

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ**



КАЛІАН ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 681.518.5:621.39

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ КОНТРОЛЮ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ
ПРИСТРОЇВ СИНХРОНІЗАЦІЇ ЦИФРОВИХ СИГНАЛІВ
БАГАТОНОМЕНКЛАТУРНОГО ВИРОБНИЦТВА**

05.13.07 «Автоматизація процесів керування»

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис

Роботу виконано в Національному університеті біоресурсів і природокористування України Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Коваль Валерій Вікторович,
Національний університет біоресурсів
і природокористування України,
професор кафедри автоматики
та робототехнічних систем
імені академіка І. І. Мартиненка

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ладанюк Анатолій Петрович,
Національний університет
харчових технологій,
професор кафедри автоматизації
та комп'ютерних технологій управління

доктор технічних наук, професор
Волков Віктор Едуардович,
Одеський національний університет
імені І. І. Мечникова,
завідувач кафедри теоретичної механіки

Захист відбудеться «03» листопада 2020 року о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.004.07 у Національному університеті біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 15, навчальний корпус № 3, кімната 301

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Національного університету біоресурсів і природокористування України за адресою: 03041, м. Київ, вул. Героїв Оборони, 13, навчальний корпус № 4, кімната 41а

Автореферат розіслано «02» листопада 2020 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



А. В. Петренко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

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

Умови багатоміністерського виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів, більш суворе і складне нормування їх технічних характеристик обумовлюють постійний розвиток існуючих та створення нових методів контролю. Контроль показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатоміністерського 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 пристроїв синхронізації цифрових сигналів 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, в умовах одиничного та дрібносерійного багатоміністерського гнучкого виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів, обумовлюють необхідність вирішення задач апаратно-програмної реалізації з використанням новітніх мікроелектронних компонентів, ефективних алгоритмічних та схемотехнічних рішень. Зважаючи на це, актуальними є розроблення 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 опорного генератора, блока первинного перетворювача, програмного забезпечення обробки результатів контролю та їх візуалізації.

Відомі автоматизовані системи контролю, 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.

Автоматизовані системи контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів з оптимальними за швидкістю підсистеми фазового автопідстроювання частоти 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: І. Ш. Невлюдов, А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, В. Е. Волков, І. В. Ельперін, Л. С. Ямпольський, А. О. Бобух, Г. В. Біловол, Р. Н. Парахуда, В. В. Невлюдова, В. І. Шевцов, В. А. Соловйов, О. І. Лісовиченко, Р. І. Дзінько. Велику увагу розробленню та дослідженню автоматичних систем керування та їх складових приділили такі вітчизняні та закордонні автори: В. І. Борщ, В. В. Шахгільдян, В. К. Стеклов, Л. Н. Казаков, Б. Я. Костик, В. В. Коваль, R. W. Sonneman, S. C. Gupta.

Отже, розроблення методів підвищення продуктивності, швидкодії та надійності автоматизованого контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів є актуальною науково-прикладною задачею, яка визначає напрям досліджень дисертації.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертацію виконано у Національному університеті біоресурсів і природокористування України в рамках прикладних держбюджетних науково-дослідних робіт за темами «Розробка концепції наукових і прикладних засад створення єдиної інформаційної системи розповсюдження національної шкали часу з використанням ІР-технологій» (номер державної реєстрації 0115U003376, 2015–2016 рр.); «Управління споживанням та генерацією енергії на підприємствах агропромислового комплексу на основі концепції інтелектуальних технологій (Smart Grid)» (номер державної реєстрації 0115U003356, 2015–2016 рр.) та «Розроблення технології діагностики якості функціонування сільськогосподарських споживачів електричної енергії на основі використання ІР-технологій» (номер державної реєстрації 0119U100829, 2019–2020 рр.), де здобувач був виконавцем.

Мета та 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 розроблення програмного забезпечення і блока первинних перетворювачів контрольованих сигналів з ієрархічною системою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора.

Для досягнення мети вирішувалися такі основні завдання:

- визначити основні підходи до забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю пристроїв синхронізації в умовах багатомоделного гнучкого автоматизованого виробництва;

- дослідити багатомоделне виробництво пристроїв синхронізації цифрових сигналів як об'єкт автоматизації;

– провести на основі системного підходу аналіз способів підвищення продуктивності процесу контролю в умовах багатоміністерського виробництва;

– розробити апаратну структуру вимірювального блока автоматизованої системи контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів і програмне забезпечення для візуалізації та статистичної обробки отриманих цифрових даних;

– розробити структуру пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії процесу контролю;

– 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.

– дослідити підсистему фазового автопідстроювання частоти опорного генератора блока первинних перетворювачів автоматизованої системи контролю та здійснити її оптимізацію за швидкодією;

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

Об'єкт дослідження – процеси керування багатоміністерським гнучким автоматизованим виробництвом конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

Предмет дослідження – 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 вирішення поставлених в роботі завдань використовувалися: методи сучасної теорії автоматичного керування, імітаційного моделювання, елементи теорії оптимального керування – для задач оптимізації за швидкодією системи автопідстроювання частоти генератора; системний аналіз – для аналізу структури системи керування гнучкими інтегрованими виробництвами, системи контролю та вимірювань, характеристик пристроїв синхронізації цифрових сигналів з урахуванням умов їх багатоміністерського виробництва; статистичні методи – для розрахунку та оцінки показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів, обробки інформації, отриманої в результаті вимірювань; теоретико-ймовірнісні методи – для дослідження температурної нестійкості; методи експериментальних досліджень – для проведення налагодження і тестування розробленого лабораторного макета; методи прикладного програмування – для задач розроблення алгоритмів і програм.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше запропоновано метод створення автоматизованої системи керування виробництвом пристроїв синхронізації з використанням багатоканальної структури автоматизованої

системи керування 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 багатомономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва.

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 «мінімаксом» методом і, як наслідок, підвищити якість прийняття рішення оператором щодо зняття невизначеності про наявності або відсутності контрольованого сигналу.

Вперше запропоновано для вибору варіанта побудови підсистеми фазового автопідстроювання частоти опорного генератора автоматизованої системи керування 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 сформулювати вихідну множину варіантів за умови можливості їх реальної реалізації.

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.

Вперше розроблено ієрархічну структуру підсистеми фазового автопідстроювання частоти 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 академіка Л. С. Понтрягіна і, як наслідок, зменшує тривалість перехідного процесу від 2,7 до 4 разів залежно від значення початкових умов.

Набув подальшого розвитку метод синтезу оптимальних за швидкодією систем, що дало змогу аналітично визначити граничні умови, за яких періодичність характеристики дискримінатора 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.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблено автоматизовану систему контролю показників якості багатомономенклатурного виробництва пристроїв синхронізації, яка пройшла дослідні випробування і використовувалася у процесі багатомономенклатурного гнучкого виробництва прецизійних пристроїв синхронізації цифрових сигналів різного призначення в ТОВ «Інформаційні системні технології».

Розроблено діючий лабораторний макет автоматизованої системи керування з блоком БПП «TIMETER» і програмним забезпеченням R4000winXP, який 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.

Запропоновану автоматизовану систему захищено патентами України. 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 пристроїв синхронізації цифрових сигналів;

- зменшенні тривалості перехідного процесу від 2,7 до 4 разів залежно від значення початкових умов пристроїв синхронізації цифрових сигналів 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 розроблення Quartus Prime Lite Edition, яке використано для програмування програмованих логічних схем ALTERA EPM7128SLC84.

Підготовлено рекомендації для підприємств і організацій України, які затверджено 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 єдиної національної синхроінформаційної системи. 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 імені академіка І. І. Мартиненка Національного університету біоресурсів і природокористування 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 результатів дисертації. Основні положення й результати теоретичних та експериментальних досліджень доповідались та публічно обговорювалися на: V Міжнародній науково-практичній конференції «Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості» (м. Одеса, 2015 р.); V Міжнародній науково-практичній конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (м. Одеса, 2015 р.); III Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електро-технологій та автоматики в АПК» (м. Київ, 2015 р.); XIV Міжнародній конференції «Сучасні проблеми радіотехніки, телекомунікацій та інформатики» (м. Львів – Славське, 2016 р.); VII Міжнародній науковій конференції «Сучасні проблеми математичного моделювання, прогнозування та оптимізації» (м. Кам'янець-Подільський, 2016 р.); XXVII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU – 2016» (м. Тбілісі, Республіка Грузія, 2016 р.); XXVIII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU – 2018» (м. Брно, Чеська Республіка, 2016 р.); II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (м. Київ, 2017 р.); II Міжнародній конференції з передових інформаційних та комунікаційних технологій (м. Львів, 2017 р.); XXX Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU – 2017» (м. Вільнюс, Латвійська Республіка, 2017 р.); XXIV Міжнародній конференції з автоматичного управління «АВТОМАТИКА – 2017» (м. Київ, 2017 р.); VII Міжнародній науково-практичній конференції «Технічне регулювання, метрологія, та інформаційні технології» (м. Одеса, 2017 р.); I Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем» (м. Київ, 2018 р.); XIV Міжнародній конференції з передових тенденцій радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії (м. Львів – Славське, 2018 р.); XXXII Міжнародній конференції «Проблеми прийняття рішень в умовах невизначеності PDMU – 2018» (м. Брно, Чеська Республіка, 2018 р.); IEEE науково-практичній конференції «Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології» (м. Харків, 2018 р.); III Міжнародній конференції з передових інформаційних та комунікаційних технологій (м. Львів, 2019 р.); XV Міжнародній конференції з передових тенденцій радіоелектроніки, телекомунікацій та комп'ютерної інженерії (м. Львів – Славське, 2020 р.).

Публікації. Основні положення дисертації викладено у 31 науковій праці, з яких 4 монографії, 5 статей у наукових фахових виданнях України, включених до міжнародних наукометричних баз даних, стаття у науковому виданні іншої держави, патент на винахід, патент на корисну модель, рекомендації, 18 тез наукових доповідей.

Структура та обсяг дисертації. Дисертацію викладено на 284 сторінках. Робота складається з анотацій, вступу, п'яти розділів, висновків, та додатків.

Дисертацію ілюстровано 2 таблицями та 75 рисунками. Список використаних джерел налічує 232 найменування.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, визначено об'єкт та предмет дослідження, наведено зміст роботи, визначено методи досліджень, показано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У першому розділі «**Аналіз проблем автоматизації процесу контролю частотно-часових показників пристроїв синхронізації в умовах багатоміністерського гнучкого інтегрованого виробництва**» виконано аналіз характеристик пристроїв синхронізації цифрових сигналів (далі – ПСЦС) з урахуванням умов їх багатоміністерського виробництва та експлуатації у складі сучасних цифрових високотехнологічних систем. Наведено означення найбільш важливим показникам якості пристроїв синхронізації, які використовуються в практичних застосуваннях, а саме характеристики точності та стабільності. Стабільність ПСЦС – це його спроможність формувати інтервал часу з постійним значенням, а точність – це максимальна похибка часу або частоти синхросигналів, яку можна виміряти протягом визначеного терміну служби, якщо інший термін не вказано. Виокремлено часові та частотні характеристики сигналів ПСЦС, що використовуються для оцінки стабільності та точності ПСЦС на основі вимірів дискретних відліків похибки часу. Виявлено тенденцію щодо використання вимірів безпосередньо вимірюваних у часовій області для оцінки показників якості ПСЦС. Проведено математичний аналіз сигналів синхронізації та наведено рівняння, згідно з якими визначають функцію похибки інтервалу часу $TIE_i(\tau)$.

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 використовуватися значна кількість показників. Проведено аналіз методів розрахунку та способів оцінки показників якості ПСЦС з урахуванням умов їх багатоміністерського виробництва та експлуатації, за результатами якого зроблено низку висновків. Одним з яких є висновок про те, що для визначення показників якості необхідним є проведення автоматичних або автоматизованих довготривалих вимірювань ПСЦС, що вимагає застосування сучасних засобів комп'ютерної техніки та ІР-технологій.

Проаналізовано функції системи контролю та вимірювань показників якості багатоміністерського виробництва ПСЦС. Визначено процес контролю частотно-часових показників ПСЦС як процес перевірки відповідності їх характеристик встановленим технічним вимогам. Причому інформація про стан контрольованих ПСЦС має 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 гнучким автоматизованим виробництвом.

Проведений на основі системного підходу аналіз процесу контролю показників якості ПСЦС гнучкої інтегрованої системи (ГІС) обумовлює доцільність застосування методу побудови автоматизованої системи керування виробництвом з використанням багатоканальної структури автоматизованої системи контролю (далі – АСК), яка забезпечує багатократне підвищення продуктивності процесу контролю та спрощує візуалізацію й аналіз даних, що використовуються для прийняття рішень щодо змін параметрів технологічного процесу в умовах багатомоделного виробництва.

Вперше запропоновано і розроблено багатоканальну АСК, яка забезпечує збільшення до чотирьох каналів вимірювань показників якості, що підвищує в порівнянні з одноканальною 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 багатомоделного гнучкого виробництва прецизійних ПСЦС.

Організаційну структуру підсистеми автоматизованого контролю та вимірювань показників якості ПСЦС гнучкої інтегрованої системи наведено на рис. 1.

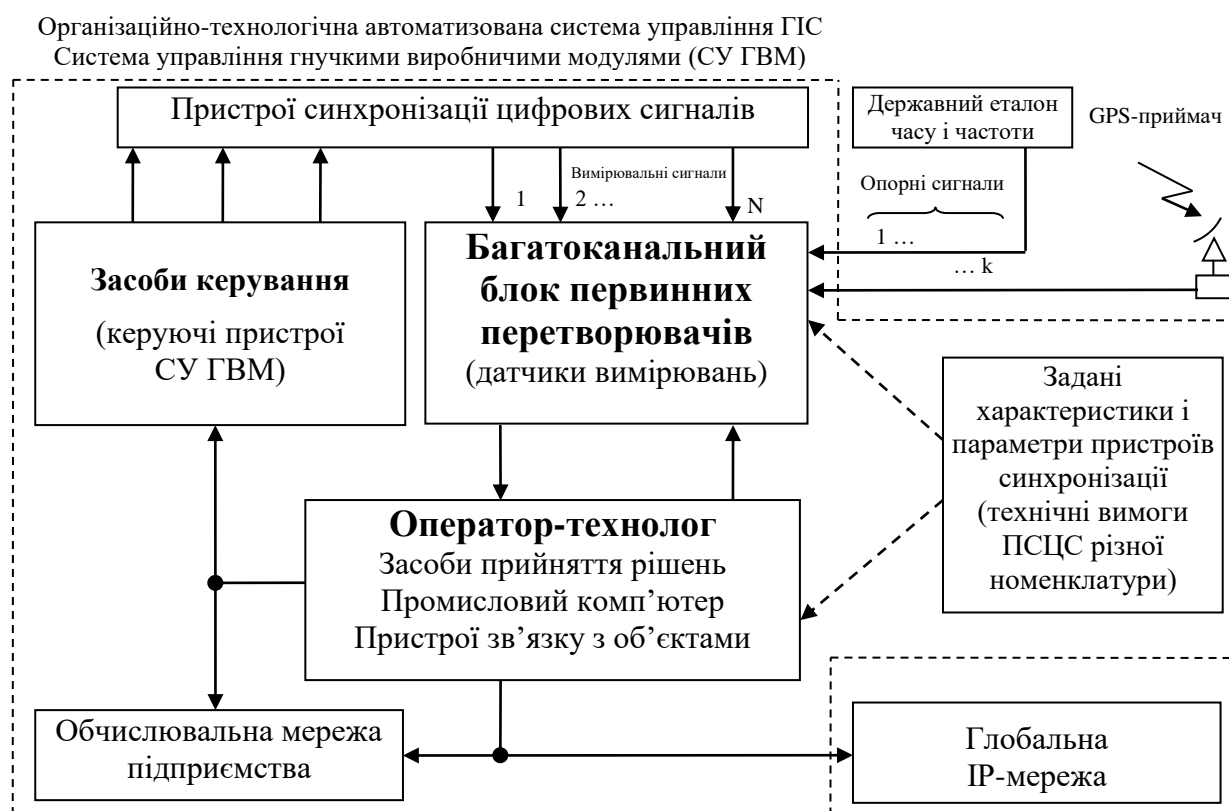


Рис. 1. Організаційна структура підсистеми автоматизованого контролю та вимірювань показників якості ПСЦС гнучкої інтегрованої системи

Тому, як на етапі виготовлення пристрою, так і на етапі його функціонування (для діагностики стану обладнання) однією з найважливіших фаз є вимірювання параметрів синхросигналів, які передаються на різних ділянках, проведення збору й аналізу отриманої інформації.

Варто зауважити, що підвищення продуктивності використання засобів вимірювань можливе також за рахунок універсалізації засобів контролю, тобто можливості їх подвійного використання в якості підсистеми контролю системи технічної експлуатації сучасних високотехнологічних об'єктів. Для ефективної реалізації вказаної можливості з використанням системного підходу проведено аналіз особливостей процесу контролю показників якості ПСЦС у разі введення їх в експлуатацію та в процесі технічного обслуговування на об'єктах цифрових телекомунікацій й цифрових підстанціях енергетичних мереж SMART Grid технологій.

Встановлена на основі системного аналізу можливість підвищення продуктивності використання засобів вимірювань за рахунок їх застосування як підсистеми контролю системи технічної експлуатації сучасних високотехнологічних об'єктів з урахуванням особливості процесу розподілу синхроінформації між розосередженими по мережах ПСЦС, багаторівневістю та ієрархічністю їх топологічних структур.

Підсумовуючи можна сказати, що розроблена структура АСК, новизна якої полягає у збільшенні числа каналів та одночасному виконанні вимірів показників якості, забезпечує підвищення продуктивності контролю, спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації можливості у «ручному режимі» приймати рішення щодо змін параметрів технологічного процесу багатомітенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва ПСЦС, а також у процесі їх технічної експлуатації в складі сучасних високотехнологічних об'єктів.

На підставі виконаного аналізу обґрунтовано доцільність проведення досліджень, які спрямовані на розв'язання наукових задач щодо розроблення сучасної АСК показників якості ПСЦС в умовах багатомітенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва.

У другому розділі **«Розроблення методів та структур АСК, що забезпечують підвищення продуктивності, швидкодії та надійності процесу контролю показників якості ПСЦС»** представлено розв'язок задач із розроблення методів та структур системи контролю показників якості ПСЦС, що забезпечують підвищення продуктивності, швидкодії та надійності вимірювань в умовах багатомітенклатурного виробництва.

До складу сучасних систем контролю та вимірювань параметрів якості АСК гнучких інтегрованих систем входять датчики, як первинні перетворювачі, що перетворюють електричні фізичні величини в електричні цифрові сигнали, наведені у виді цифрових даних результатів вимірювань. 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. Розглянуто методологію вимірювання застосовувалася головним чином тоді, коли використовувалися вимірювальні комплекси параметрів ПССС, що складаються з деякої кількості стандартних дорогих вимірювальних приладів. Поява сучасних спеціалізованих і недорогих інтегральних мікросхем змінила ситуацію на користь їх використання як прецизійних вимірювачів часових інтервалів. Для практичної реалізації первинного перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал розроблено структуру оригінального адаптивного цифрового фазового дискримінатора (АЦФД), на який отримано патент України на винахід.

АЦФД дає змогу 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 реєстрів та комутатора. Отже, змінюючи розрядність лічильників імпульсів, можна змінювати його діапазон вимірювань згідно з технічними вимогами. Крім цього, забезпечується адаптивне кероване формування кодової комбінації про величину кута зсуву фази (похибки інтервалу часу) двох взаємно незалежних періодичних імпульсних послідовностей та підвищується достовірність викладення результатів вимірювань у цифровому виді. Розроблено структуру пристрою цифрового контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти, на який отримано патент України на корисну модель, у якому прийняття рішення здійснюється в кінці кожного періоду сигналу тактової частоти, який формується опорним генератором, що забезпечує підвищення надійності та швидкодії контролю.

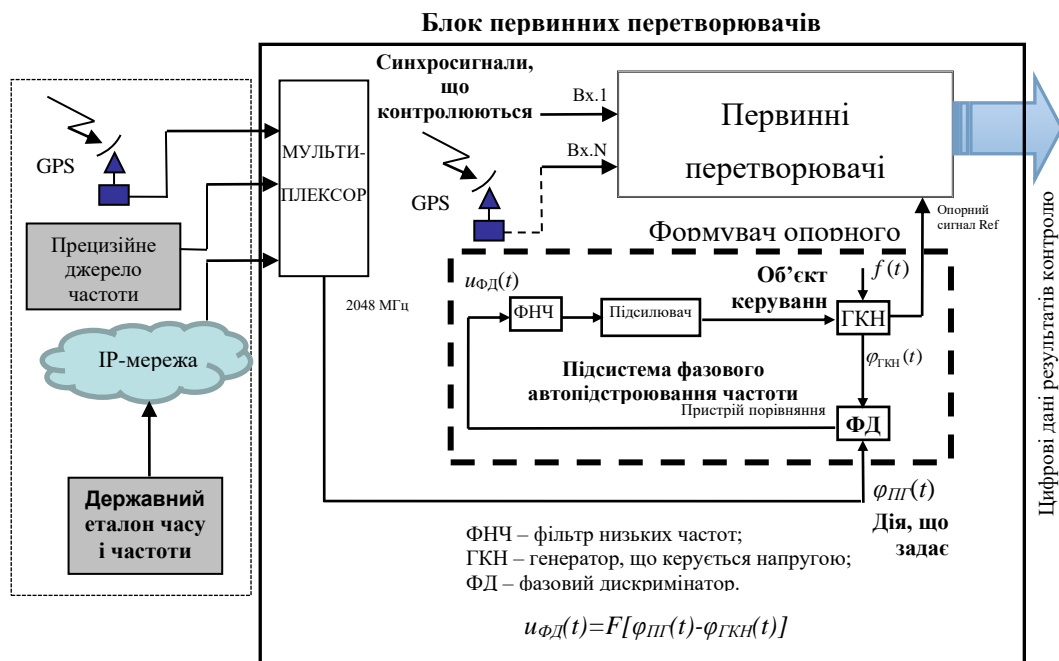


Рис. 2. Схема формування опорного сигналу з використанням ПФАПЧ

Первинне перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал ґрунтується на порівнянні інтервалу часу, що вимірюється з еталонною

тривалістю періоду. Для реалізації методу порівняння необхідний еталонний (опорний) генератор більш високої точності, в якості якого використовується генератор, що керується напругою, яка створюється в результаті роботи підсистеми фазового автопідстроювання. На рис. 2 наведена схема формування опорного сигналу з використанням ПФАПЧ та можливості отримання синхронізуючого сигналу для неї від системи GPS, прецизійних джерел часу і частоти, обладнання для передавання даних, що передаються по IP-мережі за протоколом RTP.

Акцентовано увагу на вибір засобу реалізації ПФАПЧ як одного з важливих питань, вирішення якого визначає основні взаємопов'язані показники якості системи, що проектується, а саме такі як швидкодія, точність, стійкість, надійність та ін. На основі аналізу джерел інформації сформована вихідна множини альтернатив побудови систем автопідстроювання частоти генератора.

Структурну схему багатоканального блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» з ПФАПЧ наведено на рис. 3.

Найбільшу кількість однотипних блоків в БПП «TIMETER» складають блоки контролю періодичності (далі – БКП), що дають можливість усувати невизначеність про наявність або відсутність контрольованого сигналу з заданою частотою. БКП побудовані на типових мікросхемах мультівібратора з чеканням та можливістю перезапуску типу 74HC123 виробництва багатьох відомих фірм. Оператор на основі аналізу сигналів, що надходять від БКП та даних результатів вимірювань, приймає рішення щодо результатів процесу контролю.

Функціональна схема БКП, що розроблена на основі мікросхеми 74HC123 з врахуванням паразитних ємностей та налагоджувального змінного резистора, наведено на рис. 4.

Тривалість вихідного імпульсу ТБКП визначається величиною – тривалістю перехідного процесу в інтегруючій RC-ланці (резистор R і конденсатор C, які відповідно підключаються до виводів RC і C мікросхеми мультівібратора 74HC123). Тривалість перехідного процесу в інтегруючій RC-ланці по суті виступає як зразковий часовий інтервал, з яким порівнюються тривалості тактового інтервалу контрольованого сигналу. У разі перевищення тривалості тактового інтервалу (включно і відсутності самого сигналу) над тривалістю зразкового часового інтервалу на виході БКП формується вихідний імпульс зі значенням логічного 0, що свідчить про відсутність періодичності у контрольованому сигналі.

Для налаштування БКП під час його виготовлення, тобто за температури 20 °C, а саме встановлення заданого номінального значення тривалості перехідного процесу в інтегруючій RC-ланці, використовується схема зі змінним опором $R_{нал}$, або схема зі зміною ємністю. Інтегруюча RC-ланка з мікросхемою мультівібратора 74HC123 БКП складаються з великої кількості реальних або умовних електричних компонентів, кожна з яких певною мірою впливає на температурну нестійкість тривалості перехідних процесів (далі – ТПП) зразкового сигналу і, як наслідок, на правильність прийняття рішення

про усунення невизначеності щодо наявності або відсутності контрольованого сигналу.

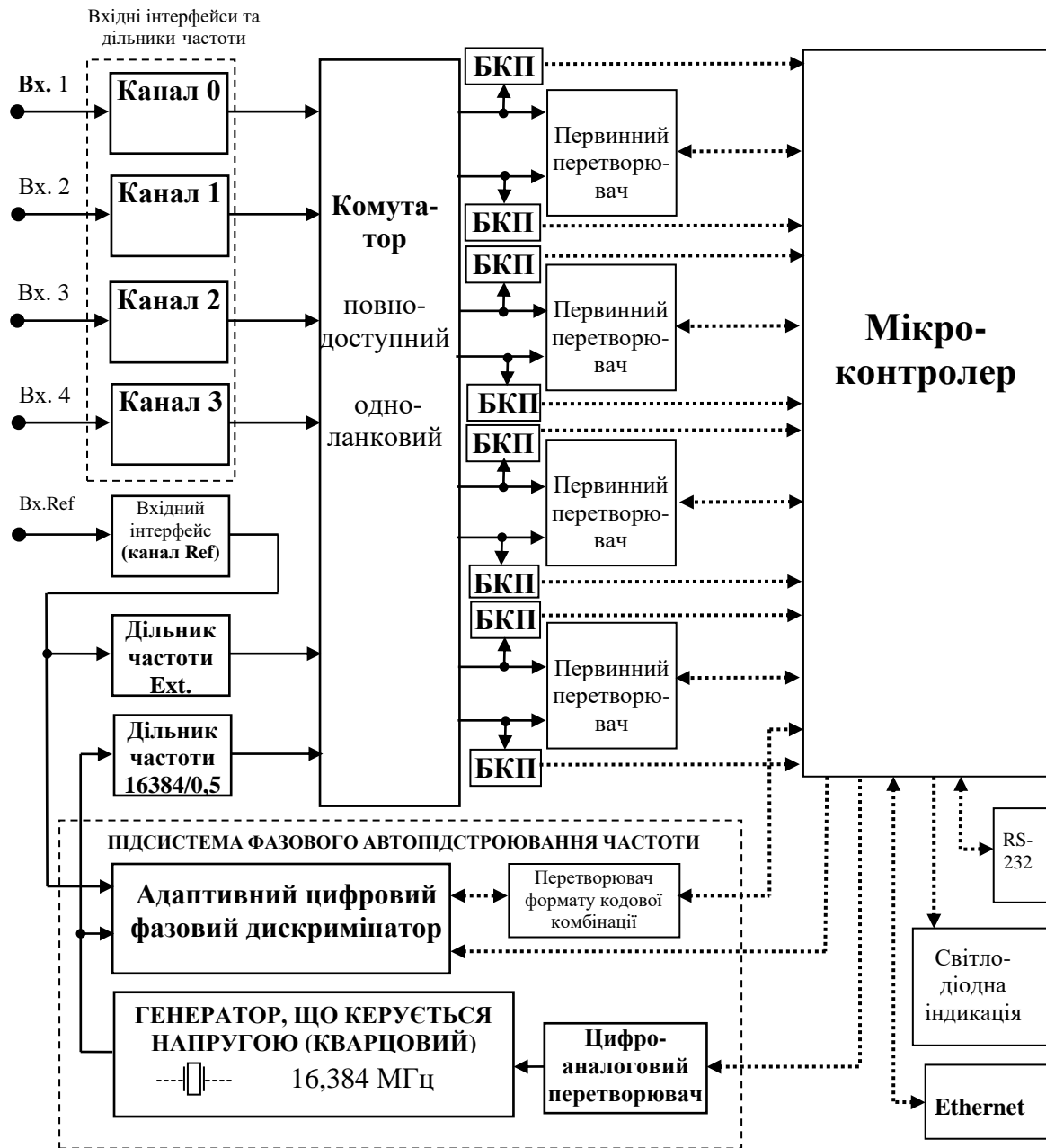


Рис. 3. Структурна схема блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» АСК

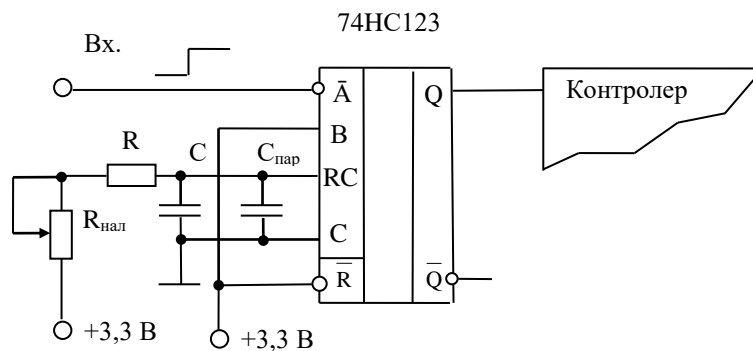


Рис. 4. Функціональна схема БПП

Зважаючи на викладене, актуальним є розроблення теоретико-ймовірнісних методів розрахунку вимог до пристроїв та їх складових (електричних компонентів), а також дослідження температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу БКП.

Математичне очікування $M(\Delta\tau_1)$ відхилення тривалості перехідного процесу у разі зміни температури на 1°C визначається рівнянням

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

де τ – номінальне значення тривалості перехідного процесу; $M(TKT)$ – математичне очікування температурного коефіцієнта тривалості (TKT) перехідного процесу.

Раціональне конструювання високостабільних пристроїв обумовлює необхідність правильної оцінки можливого розкиду величини $\Delta\tau_1$ і особливо ролі кожного елемента БКП у формуванні області різних значень $\Delta\tau_1$. Для визначення температурного коефіцієнта тривалості перехідного процесу зразкового сигналу в інтегруючій RC-ланці мультівібратора БКП можна використати відому формулу:

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

де α_C – температурний коефіцієнт ємності та α_R – температурний коефіцієнт опору інтегруючої RC-ланки мультівібратора БКП.

Звідси слідує, що

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

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

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

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

Для групи паралельно з'єднаних резисторів отримано такий вираз для математичного очікування сумарного температурного коефіцієнта α_R :

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

та вираз для дисперсії сумарного температурного коефіцієнта опору:

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

де $\rho_m = R_m/R$, α_{Rm} і $D(R_m)$ – відповідно питома вага, температурний коефіцієнт і дисперсія m -го опору R_m у загальному опорі групи резисторів. Нуль в індексі означає, що необхідно підставити ідеальні значення опору, температурного коефіцієнта та питомої ваги опору відповідного резистора.

Аналізуючи отримані формули, можна зробити такі висновки. Кожен резистор впливає на розкид температурного коефіцієнта сумарного опору тим сильніше, чим більше питома вага опору даного резистора в загальному опорі. Цей вплив виявляється двояко: у вигляді абсолютної неточності температурного коефіцієнта опору і відносній неточності значення самого опора даного резистора $D(R_m)/R_m^2$. Вплив відносної неточності опора кожного резистора проявляється тим сильніше, чим більше різниці температурних коефіцієнтів опорів цього m -го резистора та інших k -х резисторів групи $(\alpha_{Rm} - \alpha_{Rk})$. Аналогічні висновки отримано для групи з'єднаних конденсаторів.

Отримано вирази для визначення температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу мультивібратора БКП у разі нелінійних температурних характеристиках електричних компонентів.

У третьому розділі «Формалізація завдань керування, динамічне моделювання та оптимізація за швидкодією підсистеми автопідстроювання частоти АСК» виконано оптимізацію за швидкодією підсистеми фазового автопідстроювання частоти генератора опорного сигналу БПП АСК показників якості ПСЦС. Визначено особливості розроблення системи з фазовим автопідстроювання частоти генератора, що керується напругою, як складної багатофункціональної системи. Однією зі специфічних особливостей роботи ПФАПЧ генератора, що керується напругою, є наявність нелінійностей (періодичної у функції фазової похибки нормованої характеристики фазового дискримінатора).

Сформульовано задачу оптимізації за швидкодією системи автопідстроювання частоти вбудованого кварцового генератора, який керується напругою (ГКН) БПП, що підвищить якісні показники опорного сигналу і, як наслідок, забезпечить підвищення точності та достовірності АСК ПСЦС. Розглядається лінеаризована математична модель ПФАПЧ, функціональна схема якої наведена на рис. 5.

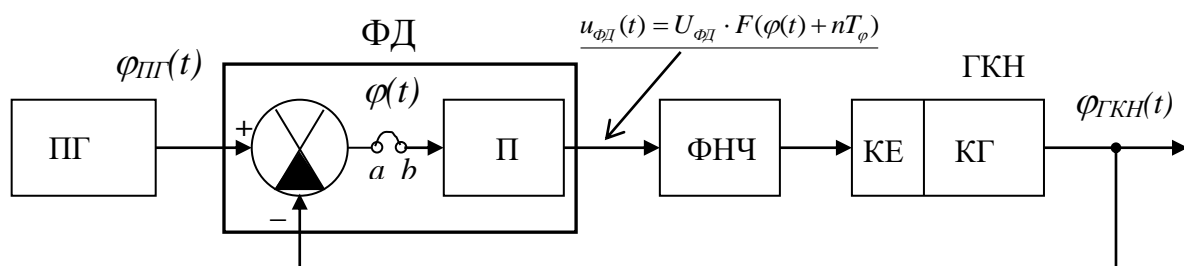


Рис. 5. Функціональна схема ПФАПЧ генератора опорного сигналу БПП

На рис. 5 позначено: ПГ – провідний генератор; ФД – фазовий дискримінатор; П – перетворювач фазової різниці (похибки системи) у сигнал керуючої дії; ФНЧ – фільтр нижніх частот; KE – керуючий елемент; КГ – кварцовий генератор, що керується напругою; ГКН – генератор, що керується напругою; $u_{\text{ФД}}$ – сигнал на виході ФД (керуюча дія); $\varphi(t) = \varphi_{\text{ПГ}}(t) - \varphi_{\text{ГКН}}(t)$ – похибка підсистеми автопідстроювання; $\varphi_{\text{ПГ}}(t)$ і $\varphi_{\text{ГКН}}(t)$ – відповідно фази сигналів ПГ $u_{\text{ПГ}}(t)$ і ГКН $u_{\text{ГКН}}(t)$.

Математичну модель замкнутої системи автоматичного керування запишемо у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \Omega_{\Pi} - u_{\Phi Д}(t) K_{\Phi НЧ}(t) S_{КЕ} K_{КГ}(t); \\ \varphi(t) = \varphi_{\Pi Г}(t) - \varphi_{ГКН}(t); \\ u_{\Phi Д}(t) = U_{\Phi Д} K_{\Phi Д} F(\varphi(t) + nT_{\varphi}); \\ -1 \leq F(\varphi(t) + nT_{\varphi}) \leq 1, \end{cases} \quad (1)$$

де $\varphi(t)$ – фазова похибка підсистеми автопідстроювання частоти ГКН; t – час (незалежна змінна); Ω_{Π} – початкове розстроювання ГКН відносно ПГ; $S_{КЕ}$ – крутизна характеристики КЕ; $u_{\Phi Д}(t)$ – керуюча дія; $K_{\Phi НЧ}(t)$ – коефіцієнт передавання фільтра нижніх частот (ФНЧ); $K_{КГ}(t)$ – коефіцієнт передавання КГ, що керується напругою; $\varphi_{\Pi Г}(t)$ і $\varphi_{ГКН}(t)$ – відповідно фаза провідного генератора (ПГ) і ГКН; $U_{\Phi Д}$ – екстремальне значення сигналу керуючої дії на виході ФД; $K_{\Phi Д}$ – коефіцієнт передавання ФД; $F(\varphi + nT_{\varphi})$ – нормована періодична характеристика ФД з коефіцієнтом періоду n ; T_{φ} – період періодичної за координатою φ дискримінаційної характеристики ФД.

Специфікою моделі виду (1) є врахування періодичності керуючої дії в функції фазової координати системи, яка формується ФД. Новизною результатів цієї роботи є дослідження оптимальних за швидкодією ПФАПЧ ГКН, які враховують керуючі дії з періодичностями, що обумовлені періодичністю дискримінаційної характеристики ФД.

Варто також зазначити, що особливістю моделі виду (1) є наявність двох параметрів керування $\varphi(t)$ і T_{φ} .

Сформулюємо задачу оптимального за швидкодією керування в ПФАПЧ з принципом керування за відхиленням за умов, що керуючою дією на об'єкт є сигнал на виході ФД $u_{\Phi Д}(t) = U_{\Phi Д} F[\varphi(t)]$, який формується перетворювачем П в результаті обробки сигналу фазової різниці (похибки системи) $\varphi(t) = \varphi_{\Pi Г}(t) - \varphi_{ГКН}(t)$.

Інтегральний критерій оптимальності запишемо у вигляді функціоналу

$$T = \int_{t_0}^{t_k} 1 \cdot dt \Rightarrow \min, \quad (2)$$

який має набувати найменшого значення.

Пропонується синтез структури оптимальної за швидкодією системи виконувати в три етапи: перший – аналітичний; другий – реалізаційний («мозкової атаки»); третій – імітаційного моделювання. На першому етапі синтез системи почнемо з розгляду результатів виконаного аналізу та встановлення аналітичних залежностей для формування сигналу керуючої дії оптимального за швидкодією закону керування в ПФАПЧ першого порядку. Врахуємо реальне обмеження на амплітуду керуючої дії типу «насичення»:

$$U_{\Phi Д\min} \leq U_{\Phi Д} \leq U_{\Phi Д\max}, \quad (3)$$

де $U_{\text{ФДмакс}}$ і $U_{\text{ФДмін}}$ – відповідно максимальне і мінімальне значення сигналу на виході ФД, а також обмеження на часовий інтервал керуючої дії:

$$\varphi(t) = \varphi(t) + nT_{\varphi}, \quad T_{\varphi} \geq 2\pi, \quad \forall n = -\infty, +\infty. \quad (4)$$

Складемо функцію Гамільтона відповідно до першого рівняння системи (1):

$$H = \Psi_1[\Omega_{\Pi} \pm S_{KE} u_{\text{ФД}}(t)] - 1, \quad (5)$$

а також диференціальне рівняння для допоміжної змінної Ψ_1 :

$$\frac{d\Psi_1}{dt} = \frac{dH}{d\varphi} = 0. \quad (6)$$

Вирішуючи диференціальне рівняння (6), отримаємо такі рівняння для допоміжної змінної Ψ_1 :

$$\Psi_1 = \text{const}. \quad (7)$$

Спочатку врахуємо лише обмеження на амплітуду керуючої дії типу «насичення». Тоді для забезпечення максимуму функції Гамільтона (5) по $u_{\text{ФД}}(t)$ необхідно, щоб напруга на виході ФД визначалася з рівняння

$$u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{екстр}} \text{sign}(\pm S_{KE} \Psi_1), \quad (8)$$

де $U_{\text{екстр}}$ дорівнює граничним значенням нерівності (3):

$$u_{\text{ФД}}(t) = U_{\text{екстр}} \text{sign} \varphi_0. \quad (9)$$

Звідки можна визначити тип нормованої характеристики ФД:

$$F[\varphi(t + nT_{\varphi})] = \text{sign} \varphi_0, \quad (10)$$

де φ_0 – початкове значення фазової похибки $\varphi(t)$.

Для реалізації оптимальних за швидкодією перехідних процесів необхідне розроблення фазового дискримінатора ФД з керованою формою нормованої дискримінаційної характеристики, а саме:

$$F[\varphi(t + nT_{\varphi}), \sigma], \quad \forall n = -\infty, +\infty, \quad (11)$$

де σ – сигнал керування, що забезпечує можливість зміни форми дискримінаційної характеристики ФД на тривалість оптимального перехідного процесу $\Theta_{\text{опт}}$.

Згідно з теоремою про n -інтервалів для системи без ФНЧ, тобто першого порядку, маємо один інтервал оптимального за швидкодією руху. У цьому разі нормована характеристика ФД $F[\varphi(t, nT_{\varphi})], \forall n = -\infty, +\infty$ має бути неперіодичною функцією часу на всьому інтервалі оптимального руху (в динаміці).

На другому етапі синтезу – реалізаційному створимо структуру і відповідні схеми для побудови вузла, що забезпечить формування адаптивного (по суті заданого) виду дискримінаційної характеристики цифрового ФД (АЦФД), яке має здійснюватися каналом керування (третім входом АЦФД) для формування оптимальної керуючої дії ПФАПЧ.

Для підтвердження отриманих аналітичних і реалізаційних результатів на третьому етапі синтезу виконаємо імітаційне моделювання створеної схеми ПФАПЧ ГКН з необмеженою смугою пропускання ФНЧ та АЦФД. На рис. 6 для порівняння представлено імітаційні моделі створеної оптимізованої схеми ПФАПЧ, а також не оптимізованої схеми, назвемо її традиційною.

Для проведення дослідження ПФАПЧ у просторі станів на фазовій площині в схему введено блоки диференціювання «Derivative» та графобудівники «XY Graph». Схеми імітаційного моделювання розроблені з використанням програми Simulink пакета MATLAB.

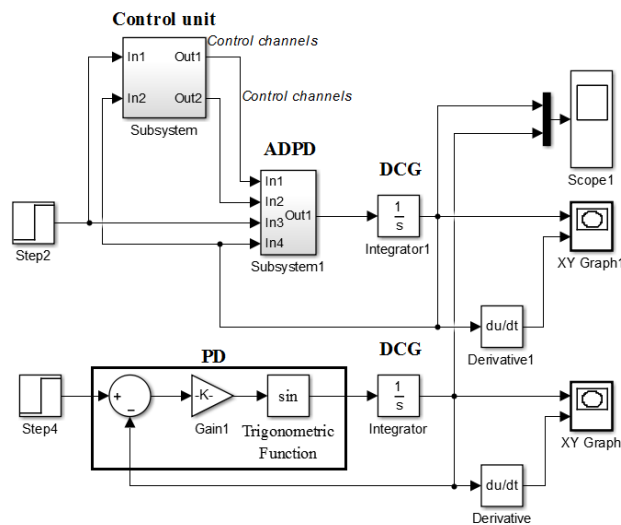


Рис. 6. Імітаційні моделі ПФАПЧ ГКН з необмеженою смугою пропускання ФНЧ [верхня система з АЦФД (ADPD), нижня – з ФД (PD), що має характеристику синусоїдальної форми]

За результатами імітаційного моделювання (рис. 7) стає очевидним те, що в створеній оптимальній за швидкодією ПФАПЧ тривалість перехідного процесу є меншою, ніж в схемі не оптимізованій. Перехідний процес має форму прямої і відповідно мінімальну тривалість, тобто є оптимальним.

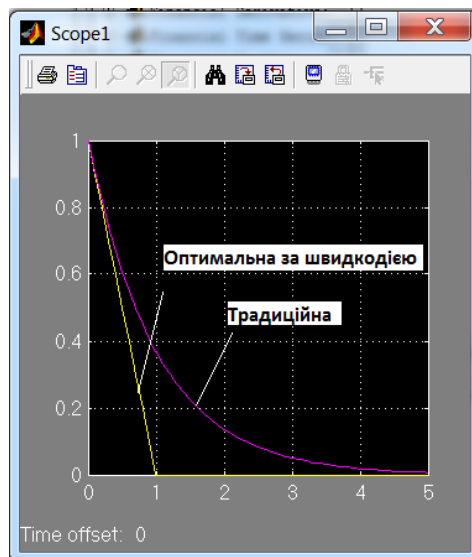


Рис. 7. Осцилограми перехідного процесу фази синхросигналів на виходах ГКН ПФАПЧ

Фазові портрети досліджуваних систем наведено на рис. 8, де за координатами X і Y графобудівника «XY Plot» відкладено відповідно значення фазової похибки $\varphi(t)$ і її похідної $\omega(t)$.

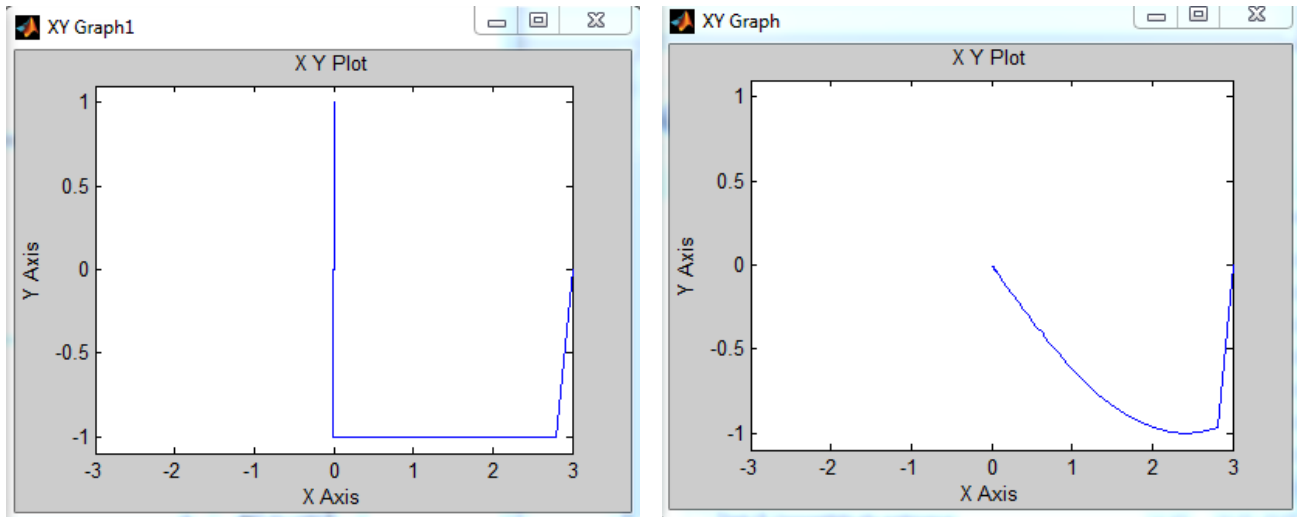


Рис. 8. Фазові портрети систем ФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ (графік зліва – оптимальна за швидкодією ПФАПЧ, справа – не оптимізована)

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

$$K_{opt} = \Theta / \Theta_{opt} . \quad (12)$$

Графіки залежності тривалості перехідного процесу від значень початкової фазової похибки φ_0 наведено на рис. 9. Кількісне порівняння параметрів ПФАПЧ з необмеженою смугою пропускання ФНЧ у разі реалізації оптимального за швидкодією закону керування на основі коефіцієнта ефективності оптимізації K_{opt} призводить до висновку щодо зменшення тривалості перехідного процесу від 2,7 до 4 разів залежно від значення початкових умов.

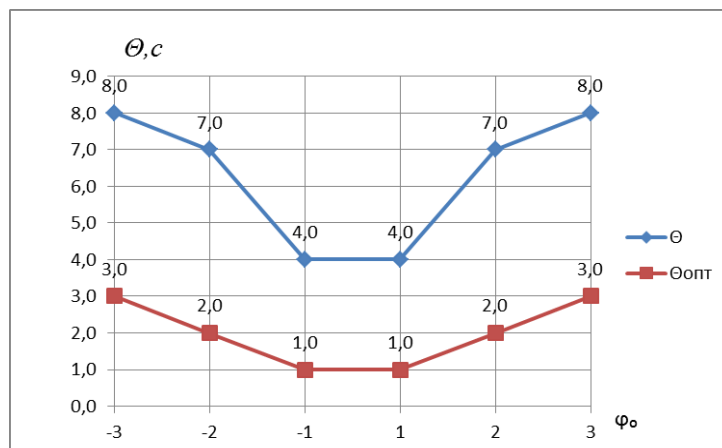


Рис. 9. Графіки залежності тривалості перехідного процесу від значень початкової фазової похибки φ_0

У четвертому розділі «Оптимізація за швидкодією та аналітичні дослідження ПФАПЧ генератора опорного сигналу АСК» виконано

оптимізацію за швидкодією ПФАПЧ АСК другого порядку. Для ПФАПЧ другого порядку у випадку, коли початкове розлаштування ГКН відносно ПГ є постійним ($\Omega_{\Pi} = const$) і коефіцієнт передачі КГ $K_{\text{КГ}}=1$, перше рівняння системи (1) матиме вигляд

$$\frac{d^2\varphi(t)}{dt^2} = K_1 u_{\text{фд}}(t), \quad (13)$$

де $K_1 = -S_{\text{КЕ}} K_{\text{КГ}}(t) / T_{\text{ф}}$; $K_{\text{ф}}(p) = 1/T_{\text{ф}} p$ – передатна функція інтегрувальної ланки; $T_{\text{ф}}$ – постійна інтегрування; p – комплексна змінна ($p = \sigma + j\omega$).

Відповідно до принципу максимуму оптимальним за швидкодією керуванням буде таке, при якому функція Гамільтона максимальна за керуючою дією $u_{\text{фд}}(t)$ з урахуванням обмежень типу «насичення». Для виконання цієї вимоги необхідно, щоб

$$u_{\text{фд}}(t) = U_{\text{фДекстр}} \cdot \text{sign}[\psi_{10}t + \psi_{20}], \quad (14)$$

де $U_{\text{фДекстр}}$ дорівнює граничним значенням, тобто $U_{\text{фДмін}}$ або $U_{\text{фДмакс}}$, а ψ_1, ψ_2 – допоміжні змінні вектор-функції ψ .

Відповідно до виразу (13) керуюча дія має мати моменти перемикання не більш ніж одного, оскільки за будь-яких початкових умов ψ_{10} і ψ_{20} вираз, що стоїть в квадратних дужках співвідношення (13), може змінити знак не більше одного разу (мати не більш ніж один дійсний корінь). Це положення відповідає теоремі А. А. Фельдбаума про n -інтервалів. Виконано аналітичне визначення руху відображаючої точки у фазовому просторі та обчислено координати точки перемикання. Знайдено тривалість інтервалів оптимальних перехідних процесів θ_1 і θ_2 , на основі яких тривалість всього оптимального перехідного процесу буде дорівнювати

$$\theta_{\text{opt}} = \theta_1 + \theta_2. \quad (15)$$

Розроблена з використанням програми Simulink пакета MATLAB імітаційна модель оптимальної за швидкодією ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою наведена на рис. 10.

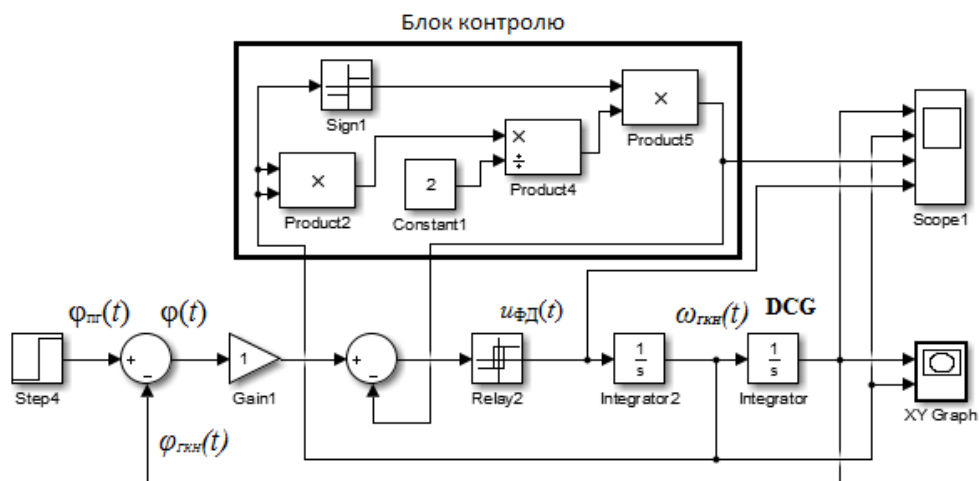


Рис. 10. Імітаційна модель оптимальної за швидкодією ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою

Результати експериментальних досліджень розробленої імітаційної моделі наведено на рис. 11 та 12.

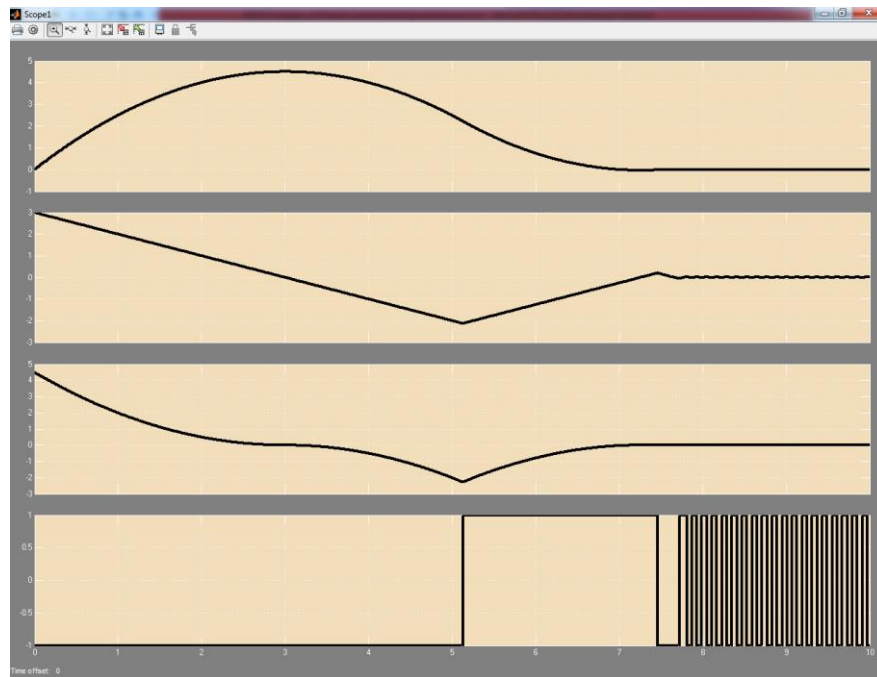


Рис. 11. Осцилограми сигналів в контрольних точках оптимальної за швидкістю ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$: верхній графік – $\varphi_{ГКН}(t)$; другий графік зверху – $\omega_{ГКН}(t)$; третій графік зверху – сигнал на виході «Блок контролю»; нижній графік – $u_{ФД}(t)$

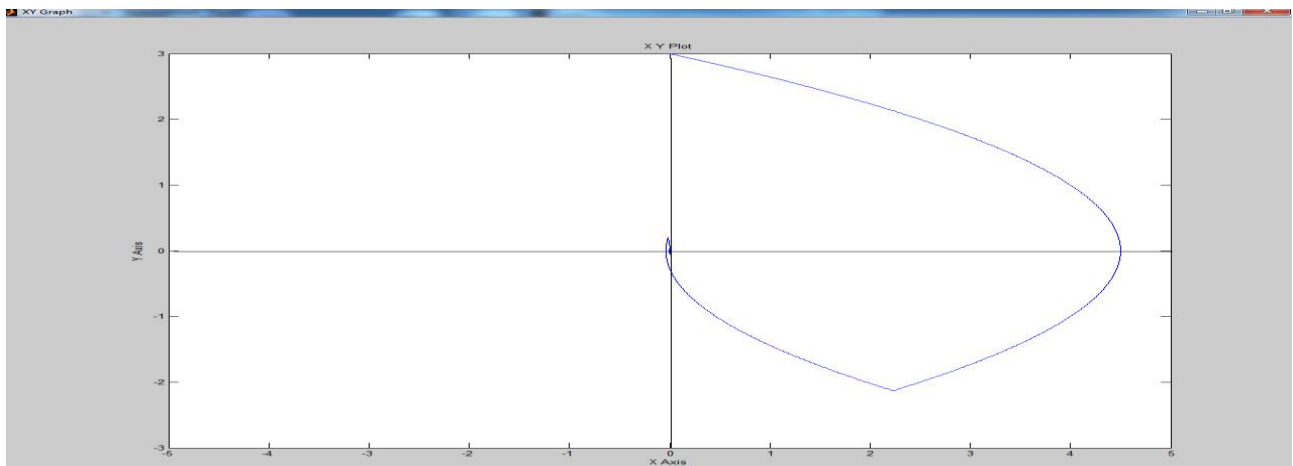


Рис. 12. Фазовий портрет оптимальної за швидкістю ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\varphi = \text{var}$

Необхідно враховувати обмеження на параметри керуючої дії, які обумовлені реальними обмеженнями на форму характеристики ФД. Параметр керування в ПФАПЧ – напруга на виході ФД $u_{ФД}(t)$ є періодичною функцією різниці фаз $\varphi(t) = \varphi_{III}(t) - \varphi_{ГКН}(t)$ та періодичною за часом функцією з періодом T_t .

Причому в режимі входження в синхронізм період T_t є змінною величиною, що визначається рівнянням

$$T_t(t) = \frac{2\pi}{\omega(t)}. \quad (16)$$

У процесі автопідстроювання відбувається зміна частоти $\omega(t)$ і згідно з рівнянням (16) відбувається відповідна зміна періоду $T_t(t)$.

У динамічному режимі залежність періоду від часу призводить до необхідності розгляду процесу автопідстроювання, як квазіперіодичного процесу з динамічним періодом $T_t(t)$.

Виконано аналітичне дослідження впливу періоду $T_t(t)$ на перехідні процеси в оптимальній за швидкістю ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою. У разі, коли $\Theta_{opt} > T_t(t)$, то в ПФАПЧ другого порядку може відбуватися зміна знака (кількість перемикань) керуючої дії більше одного разу на інтервалі оптимального керування. Це положення ілюструє фазовий портрет оптимальної за швидкістю ПФАПЧ з інтегрувальною ланкою за умови $T_\phi = const$, що наведено на рис. 13.

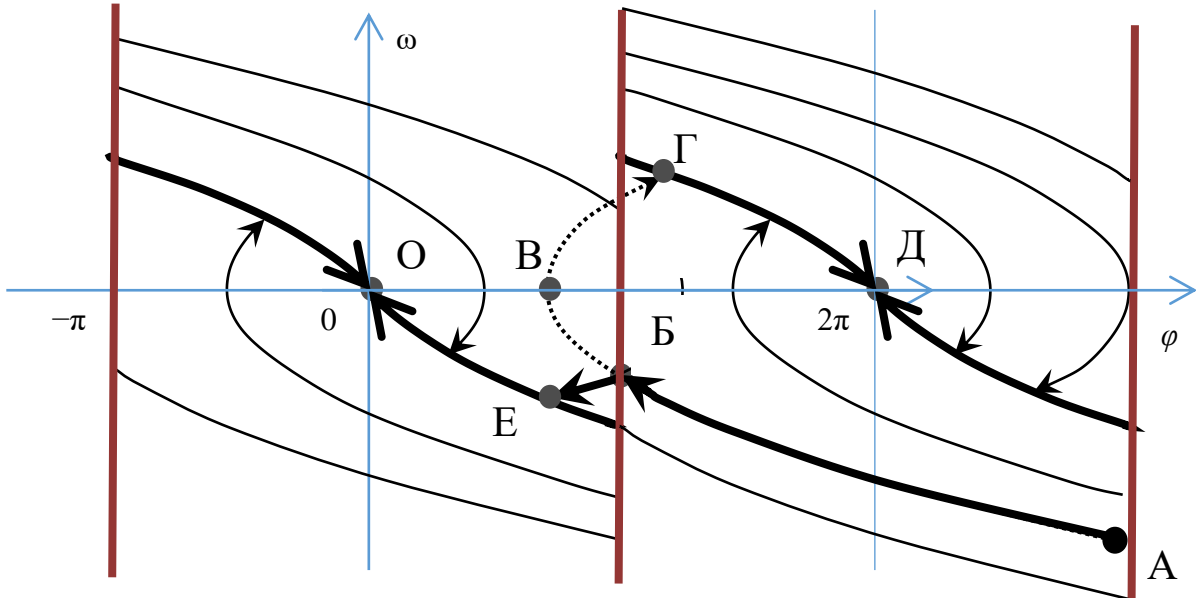


Рис. 13. Сімейство фазових траєкторій ПФАПЧ АСК з інтегрувальною ланкою та періодичною характеристикою ФД ($T_\phi = const$)

Встановлено, що у разі виконання нерівності

$$\left| -\frac{T_\phi}{\Omega_K}(\omega_1 - \omega_0) \right| + \left| \frac{T_\phi}{\Omega_K} \omega_1 \right| < \frac{2\pi}{\omega(t)} \quad (17)$$

з урахуванням введеного позначення $\Omega_K = S_{KE} \cdot U_{\phi \text{Декстр}}$, в ПФАПЧ другого порядку з інтегрувальною ланкою, періодичність характеристики ФД за фазовою координатою не впливає на тривалість оптимальних за швидкістю перехідних процесів. У випадку виконання отриманих граничних умов оптимальні за швидкістю перехідні процеси закінчуються не більше ніж за два інтервали постійності керуючої дії (не більше ніж одна зміна знака)

і виконуються умови, за яких має місце теорема А. А. Фельдбаума про n -інтервалів.

Виконано оптимізацію за швидкодією та синтез структури ПФАПЧ другого порядку з пропорційно-інтегровальною ланкою і АЦФД, в якій формування сигналу керуючої дії відбувається за встановленим згідно з принципом максимуму законом, котрий забезпечує максимізацію функції Гамільтона. Використання АЦФД з можливістю керованої зміни його дискримінаційною характеристикою перетворює ПФАПЧ у систему з дворівневим ієрархічним керуванням, у якій керування I рівня здійснюється в системі з незмінною характеристикою фазового дискримінатора, а керування II рівня – завдяки використанню обчислювального пристрою, структура якого знайдена в результаті синтезу оптимального за швидкодією алгоритму керування.

У п'ятому розділі «Експериментальні дослідження автоматизованої системи контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатомоноклітурного виробництва» розроблено схеми лабораторного стенду та лабораторного зразка блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» з синтезованою оптимальною за швидкодією ПФАПЧ. Основними дискретними електронними компонентами лабораторного зразка БПП «TIMETER» є термостатований високостабільний кварцовий генератор MXOCS, що керується напругою, мікроконтролер LPC2378FBD144 фірми Philips, програмовані логічні інтегральні схеми ПЛІС Altera EPM7128SLC84 та двадцятирозрядний ЦАП DAC1220 фірми BURR-BROWN.

З метою перевірки роботи лабораторних зразків блока первинного перетворювача БПП «TIMETER» розроблено лабораторний стенд, плату інтерфейсів якого зображено на рис. 14.

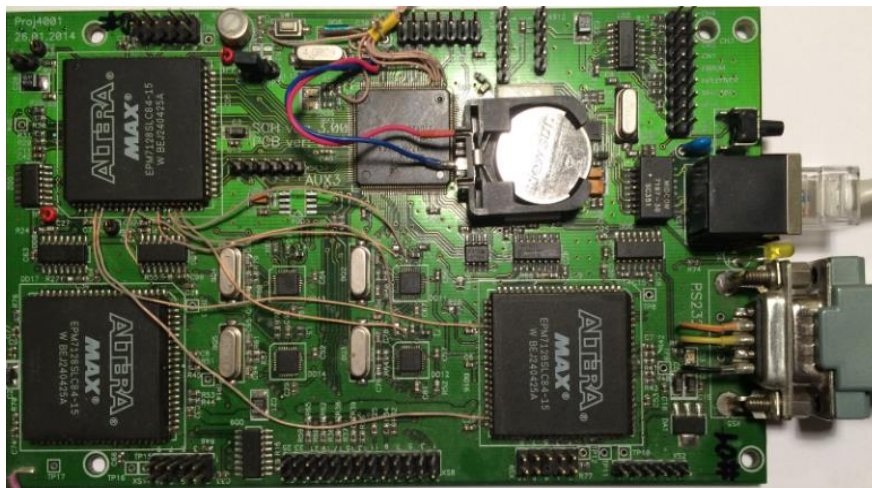


Рис. 14. Плата інтерфейсів лабораторного стенду для перевірки роботи БПП «TIMETER»

Проведено експериментальні дослідження та вимірювання точності передавання синхросигналів з використанням IP-технологій від еталонів з використанням лабораторного стенду та вимірювача параметрів синхронізації ИПС-2002. Параметрами, що вимірюються, є характеристики синхросигналів

ВЧІ (TIE), визначені згідно з міжнародними рекомендаціями ITU-T G.810 та G.823.

Результати короткотривалих вимірювань наведено на рис. 15, а статистична обробка та порівняння з нормами міжнародних стандартів – на рис. 16.

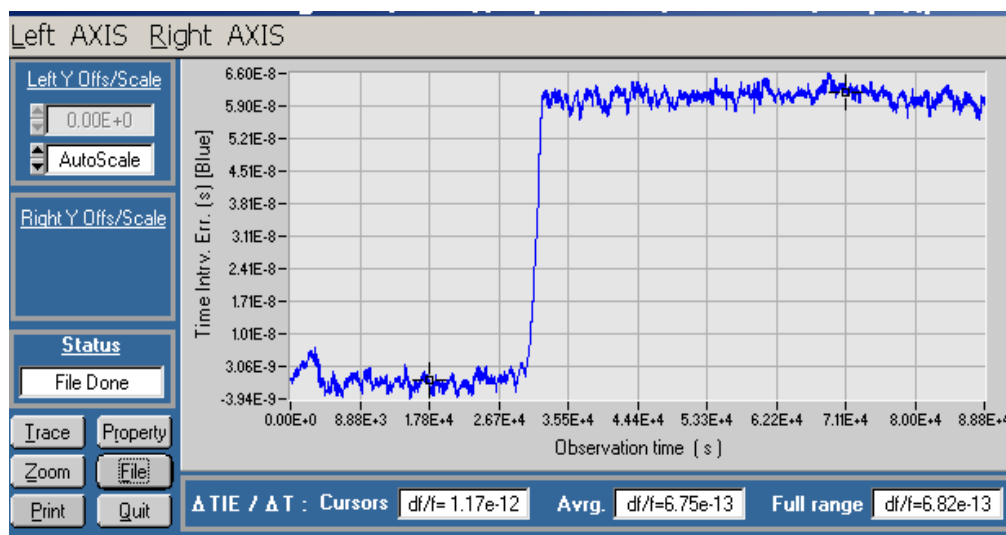


Рис. 15. Результат вимірювання TIE БПІ «TIMETER» приладом ИПС-2002

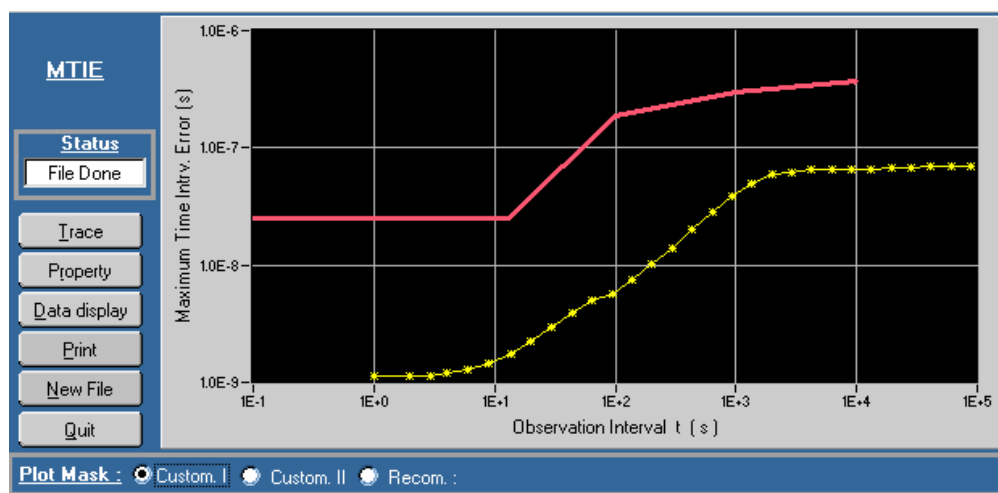


Рис. 16. Статистична обробка результатів вимірювань та порівняння MTIE з нормами європейського стандарту ETS 300 464-4

Програмне забезпечення P4000winXP, яке розроблено у середовищі Embarcadero RAD Studio XE2 2012, забезпечує можливість збільшення до чотирьох каналів вимірювань показників якості, що підвищує продуктивність, а також дає можливість проведення одночасного контролю до чотирьох синхросигналів ПСЦС. ПЗ P4000winXP спрощує візуалізацію та аналіз даних, які використовуються для реалізації у «ручному режимі» прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу одиничного та дрібносерійного гнучкого виробництва прецизійних ПСЦС.

Приклад побудови графіків ВЧІ контрольованих синхросигналів у реальному часі наведено на рис. 17.

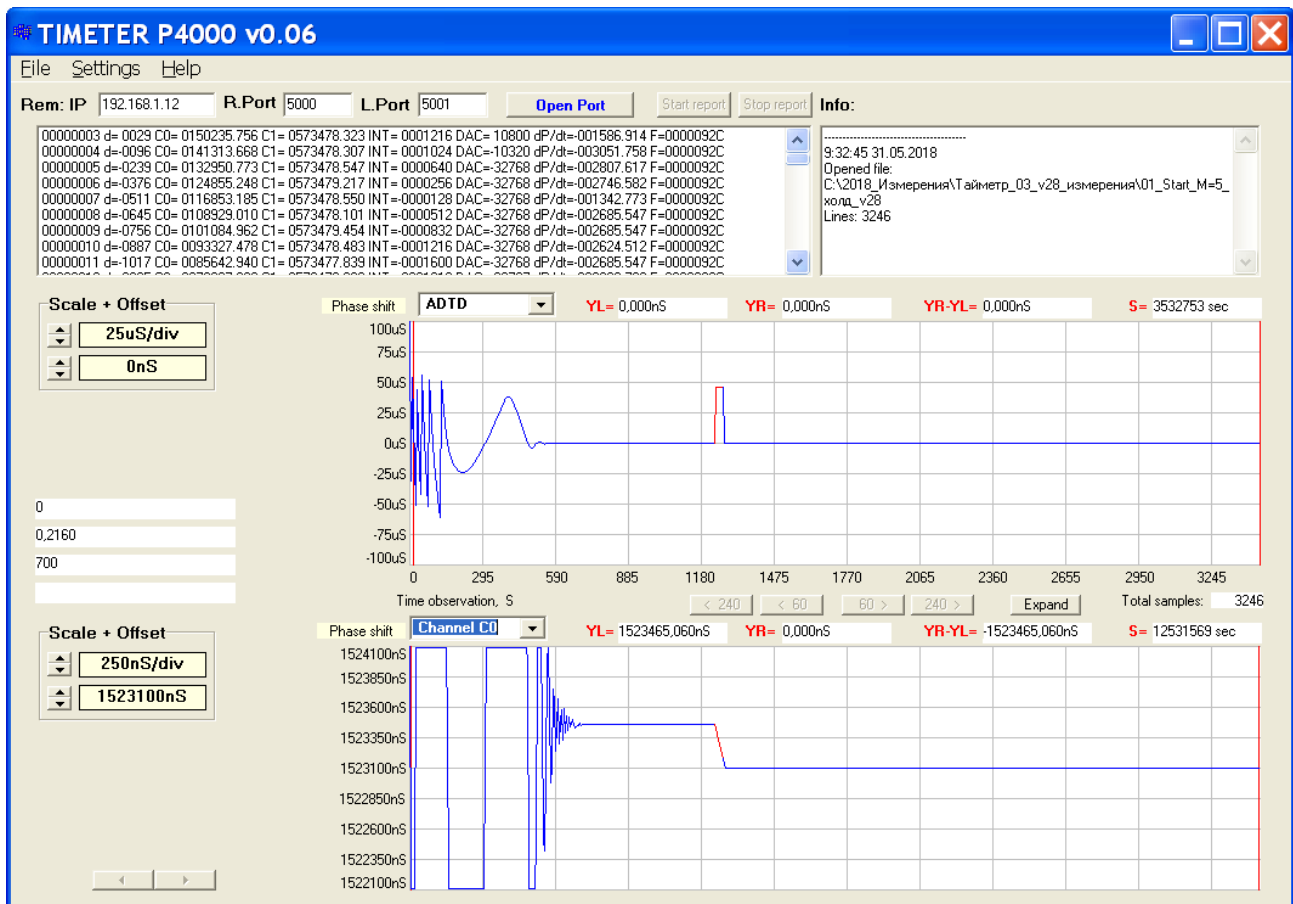


Рис. 17. Графіки ВЧІ контрольованих синхросигналів у реальному часі

ВИСНОВКИ

У результаті дисертаційного дослідження вирішено важливе науково-практичне завдання, яке полягає у створенні автоматизованої системи контролю з використанням сучасних IP-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 багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів. Внаслідок проведення теоретичних та експериментальних досліджень отримано 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 багатомономенклатурного виробництва та експлуатації пристроїв синхронізації цифрових сигналів вимагає застосування сучасних засобів комп'ютерної техніки та IP-технологій.

2. Досліджено виробництво пристроїв синхронізації цифрових сигналів як об'єкт автоматизації: визначено на основі аналізу структурних особливостей системи управління гнучкої інтегрованої системи, а також її функцій за збором, передаванням, обробкою й формуванням даних, актуальність дослідження інформаційних функцій гнучкої інтегрованої системи, 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 R4000winXP та проведено її експериментальні дослідження.

3. Вперше на основі запропонованого методу багатоканального контролю показників якості розроблено апаратну структуру вимірювального блока 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 багатомономенклатурного гнучкого інтегрованого виробництва, а також у процесі їх технічної експлуатації в складі сучасних високотехнологічних систем.

4. Вперше розроблено алгоритм контролю часових характеристик синхросигналу пристроїв синхронізації цифрових сигналів 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 підсистеми фазового автопідстроювання частоти.

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 пристроїв синхронізації цифрових сигналів. Для отримання меншого розкиду температурного коефіцієнта тривалості перехідного процесу інтегруючої RC-ланки мультівібратора блоку контролю періодичності 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 підсистеми фазового автопідстроювання частоти опорного генератора ієрархічної структури: аналітично визначено граничні умови, за яких періодичність характеристики фазового дискримінатора 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 академіка 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 автоматизованої системи контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів 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 багатомономенклатурного гнучкого автоматизованого виробництва конкурентоспроможних пристроїв синхронізації цифрових сигналів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1. Коваль В. В., Кальян Д. О., Кільчицький Є. В. та ін. Автоматичні пристрої та системи тактової синхронізації інфокомунікаційних мереж: монографія. К., 2015. 412 с. *(Здобувачем проведено системний аналіз способів контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів 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).*

2. Коваль В. В., Кальян Д. О., Самков О. В. Автоматизована система передачі синхросигналів з використанням IP-мереж: монографія. К., 2016. 182 с. *(Здобувачем сформульовано завдання і запропоновано методику синтезу структури оптимальної за швидкодією підсистеми фазового автопідстроювання частоти, проведено системний аналіз сучасних програмно-апаратних засобів вимірювання та контролю показників якості синхросигналів, отримано кількісну оцінку точності цифрової передачі сигналу еталонних частот).*

3. Коваль В. В., **Кальян Д. О.** Пристрої синхронізації інфокомунікаційних мереж з періодичною автопідстройкою: монографія. К., 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).*

4. Коваль В. В., Самков О. В., Худинцев М. М., **Кальян Д. О.** Автоматизована система синхронізації цифрових сигналів: монографія. К., 2018. 494 с. *(Здобувачем проведено системний аналіз способів забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах багатомономенклатурного виробництва і технічної експлуатації, сформовано вихідну множини 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 швидкодією перехідних процесів в системі автопідстроювання з адаптивним формуванням сигналу керуючої дії).*

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

5. Koval V. V., **Kalian D. O.**, Khudyntsev M. M., Lysenko V. P., Samkov O. V., Shkliarevskiy I. J. Automated 24×7 monitoring of synchronoinformation in modern digital networks. Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Серія: фізико-математичні науки. 2017. Вип. 2. С. 88–94. *(Здобувачем проведено аналіз способів забезпечення високих якісних і кількісних показників процесу контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів, розроблено на основі запропонованого методу структуру багатоканального контролю показників якості із застосуванням IP-технологій блоку БПП «TIMETER», P4000winXP, отримано кількісні оцінки показники за результатами вимірів).*

6. Lysenko V. P., Koval V. V., Nakonechna K. V., **Kalian D. O.** Modern information technologies in the control systems for complex biotechnical objects of agricultural appointment. Information and Telecommunication Sciences. 2017. Vol. 9. No 2 (15). P. 38–43. *(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 PTP IEEE-1588v2 з використанням пристроїв синхронізації цифрових сигналів).*

7. Kalian D. Performance-optimal phase-locked system for device of synchronization and formation of the exact time signal. Information and Telecommunication Sciences. 2018. No 1. P. 11–18.

8. 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 природо-

користування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2018. Вип. 283. С. 89–98. *(Здобувачем розроблено структуру підсистеми фазового автопідстроювання частоти 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).*

9. **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. Енергетика і автоматика. 2018. № 3. URL: <http://journals.nubip.edu.ua/index.php/Energiya/article/view/10897/9540>.

(Здобувачем проведено аналіз способів контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів 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 фазового дискримінатора не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів і кількісну оцінку результатів оптимізації).

Стаття у науковому виданні іншої держави

10. **Kalian D.,** Kazakova N., Kravchenko B., Koval V. Automated system for Monitoring Synchronizing precise time signals at SMART-GRID power plants. Projectowanie, badania i eksploatacja. 2019. T. 1. P. 155–160. *(Здобувачем проведено аналіз способів забезпечення високих якісних показників автоматизованого контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів в умовах експлуатації та виробництва, розроблено структуру системи багатоканальних довготривалих вимірювань показників якості із застосуванням IP-технологій та використанням статистичної обробки отриманих даних вимірів).*

Патент України на винахід

11. Коваль В. В., **Кальян Д. О.,** Коваль В. В. Патент на винахід № 113473 Україна, МПК (2016.01) H03D13/00, H03D3/04 (2006.1). Адаптивний цифровий фазовий дискримінатор. № а201511981; заявлено 03.12.2015; опубліковано 10.05.2016; Бюл. № 9. *(Здобувачем розроблено структуру і системотехнічну реалізацію адаптивного цифрового фазового дискримінатора).*

Патент України на корисну модель

12. Коваль В. В., **Кальян Д. О.,** Коваль В. В. Патент на корисну модель № 116809 Україна, МПК H03K5/19 (2006.01). Пристрій контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти. № u201611977; заявлено 25.11.2016; опубліковано 12.06.2017; Бюл. № 11. *(Здобувачем розроблено структуру пристрою контролю періодичності імпульсної послідовності тактової частоти).*

Рекомендації

13. Коваль В. В., **Кальян Д. О.**, Осипенко В. В., Самков О. В. 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. К., 2017. 47 с. *(Здобувачем проведено аналіз та зазначено необхідність підвищення якості контролю параметрів синхросигналів, як складової управління ЄНСС).*

Тези наукових доповідей

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. Метрологія, технічне регулювання та забезпечення якості: V Міжнародна науково-практична конференція, м. Одеса, 8–9 жовтня 2015 року: тези доповіді. Одеса, 2015. С. 94–95. *(Здобувачем розроблено схему дослідження показників якості синхроінформації, отримано за експериментальними даними кількісну оцінку точності переміщення синхросигналів).*

15. Коваль В. В., Дорогобед В. В., **Кальян Д. О.**, Твердохліб А. В., Худинцев М. М. Автоматизована система багатоканального моніторингу синхроінформації цифрових телекомунікацій. Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: V Міжнародна науково-практична конференція, м. Одеса, 29–30 жовтня 2015 року: тези доповіді. Одеса, 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).*

16. Коваль В. В., **Кальян Д. О.**, Циб В. М., Шевчук Б. В. Системи синхронізації цифрових інфокомунікацій з адаптивними властивостями. Проблеми та перспективи розвитку енергетики, електротехнологій та автоматики в АПК: III Міжнародна науково-технічна конференція, м. Київ, 17–19 грудня 2015 року: тези доповіді. К., 2015. С. 36–38. *(Здобувачем розроблено систему синхронізації з адаптивними властивостями та фазовою автоматичною підстройкою частоти).*

17. Koval V. V., **Kalian D. O.**, Tepliuk V. M., Shkliarevskii I. I., Khudyntsev M. M. Multichannel Clock Signal Monitoring System for Infocommunication Networks. Modern problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: International Conference, Lviv – Slavske, Ukraine, 23–26 February, 2016. Львів, 2016. P. 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 R4000winXP, отримано кількісну оцінку точності цифрової передачі синхросигналу).*

18. Коваль В. В., Дорогобед В. В., **Кальян Д. О.**, Коваль В. В. Комп'ютерне моделювання та статистична оптимізація пристроїв синхронізації з адаптивними властивостями. Сучасні проблеми математичного моделювання,

прогнозування та оптимізації: VII Міжнародна наукова конференція, м. Кам'янець-Подільський, 21–22 квітня 2016 року: тези доповіді. Кам'янець-Подільський, 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).*

19. 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. Problems of decision making under uncertainties: XXVII International Conference, 23–27 травня 2016 року: тези доповіді. Тбілісі, Грузія, 2016. С. 96–98. *(Здобувачем визначено основні підходи щодо створення системи контролю якості транспортування синхроінформації та сигналів пристроїв синхронізації цифрових сигналів).*

20. Koval V., Dorogobed V., **Kalian D.**, Khudyntsev M., Koval V. Optimizing dynamic of synchronization system with phase-locked loop for infocommunication networks. Problems of decision making under uncertainties: XXVIII International Conference, 25–30 серпня 2016 року: тези доповіді. Брно, Чехія, 2016. С. 65. *(Здобувачем розроблено структуру оптимального за швидкодією пристрою синхронізації з ієрархічним дворівневим регулятором).*

21. Коваль В. В., **Кальян Д. А.**, Шкляревский И. Ю. Использование мониторинга синхросигналов для повышения безопасности информационно-телекоммуникационных систем. Проблемы кибербезопасности информационно-телекоммуникационных систем: II науково-практична конференція, м. Київ, 23–24 березня 2017 року: тези доповіді. К., 2017. С. 123–127. *(Здобувачем розроблено схему автоматизованої системи поліканального моніторингу на основі підсистеми фазового автопідстроювання частоти з адаптивними властивостями і вбудованим генератором опорного сигналу).*

22. Velychko O. M., **Kalian D. O.**, Koval V. V., Samkov O. V. Terminal devices for synchro-information systems with adaptive properties for IoT. II International Conference on Advanced Information and Communication Technologies – 2017, Lviv, Ukraine, 4–7 July 2017. Львів, 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).*

23. Koval V., **Kalian D.**, Khudyntsev M., Lysenko V., Samkov O., Shkliarevskiy I. Synchroinformation's 24×7 monitoring tool for modern digital networks decision making. Problems of decision making under uncertainties: XXX International Conference, 14–19 august 2017, Vilnius, Lithuania, 2017. Р. 75–76. *(Здобувачем розроблено на основі запропоновано методу багатоканального моніторингу показників якості структуру автоматизованого вимірювального пристрою).*

24. 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, 2017. P. 179–183.

25. 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. Automatics – 2017: XXIV International Conference on automated control, 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).*

26. 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, Lviv – Slavske, 20–24 February 2018: Proceedings Volume. 2018. P. 1199–1204.

27. Коваль В. В., Самков О. В., **Кальян Д. А.**, Дубович-Костецький В. Г. Засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів інформаційно-телекомунікаційних систем. Проблеми кібербезпеки інформаційно-телекомунікаційних систем: I Міжнародна науково-практична конференція, м. Київ, 5–6 квітня 2018 року: тези доповіді. К., 2018. С. 100–103. *(Здобувачем розроблено програмно-апаратні засоби автоматизованого поліканального моніторингу синхросигналів з субнаносекундною точністю).*

28. Koval V. V., Lysenko V. P., **Kalian D. O.**, Golovnya M. V., Samkov O. V., Piskun O. M., Medina M. S. National Time Scale Transmitting Through the Integrated Power Networks of SMART Technologies. Problems of Infocommunications. Science and Technology: International Scientific-Practical Conference, Kharkiv, 9–12 October 2018: proceedings. Kharkiv, 2018. P. 89–94. *(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. Lysenko V., Koval V., Samkov O., **Kalian D.**, Komarchuk D. Computer-integrated Systems for Information Support and Automatization of the Complicated Objects. Problems of decision making under uncertainties: XXX International Conference, Prague, Czech Republic, 2018. P. 45–51. *(Здобувачем проведено аналіз способів контролю пристроїв синхронізації цифрових сигналів, 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).*

30. Koval V., Kazakova N., **Kalian D.**, Komarchuk D., Lysenko V., Samkov O. The use of advanced information and communication technologies to monitor the quality of synchronization signals of IoT terminal devices. III International Conference on Advanced Information and Communication Technologies, Lviv, Ukraine, 2–6 July 2019. Львів, 2019. С. 22–25. *(Здобувачем*

проведено аналіз способів контролю показників якості в умовах технічної експлуатації і виробництва пристроїв синхронізації цифрових сигналів, розроблено на основі запропоновано методу багатоканального контролю показників якості діючий лабораторний макет БПП «TIMETER» та програмне забезпечення P4000winXP, отримано та проаналізовано дані вимірів, які використовуються для прийняття рішення щодо змін параметрів технологічного процесу).

31. Koval V., **Kalian D.**, Osinskiy O., Samkov O., Khudyntsev M., Lysenko V. 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, Lviv – Slavske, 25–29 February 2020: conference proceedings. 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).*

АНОТАЦІЯ

Кальян Д. О. Автоматизація процесу контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів багатомономенклатурного виробництва. – 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.

Дисертацію присвячено вирішенню наукового завдання, яке полягає у розробленні автоматизованої системи контролю показників якості пристроїв синхронізації цифрових сигналів, що складається з програмного забезпечення та блока первинних перетворювачів з підсистемою фазового автопідстроювання частоти опорного генератора.

У дисертації вперше розроблено багатоканальну автоматизовану систему контролю показників якості пристроїв синхронізації, адаптивний цифровий фазовий дискримінатор, що забезпечує первинне перетворення похибки інтервалу часу в цифровий сигнал, оптимальну за швидкодією підсистему фазового автопідстроювання частоти ієрархічної структури; визначено граничні умови, за яких періодичність характеристики фазового дискримінатора не впливає на тривалість оптимальних за швидкодією перехідних процесів, формалізовано визначення температурної нестійкості тривалості перехідного процесу зразкового сигналу. Інструментами для розроблення були Simulink/MATLAB, Quartus Prime Lite Edition, Excel, Embarcadero RAD Studio. Проведено дослідження автоматизованої системи контролю в процесі

багатономенклатурного гнучкого виробництва пристроїв синхронізації різного призначення.

Ключові слова: автоматизація, автоматизована система контролю, багатономенклатурне виробництво, пристрої синхронізації, показники якості, багатоканальна структура, автопідстроювання частоти, оптимізація, швидкодія, принцип максимуму.

АННОТАЦИЯ

Кальян Д. А. Автоматизация процесса контроля показателей качества устройств синхронизации цифровых сигналов многономенклатурного производства. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.07 «Автоматизация процессов управления». Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины. Киев, 2020.

Цель диссертации – повышение производительности, быстродействия и надежности процесса контроля показателей качества устройств синхронизации цифровых сигналов в условиях многономенклатурного гибкого автоматизированного производства за счет создания автоматизированной системы контроля с использованием современных IP-технологий и разработки программного обеспечения и блока первичных преобразователей контролируемых сигналов с иерархической подсистемой фазовой автоподстройки частоты опорного генератора.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: определить основные подходы к обеспечению высоких качественных показателей процесса контроля устройств синхронизации в условиях многономенклатурного гибкого автоматизированного производства; исследовать производство устройств синхронизации как объект автоматизации; провести на основе системного подхода анализ способов повышения производительности процесса контроля; разработать аппаратную структуру измерительного блока автоматизированной системы контроля и программное обеспечение для визуализации и статистической обработки полученных цифровых данных; разработать структуру системы контроля периодичности импульсной последовательности тактовой частоты и определить на основе теоретико-вероятностного метода требования к блоку контроля периодичности с целью повышения надежности его функционирования; исследовать подсистему фазовой автоподстройки частоты опорного генератора и осуществить ее оптимизацию по быстродействию; разработать лабораторный макет автоматизированной системы контроля и провести экспериментальные исследования.

При выполнении работы использованы методы современной теории автоматического управления, имитационного моделирования, элементы теории оптимального управления, системный анализ, статистические методы обработки информации, теоретико-вероятностные методы, методы прикладного

программирования и методы экспериментальных исследований разработанного лабораторного макета автоматизированной системы контроля.

В результате диссертационного исследования решена важная научная задача – разработки автоматизированной системы контроля показателей качества устройств синхронизации цифровых сигналов с учетом их многономенклатурного производства.

Исследован процесс контроля устройств синхронизации в условиях их многономенклатурного гибкого автоматизированного производства, как объект автоматизации: определены, на основе анализа структурных особенностей системы управления гибким интегрированным производством, задачи информационных функций, обеспечиваемых подсистемой измерений и контроля показателей качества, разработана автоматизированная система контроля, в состав которой входят лабораторный макет многоканального измерительного блока БПП «TIMETER» и программное обеспечение P4000winXP для визуализации и анализа данных, которые используются для принятия решения об изменении параметров производственного технологического процесса. Проведены экспериментальные исследования системы в процессе многономенклатурного производства устройств синхронизации различного назначения.

В диссертации впервые: разработана структура многоканальной автоматизированной системы контроля показателей качества устройств синхронизации, которая обеспечивает многократное повышение производительности процесса контроля и упрощает визуализацию и анализ данных, используемых для принятия решений; разработаны адаптивный цифровой фазовый дискриминатор, который обеспечивает первичное преобразование погрешности интервала времени в цифровой сигнал, а также возможность управляемого формирования его статической характеристики; устройство контроля периодичности импульсной последовательности тактовой частоты, в котором принятие решения осуществляется в конце каждого периода сигнала тактовой частоты, что повышает надежность и быстродействие контроля; разработана иерархическая структура подсистемы фазовой автоподстройки частоты опорного генератора, которая обеспечивает адаптивное формирование сигнала управляющего воздействия согласно установленному, на основе принципа максимума академика Л. С. Понтрягина, оптимального по быстродействию закона управления; разработана математическая модель оптимальной по быстродействию подсистемы и определены граничные условия, при которых периодичность характеристики фазового дискриминатора не влияет на продолжительность оптимальных по быстродействию переходных процессов и выполняются условия теоремы А. А. Фельдбаума о n -интервалах; установлено, что адаптивное формирование сигнала управляющего воздействия по установленному оптимальным по быстродействию законом управления позволяет уменьшить продолжительность переходного процесса в подсистеме от 2,7 до 4 раз, в зависимости от значения начальных условий. Инструментами для разработки были Simulink/MATLAB, Quartus Prime Lite Edition, Excel, Embarcadero RAD Studio.

Экспериментальные исследования автоматизированной системы контроля устройств синхронизации цифровых сигналов с использованием разработанного лабораторного макета блока первичных преобразователей БПП «TIMETER» и программного обеспечения P4000winXP подтверждают высокие качественные и количественные показатели процесса контроля в условиях многономенклатурного гибкого автоматизированного производства конкурентоспособных устройств синхронизации цифровых сигналов.

Ключевые слова: автоматизация, автоматизированная система контроля, многономенклатурное производство, устройство синхронизации, показатели качества, многоканальная структура, автоподстройка частоты, оптимизация, быстродействие, принцип максимума.

ANNOTATION

Kalian D. O. Automation of the Process of Monitoring Quality Parameters of Digital Signal Synchronization Devices of Flexible Manufacturing System. – 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 thesis is devoted to solving a scientific problem, which consists in the development of an automated system for monitoring quality indicators of digital signal synchronization devices, which consists of the software of the block of primary converters with a phase-locked loop subsystem of the reference generator frequency.

In the dissertation work, for the first time were developed: a multichannel automated system for monitoring quality indicators of synchronization devices, adaptive digital phase discriminator, which provides the primary conversion of the time interval error into a digital signal, speed-optimal subsystem of phase-locked loop of the hierarchical structure; the boundary conditions were determined under which the periodicity of the phase discriminator characteristics does not affect the duration of the transient processes that are optimal in terms of speed, determining temperature instability of the duration of the transient process of the reference signal was formalized. The used tools were Simulink/MATLAB, Quartus Prime Lite Edition, Excel, Embarcadero RAD Studio. A study of an automated control system in the process of multi-product flexible manufacturing system of synchronization devices for various purposes was done.

Key words: automation, automated control system, flexible manufacturing system, synchronization devices, quality characteristics, multichannel structure, phase-locked loop, optimization, speed-optimal, maximum principle.

Підписано до друку 01.10.2020 р. Формат 60x84\16
Ум. друк. арк. 0,9 Обл.-вид.арк. 0,9
Наклад 100 прим. Зам. № 200534

Віддруковано у редакційно-видавничому відділі НУБіП України
вул. Героїв Оборони, 15, Київ, 03041, тел.: 527-81-55
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4097 від 17.06.2011

