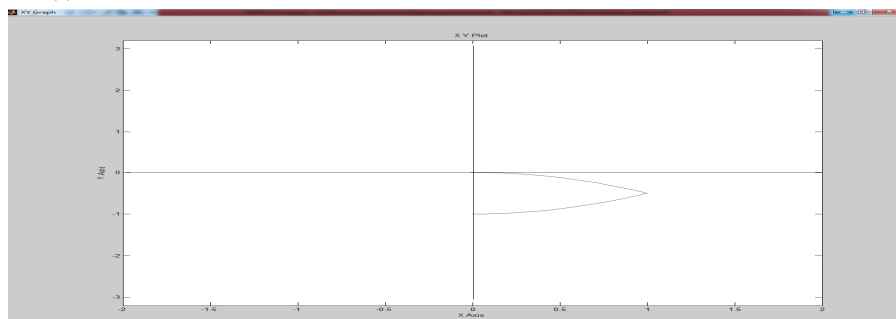


Рис. Е.12. Фазовий портрет оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0 = -1, \omega_0 = 0$)

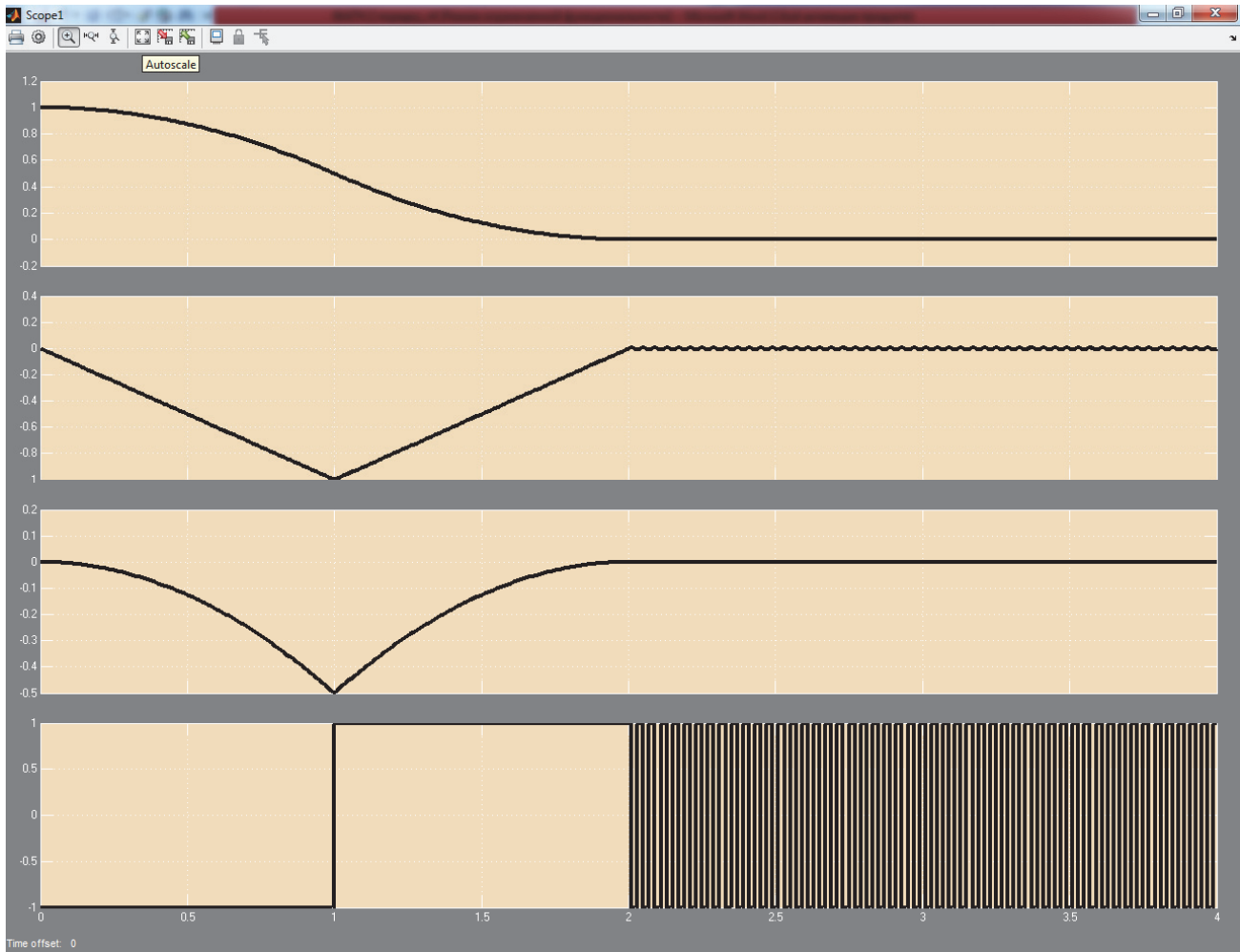


Рис. Е.13. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=1, \omega_0=0$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\text{ФД}}(t)$.

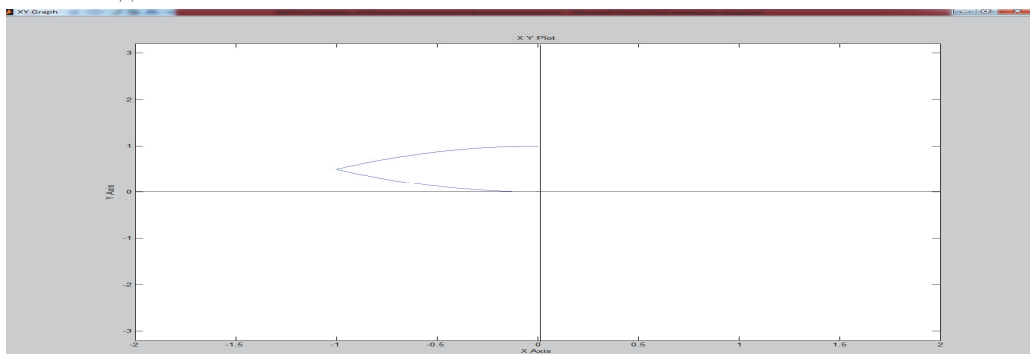


Рис. Е.14. Фазовий портрет оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=1, \omega_0=0$)

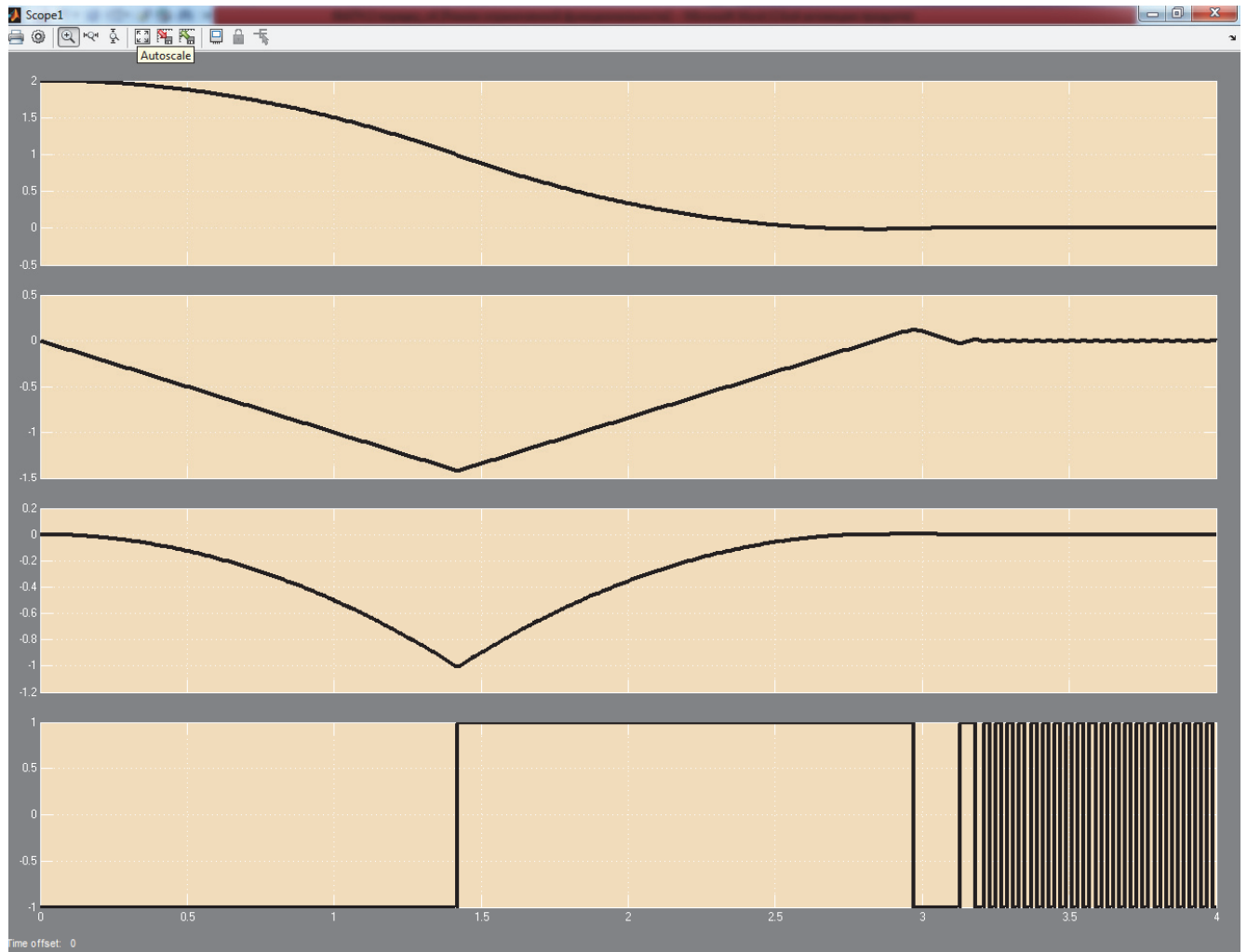


Рис. Е.15. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=2, \omega_0=0$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\text{ФД}}(t)$.

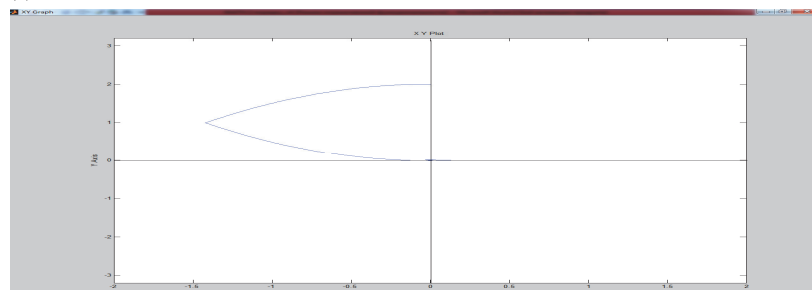


Рис. Е.16. Фазовий портрет оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=2, \omega_0=0$)

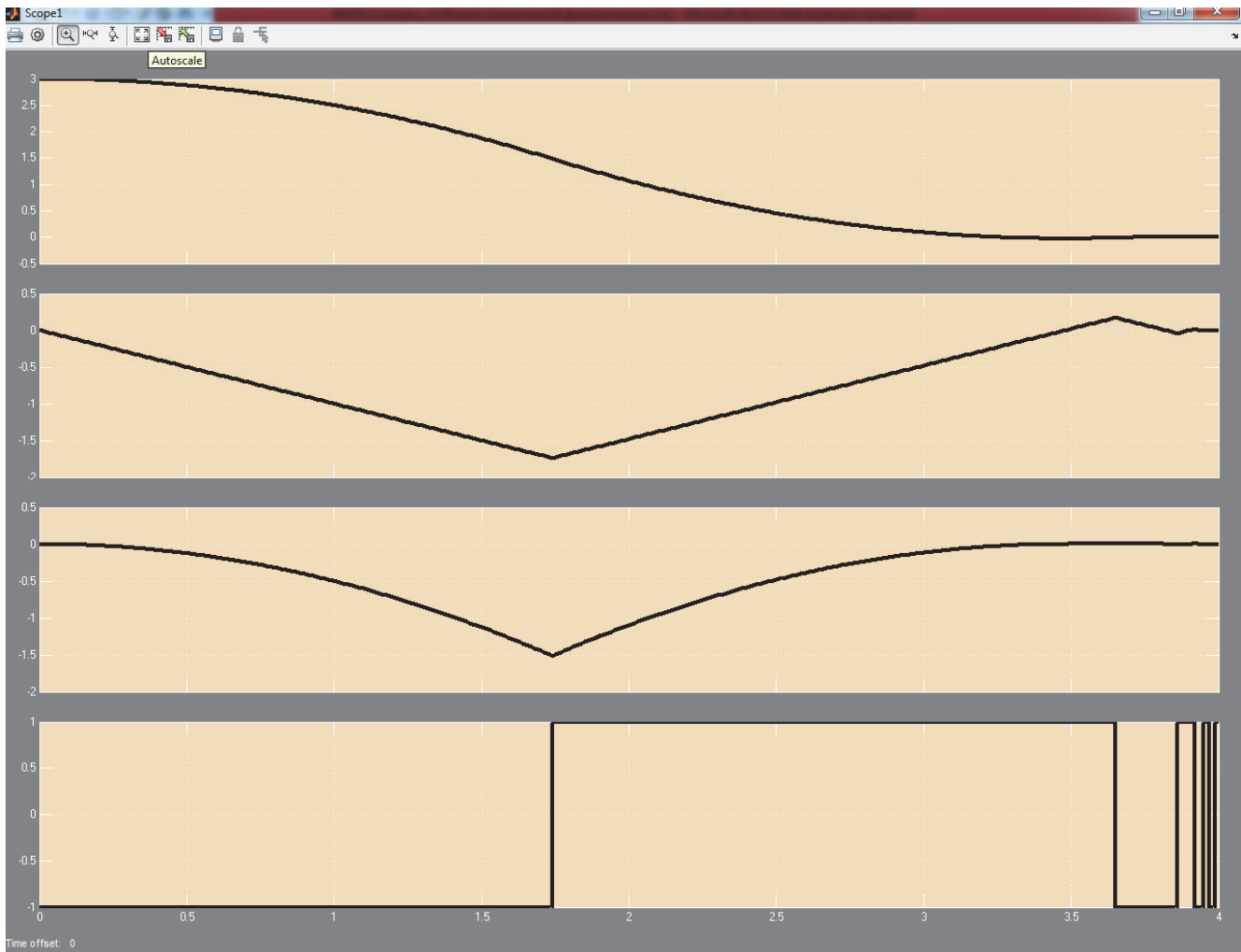


Рис. Е.17. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=3, \omega_0=0$)

верхній графік - $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{\text{ГКН}}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\varphi\text{Д}}(t)$.

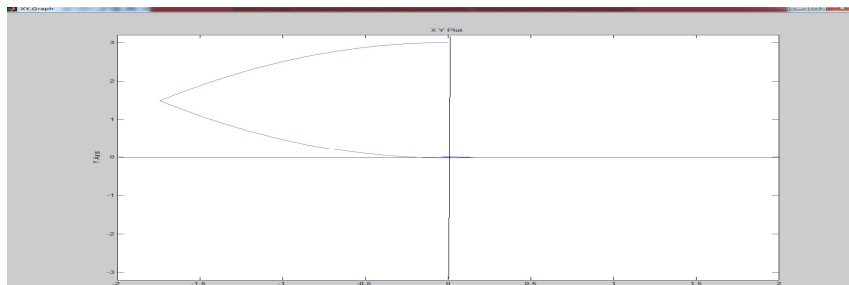


Рис. Е.18. Фазовий портрет оптимальної за швидкодією підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=3, \omega_0=0$)

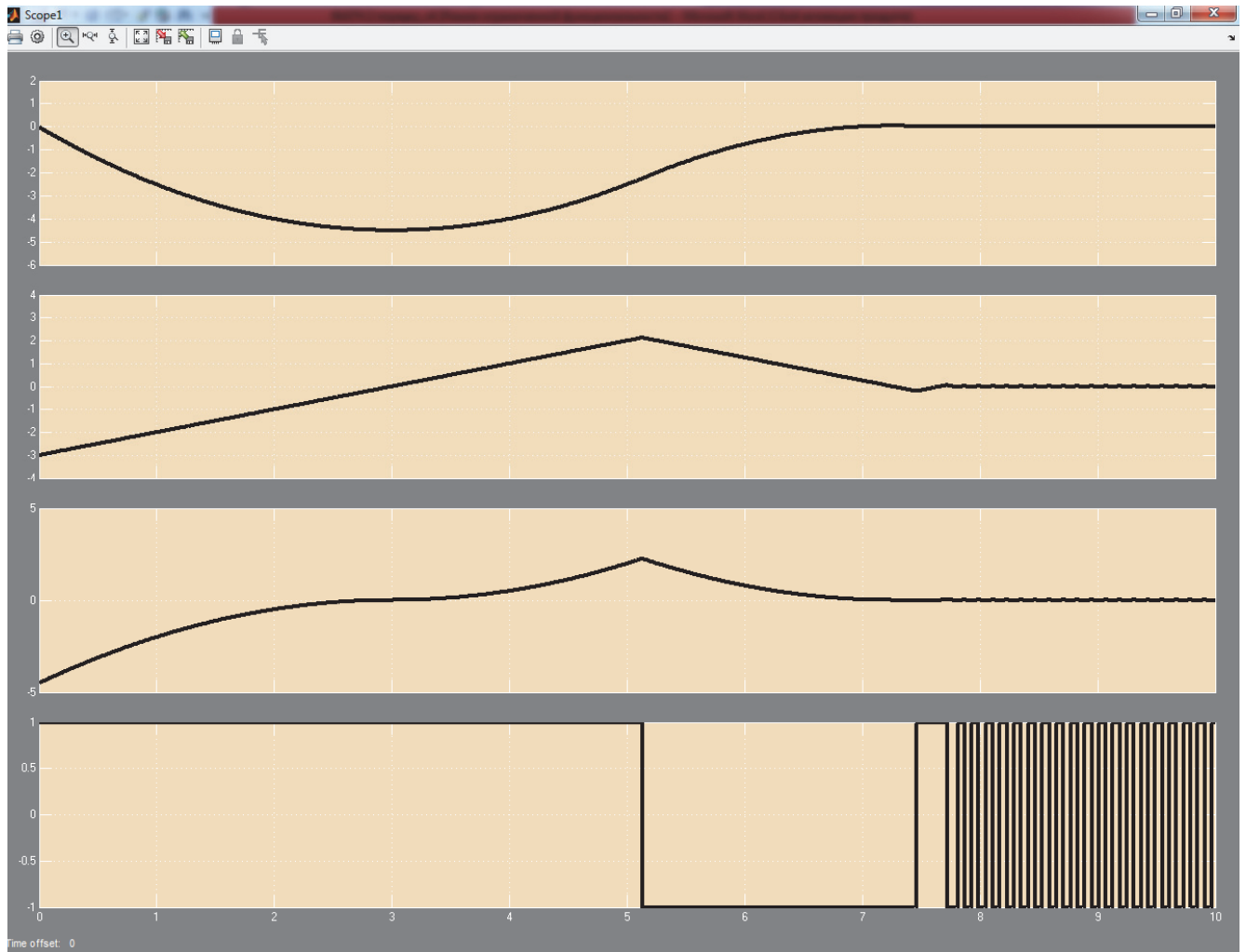


Рис. Е.19. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=0$, $\omega_0=-3$)

верхній графік - $\varphi_{ГКН}(t)$;

другий графік зверху - $\omega_{ГКН}(t)$;

третій графік зверху - сигнал на виході «Блок контролю»;

нижній графік - $u_{\PhiД}(t)$.

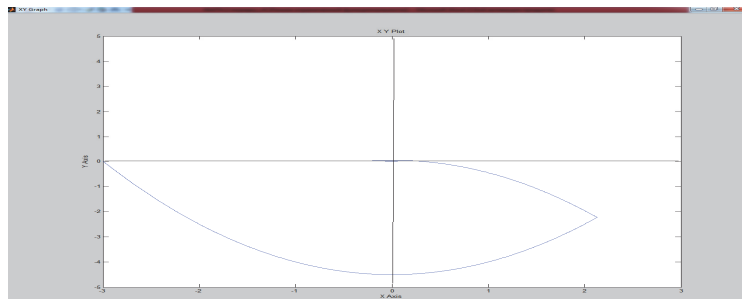


Рис. Е.20. Фазовий портрет оптимальної за швидкістю підсистеми ФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$ ($\varphi_0=3$, $\omega_0=-3$)

Додаток Ж

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Основні положення дисертації викладено у 31 науковій праці, з яких п'ять статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, два патенти України на винахід і корисну модель, чотири монографії, рекомендовані вченою радою НУБіП України, 11 матеріалів і тез наукових доповідей та шість наукових доповідей, включених до зарубіжної наукометричної бази Scopus, одна рекомендація для підприємств і організацій.

1. V.V. Koval, **D.O. Kalian**, M.M. Khudyntsev, V.P. Lysenko, O.V. Samkov, I.J. Shkliarevskiy. Automated 24x7 monitoring of synchroinformation in modern digital networks // Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія фізико-математичні науки. - 2017. - Випуск №2. - С.88-94.

Режим доступу до статті:
http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/detail.php3?doc_id=1824870

(Здобувачем проведено аналіз способів забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю ПСЦС, розроблено на основі запропонованого методу структуру багатоканального контролю показників якості з застосуванням IP-технологій блока БПП «TIMETER», P4000winXP, отримано кількісні оцінки показників за результатами вимірів).

2. V.P. Lysenko, V.V. Koval, K.V. Nakonechna, **D.O. Kalian**. Modern information technologies in the control systems for complex biotechnical objects of agricultural appointment // Information and Telecommunication Sciences, Volume 9, Number 2(15), July-December 2017, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute", P.38-43. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/119897> *(Здобувачем розроблено лабораторний стенд системи контролю, проведено експериментальні дослідження з використанням інформаційної системи корпоративної IP-мережі, отримано дані результатів контролю передавання синхроінформації на основі протоколу*

РТР IEEE-1588v2 з використанням ПСЦС).

3. **Dmytro Kalian.** Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences, Number 1(2018), National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Politechnik Institute”, P.11-18. Режим доступу до статті: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/136460>

4. Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Максименко Ю.А., Самков О.В. Оптимальне за швидкодією фазове автопідстроювання частоти синтезатора міток точного часу інтегрованих систем електропостачання Smart-технологій // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Техніка та енергетика АПК». – К., 2018. – Вип.283. – С.89-98. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnu_tech_2018_283_13 *(Здобувачем розроблено структуру ПФАПЧ з нелінійностями, проведено дослідження математичної моделі оптимальної за швидкодією системи, отримано в аналітичному виді оптимальний закон керування та запропоновано його реалізацію з використанням цифрових технологій).*

5. **Кальян Д.О.**, Коваль В.В., Максименко Ю.А., Самков О.В., Дубович-Костецький В.Г. Оптимізація за швидкодією автопідстроювання частоти кварцового генератора системи автоматизованого контролю синхросигналів // Електронне видання «Енергетика і автоматика», №3(2018). С.15-33. Режим доступу до статті: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540> *(Здобувачем проведено аналіз способів контролю ПСЦС в умовах багатоміністерського виробництва та технічної експлуатації, розроблено апаратну структуру блока багатоканального контролю БПП «TIMETER» АСК з підсистемою фазового автопідстроювання, проведено дослідження математичної моделі підсистеми, отримано граничні умови, за яких періодичність характеристики ФД не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і кількісну оцінку результатів оптимізації).*

Стаття у науковому виданні іншої держави:

6. **Dmytro Kalian**, Nadiia Kazakova, Boris Kravchenko, Valerii Koval. Automated system for Monitoring Synchronizing precise time signals at SMART-GRID power plants. Projectowanie, badania, i eksploatacja. Tom 1. - Wydawnictwo naukowe Akademii techniczno-humanistycznej w Bielsku-Bialej. Bielsku-Bialej, Poland. 2019. - P.155-160. <http://www.engineerxxi.ath.eu/book/designing-researches-and-exploitation-2019-vol-1/> *(Здобувачем проведено аналіз способів забезпечення високих якісних показників автоматизованого контролю ПСЦС в умовах експлуатації та виробництва, розроблено структуру системи багатоканальних довготривалих вимірювань показників якості з застосуванням IP-технологій та використанням статистичної обробки отриманих даних вимірів).*

Патенти:

7. Патент на винахід №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 03 D 3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. Пат. №113473 Україна, МПК (2016.01) Н 03 D 13/00, Н 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. *(Здобувачем розроблено структуру і системотехнічну реалізацію адаптивного цифрового фазового дискримінатора).*

8. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК Н 03 К 5/19 (2006.01). Пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти. Патент на корисну модель №116809 Україна, МПК Н 03 К 5/19 (2006.01) / Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Коваль В.В. (Україна) - № u 2016 11977, Заявл. 25.11.2016, Опубл. Відомості про заявку 12.06.2017, Бюл. № 11. *(Здобувачем розроблено структуру пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти).*

Монографії:

9. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія / В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**, Є.В. Кільчицький та ін. – К.: НУБіП України, 2015. – 412 с. *(Здобувачем проведено системний аналіз способів контролю ПСЦС в умовах експлуатації та багатомономенклатурного виробництва, розроблено алгоритм контролю часових характеристик для візуалізації та аналізу даних, сформовано вимоги до опорного генератора та інших компонентів блока контролю періодичності).*

10. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж: монографія / В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**, О.В. Самков. – К.: НУБіП України, 2016. – 182 с. *(Здобувачем сформульовано завдання і запропоновано методикку синтезу структури оптимальної за швидкодією ПФАПЧ, проведено системний аналіз сучасних програмно-апаратних засобів вимірювання та контролю показників якості синхросигналів, отримано кількісну оцінку точності цифрової передачі сигналу еталонних частот).*

11. Коваль В.В. Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія / В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**. – К.: НУБіП України, 2016. – 412 с. *(Здобувачем запропоновано схемні реалізації пристрою синхронізації з автопідстроювання частоти, розроблено лабораторний стенд для дослідження основних показників системи фазового автопідстроювання та пристрій для виміру тривалості переходу від однієї частоти на іншу).*

12. Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія / В.В. Коваль, О.В. Самков, М.М. Худинцев, **Д.О. Кальян**. – К.: ТОВ ЦП «Компринт», 2018. - 494 с. *(Здобувачем проведено системний аналіз способів забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю ПСЦС в умовах багатомономенклатурного виробництва і технічної експлуатації, сформовано вихідну множину альтернатив побудови систем автопідстроювання частоти, розроблено на основі запропонованого методу багатоканального контролю показників якості апаратну структуру та діючий*

лабораторний макет БПП «TIMETER», отримано кількісну оцінку оптимальних за швидкістю перехідних процесів у системі автонідстроювання з адаптивним формуванням сигналу керуючої дії).

Матеріали та тези наукових доповідей:

13. Коваль В.В., Дорогобед В.В., **Кальян Д.О.**, Твердохліб А.В., Худинцев М.М. Автоматизована система багатоканального моніторингу синхроінформації цифрових телекомунікацій // Матеріали П'ятої міжнародної наук.-практ. конф. "Інфокомунікації – сучасність та майбутнє", м. Одеса, 29 – 30 жовтня 2015 р.: в 3 ч. Ч.3. - Одеса: ОНАЗ, 2015. – С.40-43. *(Здобувачем розроблено апаратну структуру автоматизованої системи багатоканального моніторингу синхроінформації, проведено обробку результатів вимірів і здійснено порівняння їх на відповідність міжнародним нормам).*

14. Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Мовчан С.А., Шклярєвський І.Ю. Дослідження якості переміщення синхроінформації з використанням протоколу прецизійного часу стандарту IEEE 1588-2008 // Матеріали П'ятої міжнар. наук.-практ. конф. "Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості". 8-9 жовтня 2015 р. – Одеса: Одеська державна академія технічного регулювання та якості, 2015. – С.94-95. *(Здобувачем розроблено схему дослідження показників якості синхроінформації, отримано за експериментальними даними кількісну оцінку точності переміщення синхросигналів).*

15. Коваль В.В., **Кальян Д.О.**, Циб В.М., Шевчук Б.В. Системи синхронізації цифрових інфокомунікацій з адаптивними властивостями / Тези доповідей III Міжнар. наук.-техн. конф. "Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК", м. Київ, 17-19 грудня 2015 р., Київ, Україна. – К.: НУБіП України, 2015. – С.36-38. *(Здобувачем розроблено систему синхронізації з адаптивними властивостями та фазовим автоматичним підстроюванням частоти).*

16. Коваль В.В., Дорогобед В.В., **Кальян Д.О.**, Коваль В.В. Комп'ютерне моделювання та статистична оптимізація пристроїв синхронізації з

адаптивними властивостями / Тези доповідей VII Міжнародної наукової конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації», 21-22 квітня 2016 р. Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, Кам'янець-Подільський: Кам'янець-Подільський національний університет ім. Івана Огієнка, 2016 – С.98-100. *(Здобувачем розроблено систему синхронізації з адаптивними властивостями на основі пристроїв автоматики з фазовим автопідстроюванням частоти, проведено аналіз оптимальних за швидкістю режимів перехідних процесів з використанням принципу максимуму).*

17. Koval V.V., Velichko O.N., Golovnia M.V., Dorogobed V.V., **Kalian D.O.**, Shkliarevskiy I.Y. Scientific and applied principles of creating united national synchroinformation system // Abstracts XXVII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 23-27 травня 2016: Тбілісі, Грузія, – 2016. - С. 96-98. *(Здобувачем визначено основні підходи щодо створення системи контролю якості транспортування синхроінформації та сигналів ПСЦС).*

18. Koval Valerii, Dorogobed Veronica, **Kalian Dmytro**, Khudyntsev Mykola, Koval Viktor. Optimizing dynamic of synchronization system with phase-locked loop for infocommunication networks // Abstracts XXVIII International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2016». 25-30 серпня 2016: Брно, Чехія, – 2016. - С.65. *(Здобувачем розроблено структури оптимального за швидкістю пристрою синхронізації з ієрархічним дворівневим регулятором).*

19. Коваль В.В., **Кальян Д.А.**, Шкляревский И.Ю. Использование мониторинга синхросигналов для повышения безопасности информационно-телекоммуникационных систем / Збірник матеріалів доповідей та тез II наук.-практ. конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем», 23-24 березня 2017 р. Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2017. – С.123-127. *(Здобувачем розроблено схему автоматизованої системи поліканального*

моніторингу на основі ПФАПЧ з адаптивними властивостями і вбудованим генератором опорного сигналу).

20. Koval Valerii, **Kalian Dmytro**, Khudyntsev Mykola, Lysenko Vitaliy, Samkov Oleksandr, Shkliarevskyi Igor. Synchroninformation's 24x7 monitoring tool for modern digital networks decision making // Abstracts XXX International Conference "Problems of decision making under uncertainties PDMU-2017». 14-19 august 2017: Vilnius, Lithuania, – 2017. - С.75-76. *(Здобувачем розроблено на основі запропонованого методу багатоканального моніторингу показників якості структури автоматизованого вимірювального пристрою).*

21. Koval V.V., Velychko O.M., Golovnya M.V., **Kalian D.O.**, Shkliarevskyi I.Y. Unified national synchro-information system – high-tech infrastructure for automated complexes // XXIV International Conference on automated control «Automatics-2017»: Kiev, Ukraine, september 13-15, 2017: proceedings. Kiev. 2017. P.8-9. *(Здобувачем запропоновано використання системи контролю показників якості синхросигналів в якості складової комплексу засобів національної синхроінформаційної системи).*

22. **Kalian D.** Optimizing circuits for self-tuning in devices for synchronization system for transmitting reference time and frequency signals from reference source. / 2017 IEEE International conference of information-telecommunication technologies and radio electronics (UkrMiCo'2017): Odesa, Ukraine, 11-15 september, 2017 / Materials of scientific and technical conference. – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2017. – p.p.179-183.

23. Коваль В.В., Самков О.В., **Кальян Д.А.**, Дубович-Костецький В.Г. Засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів інформаційно-телекомунікаційних систем / Збірник матеріалів доповідей та тез І Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS), м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.; Київський національний університет імені Тараса Шевченка, К.: ВПЦ «Київський університет», 2018 – С.100-103. *(Здобувачем розроблено програмно-апаратні засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів з*

субнаносекундною точністю).

24. Vitaliy Lysenko, Valerii Koval, Oleksandr Samkov, **Dmytro Kalian**, Dmytro Komarchuk. Computer-integrated Systems for Information Support and Automatiozation of the Complicated Objects // Abstracts XXX International Conference “Problems of decision making under uncertainties PDMU-2018». PDMU-2018, Prague, Czech republik, – 2018. – P.45-51. *(Здобувачем проведено аналіз способів контролю ПСЦС, розроблено автоматизовану систему контролю з блоком БПП «TIMETER» та формалізовано вимоги до компонентів блока з метою підвищення якості прийняття рішення про наявність контрольованого сигналу, отримано аналітичні залежності температурної нестійкості тривалості перехідного процесу).*

Матеріали наукових доповідей, включених до зарубіжної наукометричної бази Scopus:

25. Koval V.V., **Kalian D.O.**, Tepliuk 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. P.618-620. *(Здобувачем проведено аналіз способів процесу контролю ПСЦС, розроблено автоматизовану систему контролю, до складу якої входять діючий лабораторний макет блока БПП «TIMETER» і програмне забезпечення P4000winXP, отримано кількісну оцінку точності цифрової передачі синхросигналу).*

26. 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: НУ «Львівська політехніка». – 2017. – С.22-25. *(Здобувачем розроблено пристрій синхронізації з адаптивним цифровим фазовим дискримінатором для*

забезпечення мінімальної тривалості перехідного процесу згідно з встановленим оптимальним за швидкодією законом керування).

27. **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.

28. V.V. Koval, V.P. Lysenko, **D.O. Kalian**, M.V. Golovnya, O.V. Samkov, O.M. Piskun, M.S. Medina. National Time Scale Transmitting Through the Integrated Power Networks of SMART Technologies / International Scientific-Practical Conference «Problems of Infocommunications. Science and Technology» (PICS&T-2018). 9 - 12 October 2018: Kharkiv National University of Radio Electronics / Conference Proceedings. – P.89-94. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8632078> *(Здобувачем проведено вимірювання і аналіз залежності ТІЕ від часу сигналу, що формується розробленим адаптивним пристроєм синхронізації інформаційної системи передавання, отримано кількісні оцінки показників якості).*

29. Valerii Koval, Nadiia Kazakova, **Dmytro Kalian**, Dmytro Komarchuk, Vitaliy Lysenko, Oleksandr Samkov. The use of advanced information and communication technologies to monitor the quality of synchronization signals of IoT terminal devices / 3st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT-2019), Lviv, Ukrain, 2-6 july 2019. Львів: НУ «Львівська політехніка». – 2019. – С.22-25. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8847894> *(Здобувачем проведено аналіз способів контролю показників якості в умовах технічної експлуатації і виробництва ПСЦС, розроблено на основі запропонованого методу багатоканального контролю показників якості діючий лабораторний макет БПП «TIMETER» та ПЗ P4000winXP, отримано та проаналізовано дані вимірів, які використовуються для прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу).*

30. Valerii Koval, **Dmytro Kalian**, Oleksandr Osinskiy, Oleksandr Samkov, Mykola Khudyntsev and Vitaliy Lysenko. Diagnostics of Time Synchronization Means of the Integrated Power Grid of SMART Technologies by Using an Optimal Performance System of Automatic Frequency Adjustment // 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2020; Lviv-Slavske; Ukraine; 25 February 2020 до 29 February 2020/ Conference Proceedings 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2020). 2020. - P.269-276. *(Здобувачем проведено аналіз способів підвищення продуктивності комп'ютерно-інтегрованої системи діагностики засобів синхронізації часу, розроблено багатоканальні цифрові блоки вимірювання параметрів синхросигналів та оптимальну ієрархічну систему автоматичного керування з фазовим автопідстроюванням частоти опорного генератора, отримано результати імітаційного моделювання та лабораторних досліджень перехідних процесів).*

Рекомендації:

31. В.В. Коваль, **Д.О. Кальян**, В.В. Осипенко, О.В. Самков. Рекомендації з створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-мереж на основі протоколу прецизійного часу РТР. Для підприємств і організацій України / НАН України, Ін-т електродинаміки. Національний університет біоресурсів і природокористування (НУБІП) України. Укл. Коваль В.В. та інш. – Київ, 2017. 47 с. *(Здобувачем проведено аналіз та зазначено необхідність підвищення якості контролю параметрів синхросигналів, як складової управління ЄНСС).*

Відомості про апробацію результатів дисертації

Основні положення та результати роботи доповідалися та обговорювалися на таких конференціях:

- V Міжнародній науково-практичній конференції “Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості” (м. Одеса, 8-9 жовтня 2015 р.);
- V Міжнародній науково-практичній конференції “Інфокомунікації – сучасність та майбутнє” (м. Одеса, 29-30 жовтня 2015 р.);
- III Міжнародній науково-технічній конференції “Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК” (м. Київ, 17-19 грудня 2015 р.);
- XIV Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та інформатики» (TCSET’2016) (м. Львів-Славське, 23-26 лютого 2016 р.);
- VII Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації» (м. Кам’янець-Подільський, 21-22 квітня 2016 р.);
- XXVII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2016» (м. Тбілісі, Грузія, 23-27 травня 2016 р.);
- XXVIII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2018» (м. Брно, Чехія, 25-30 серпня 2016 р.);
- II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (м. Київ, 23-24 березня 2017 р.);
- II Міжнародній конференції з передових інформаційних та комунікаційних технологій (AICT-2017) (м. Львів, 4-7 липня 2017 р.);
- XXX Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2017» (м. Вільнюс, Латвія, 14-19 серпня 2017 р.);

- IEEE міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMiCo'2017) (м. Одеса, 11-15 вересня 2017 р.);
- XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «АВТОМАТИКА – 2017» (м. Київ, 13-16 вересня 2017 р.);
- I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (PCSITS) (м. Київ, 5-6 квітня 2018 р.);
- XIV Міжнародній конференції з передових тенденцій радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії (TCSET 2018) (м. Львів-Славське, 20-24 лютого 2018 р.);
- XXXII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU-2018» (м. Брно, Чехія, 23-31 вересня 2018 р.);
- IEEE науково-практичній конференції «Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології» (PICS & T-2018) (м. Харків, 9-12 жовтня 2018 р.);
- III Міжнародній конференції з передових інформаційних та комунікаційних технологій (AICT-2019) (м. Львів, 2-6 липня 2019 р.);
- XV Міжнародній конференції з передових тенденцій радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії (TCSET 2020) (м. Львів-Славське, 25-29 лютого 2020 р.).