

## ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ АВТОНОМНОЇ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТУВАННЯ ДЛЯ СИСТЕМ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ

*У статті, на прикладі схеми фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) розглянуто можливість вирішення задач діагностування для цілого класу систем автоматичного регулювання (САР) – систем зі зворотним зв'язком (ЗЗ). Використання методу власного випромінювання (використання автономної автоматизованої системи діагностування (АА СД) в режимі локалізації несправності) дозволяє автоматично контролювати режим елементів, які входять до складу схеми ЗЗ і тим самим виявляти передвідмовний стан всієї схеми (об'єкту контролю (ОК)).*

*Накопичення (зростання) напруги в елементах ЗЗ однозначно свідчить про відхилення в роботі основної системи. Ця інформація, відображена засобами індикації дозволяє оперативно реагувати обслуговуючому персоналу, або автоматично (при наявності резервування) вмикати резервні системи зразку радіоелектронного обладнання (РЕО).*

*Ключові слова: система автоматичного регулювання, автономна автоматизована система діагностування, об'єкт контролю, зворотний зв'язок, фізико-хімічні процеси, радіоелектронний компонент.*

**Вступ.** Робота будь-якого технічного агрегату або хід будь-якого технологічного процесу характеризуються різними фізичними величинами, наприклад температурою, тиском, швидкістю. Ці величини повинні підтримуватися на заданому рівні або змінюватися за заданим законом. За допомогою системи автоматичного регулювання (САР) автоматично вирішуються завдання зміни якої-небудь фізичної величини за необхідним законом. Технічний пристрій, у якому здійснюється автоматичне регулювання - об'єкт регулювання. Автоматичне регулювання – приватний випадок автоматичного керування. Ціль керування в цьому випадку полягає в забезпеченні необхідного закону зміни регульованої величини [1].

У зразках РЕО розрізняють послідовне, паралельне з'єднання елементів, а також з'єднання зі зворотним зв'язком. Наявність елементів зворотного зв'язку в схемо технічному рішенні об'єкту контролю (ОК) не дозволяє застосовувати відомі методи контролю технічного стану [2,3]. Для отримання діагностичної інформації в цьому випадку необхідне виключення (розмикання) ланцюгів зворотного зв'язку, що в ряді випадків неможливо або небезпечно. При включених ланцюгах ЗЗ результати визначення ТС за параметрами вихідного сигналу (при надходженні перевірної тестової послідовності на вхід ОК) виявляється неоднозначними або спотвореними. Система ЗЗ «намагається підтягнути» вихідний сигнал до «нормального» рівня. Інакше кажучи: функціонування системи ЗЗ компенсує зміну параметрів радіоелектронних компонентів ОК пов'язані не лише з зовнішніми умовами функціонування (температура, вологість і т.і), а і з фізико-хімічними процесами, які відбуваються в радіоелектронних компонентах (РЕК) під час експлуатації.

**Основна частина.** При з'єднанні зі зворотним зв'язком вихідний сигнал одного елемента подається на його вхід через елемент зворотного зв'язку. На рис. 1 показано з'єднання зі зворотним зв'язком. Елемент зрівняння (умовне графічне позначення - коло, розділене на чотири сектори), це пристрій, у якому відбувається підсумовування сигналів. Якщо сектор зачорнений, то вхідний сигнал береться зі знаком мінус. Залежно від знаку сигналу зворотного зв'язку розрізняють позитивний і негативний зворотний зв'язок [4].

На рис. 1, а - позначено з'єднання з позитивним зворотним зв'язком, б - з негативним зворотним зв'язком. Елемент 1 включений у прямий ланцюг, елемент 2 -і у зворотній (елемент 1 охоплений зворотним зв'язком).

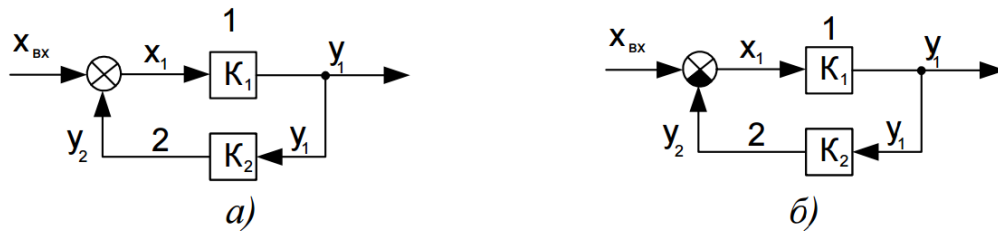


Рис. 1. З'єднання елементів зі зворотнім зв'язком

Одна з характеристик системи зі ЗЗ є коефіцієнт перетворення. На вхід елемента 1 надходить вхідний сигнал  $x_1 = x_{ex} \pm y_2$ , де знак плюс відповідає позитивному зворотному зв'язку, знак мінус - негативній. Вихідний сигнал елемента 1 дорівнює добутку його вхідного сигналу на коефіцієнт перетворення:

$$y_1 = K_1 x_1 \pm K_1 y_2 \quad (1)$$

Цей сигнал надходить на вхід елемента 2, який включено у ланцюг зворотного зв'язку. Відповідно, вихідний сигнал елемента 2 можливо отримати помноживши сигнал  $y_1$  на коефіцієнт перетворення елемента 2:  $y_2 = K_2 y_1$ . Підставивши значення  $y_2$  у вираз для  $y_1$ :

$$y_1 = K_1 x_{ex} \pm K_1 K_2 y_1 \quad (2)$$

Після перетворення отримаємо:

$$y_1 \pm K_1 K_2 y_1 = K_1 x_{ex}, \text{ або } y_1 (1 \pm K_1 K_2) = K_1 x_{ex}$$

Загальний коефіцієнт перетворення є відношенням вихідного сигналу до вхідного. В цьому випадку вихідним є сигнал  $y_1$ , а вхідним  $x_{ex}$ . Їх відношення:

$$\frac{y_1}{x_{ex}} = \frac{K_1}{1 \pm K_1 K_2}$$

В цьому виразі знак мінус відповідає позитивному зворотному зв'язку а плюс – негативному ЗЗ.

Позитивний зворотний зв'язок найчастіше використовується в підсилювальних елементах автоматики. За допомогою позитивного зворотного зв'язку може бути отримана релейна характеристика системи.

За принципом негативного зворотного зв'язку заснована робота систем автоматичного регулювання (САР). У ЕП відбувається вирахування вихідного сигналу  $y(t)$  із вхідного сигналу  $g(t)$  (рис. 2). Саме завдяки негативному зворотному зв'язку забезпечується автоматична підтримка регульованої величини на заданому рівні. Адже завдяки негативному зворотному зв'язку постійно визначається відхилення  $y(t)$  від  $g(t)$  і виробляється (відповідно до цього відхилення) регулюючий вплив. У ланцюг зворотного зв'язку САР включений датчик. У прямий ланцюг включені підсилювачі та виконавчі елементи автоматики. Якщо, коефіцієнти перетворення всіх елементів, включених у прямий ланцюг, позначити коефіцієнтом перетворення  $K_{np}$ , а для датчика  $K_d$ . То загальний коефіцієнт перетворення САР:

$$K_{САР} = \frac{K_{np}}{1 + K_{np} K_d}$$

Аналіз виразів (1,2) показує, що рівень сигналу на вході елементів зворотного зв'язку залежить від коефіцієнтів передачі не лише ланцюгів ЗЗ, а і від коефіцієнтів передачі основної схеми. Тобто, зміна параметрів та характеристик елементів в основній схемі (за будь якої причини) призводить до значних змін в режимі функціонування елементів ЗЗ, а відповідно і до значних змін температури цих елементів. Цей факт (відображення стану основної системи на режимі функціонування елементів тракту зворотного зв'язку) дозволяє використовувати метод власного випромінювання [5] для вирішення задач діагностування систем зі ЗЗ без розриву (без розмикання) ланцюгів ЗЗ шляхом цілеспрямованого безконтактного контролю саме елементів ЗЗ.

Позначимо:  $y(t)$  - функція зміни в часі величини яка регулюється,  $g(t)$  – закон зміни величини яка регулюється. Тоді, основне завдання автоматичного регулювання є забезпечення рівності:

$$y(t) = g(t).$$

Більшість САР вирішують це завдання використовуючи принцип регулювання по відхиленню [6]. Функціональна схема такої САР приведено на рис. 1.1.

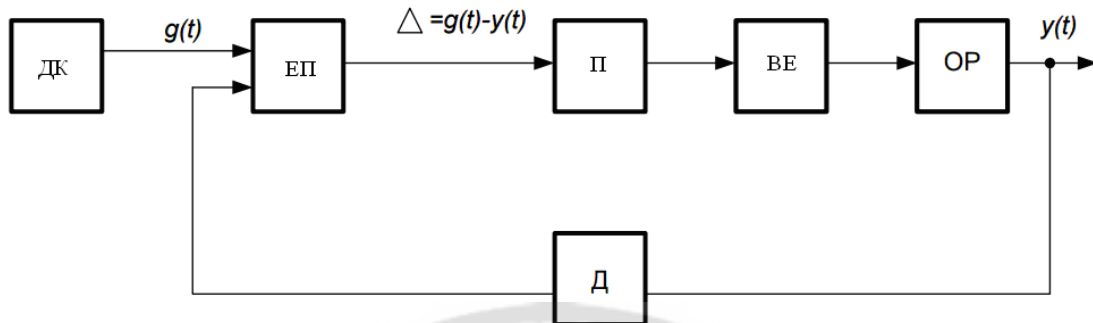


Рис. 2. Функціональна схема САР

Сутність принципу регулювання по відхиленню полягає в тому, що регульована величина  $y(t)$  вимірюється за допомогою датчика Д і надходить на елемент порівняння (ЕП). На інший вхід елемента порівняння надходить керуючий сигнал  $g(t)$  від датчика керування (ДК). В ЕП величини  $g(t)$  і  $y(t)$  порівнюються (тобто від  $g(t)$  віднімається  $y(t)$ ). На виході ЕП формується сигнал, який дорівнює відхиленню регульованої величини від заданої:

$$\Delta = g(t) - y(t).$$

Цей сигнал надходить на підсилювач (П) і потім подається на виконавчий елемент (ВЕ), який і впливає на об'єкт регулювання (ОР). Цей вплив буде змінюватися доти, поки регульована величина  $y(t)$  не стане дорівнює заданої  $g(t)$ . На об'єкт регулювання постійно впливають різні впливи (навантаження об'єкта, зовнішні фактори). Ці впливи прагнуть змінити величину  $y(t)$ . Але САР постійно визначає відхилення  $y(t)$  від  $g(t)$  і формує керуючий сигнал, який прагне звести це відхилення до нуля.

Приклад широко розповсюдженої (системи зв'язку та радіотехнічні системи) САР – схема фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ).

Схема ФАПЧ є системою з контуром зворотного зв'язку, який містить ГКН, фазовий детектор (ФД), фільтр нижніх частот (ФНЧ) і підсилювач (рис. 3) [7].

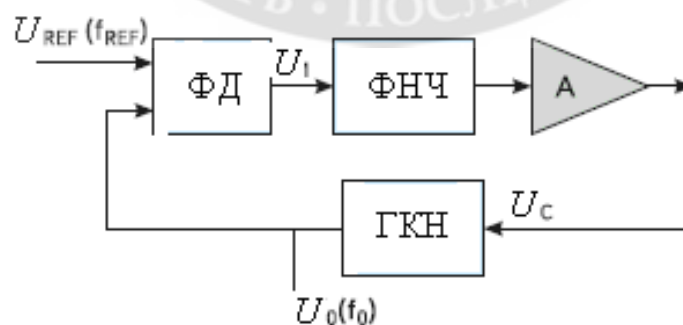


Рис. 3. Структурна схема ФАПЧ

Детектор похибки (фазовий детектор - ФД) порівнює фази сигналу опорного генератора  $f_{REF}$  та вихідного сигналу ГКН  $U_0$  і виробляє напруга  $U_1$ , величина якої залежить від різниці фаз цих сигналів. Якщо ця різниця дорівнює  $\varphi$  радіан, то вихідна напруга ФД буде визначатися виразом:

$$U_1 = K_\varphi \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right),$$

де  $K_\varphi$  – коефіцієнт передачі «фаза → напруга ФД» (В/рад).

Вихідна напруга ФД пропускається через ФНЧ (придушення високочастотних складових та їхніх гармонік, які присутні в опорному сигналі і на виході ГКН). Напруга з виходу ФНЧ підсилюється і використовується як керуюча для ГКН ( $U_C$ ). Величина її становить:

$$U_C = K_\varphi A \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right), \quad (3)$$

де  $A$  – коефіцієнт підсилення.

Така керуюча напруга забезпечує зміну частоти ГКН (по відношенню до частоти його власних коливань  $f_0$ ) до рівня:

$$f = f_0 + K_u U_C,$$

де  $K_u$  – коефіцієнт передачі «напруга → частота ГКН» (Гц/В).

Коли ФАПЧ здійснює захоплення опорного сигналу  $f_{on}$ , справедлива рівність:

$$f = f_{REF} = f_0 + K_u V_C,$$

Оскільки відповідно (3):

$$V_C = \frac{f_{REF} - f_0}{K_u} = K_\varphi A \left( \varphi - \frac{\pi}{2} \right)$$

отримаємо:

$$\varphi = \frac{\pi}{2} + \frac{f_{REF} - f_0}{K_u K_\varphi A}$$

Таким чином, якщо схема ФАПЧ захопила опорний сигнал, то зсув по фазі між цим сигналом і вихідним сигналом ГКН встановлюється рівним  $\varphi$ , а частоти  $f_{REF}$  та  $f_0$  будуть синхронізовані.

Максимальна напруга на виході ФД має місце при  $\varphi = \pi$  та  $\varphi = 0$  і визначається виразом:

$$U_{1(MAX)} = \pm K_\varphi \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

Відповідно максимально можлива керуюча напруга дорівнює:

$$U_{C(MAX)} = \pm K_\varphi K_u \frac{\pi}{2}. \quad (5)$$

У цьому випадку діапазон частот, які можливо забезпечити на виході ГКН, становить:

$$(f - f_0)_{MAX} = K_u U_{C(MAX)} = \pm K_\varphi K_u \frac{\pi}{2} A.$$

Електронні схеми вважаються однією з найбільш критичних зон функціонування, яких засновані на декількох ключових формулах. Одна з основних – закон Джоуля:

$$P = \frac{U^2}{R}. \quad (6)$$

Температура нагріву поверхні РЕК при безперервному впливі визначається виразом [8]:

$$T = T_0 + PR_T \left( 1 - e^{-\frac{t}{mCR_T}} \right), \quad (7)$$

де  $P$  – електрична потужність, яка спричиняє нагрів елементів;

$R_T$  – тепловий опір поверхні РЕК;

$t$  – час впливу;

$m, C$  – фізичні параметри РЕК (маса та удільна теплоємність).

З урахуванням (5) та (7), максимальна температура нагріву елементів в ланцюгу ЗЗ при максимально можливій керуючій напрузі схеми ФАПЧ при безперервному впливі становить:

$$T = T_0 + (K_\varphi K_u \pi)^2 \frac{R_T}{4R} \left( 1 - e^{-\frac{t}{mCR_T}} \right). \quad (8)$$

А максимальний частотний діапазон сигналів опорного генератора, при яких схема ФАПЧ буде перебувати в режимі захоплення, становить:

$$f_{REF} = f_0 \pm K_u K_\varphi \frac{\pi}{2} A = f \pm \Delta f_L.$$

Величина  $2\Delta f_L$  називається смугою захоплення ФАПЧ і визначається за формулою:

$$2\Delta f_L = K_\varphi K_u A \pi.$$

На рис. 4 наведено залежність  $U_C$  від частоти опорного сигналу, яка характеризує смугу захоплення. Поза цією смугою частота ГКН не може бути синхронізована із частотою опорного сигналу [9].

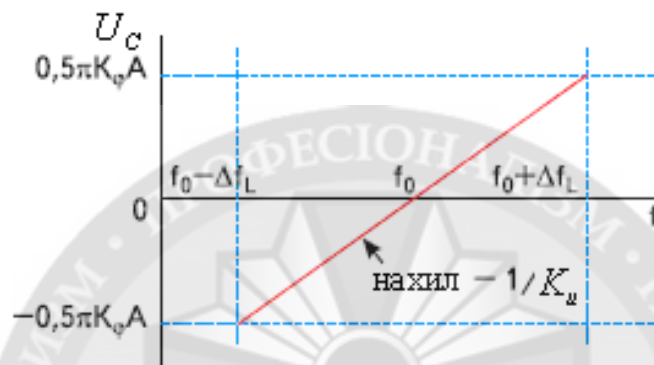


Рис. 4. Полоса захоплення ФАПЧ

Температура як кількісний показник внутрішньої енергії тіл є універсальною характеристикою об'єктів і процесів фізичного світу, в якому безперервно відбувається генерація, перетворення, передача, накопичення і використання енергії в її різних формах.

Аналіз теплових процесів (температурних полів, втрат тепла тощо) дозволяє отримати різноманітну інформацію про стан об'єктів і протіканні фізичних процесів.

Інтерес до методу власного випромінювання обумовлений його універсальністю, високою продуктивністю і безпекою обслуговування апаратури (на відміну від таких методів неруйнівного контролю, як, наприклад, рентгенівський або радіаційний).

Широке застосування методу власного випромінювання можливо завдяки появі швидкодіючих матричних приймачів інфрачервоного сигналу великого формату і використанню комп'ютерна-вимірювальних систем обробки інформації.

Особливий інтерес до методу обумовлений його універсальністю, високою продуктивністю і безпекою обслуговування апаратури (на відміну від таких методів неруйнівного контролю, як, наприклад, рентгенівський або радіаційний). Метод заснований на фіксації випромінювання з поверхні об'єкту пристроєм для реєстрації температури поверхні РЕК або всього обладнання. Подібний аналіз є безконтактним і детальним засобом моніторингу стану електричного і електромеханічного устаткування [10] та є ефективним засобом попереджувального обслуговування. Загалом, стратегія обслуговування підрозділяється на три категорії з пов'язаними параметрами [11]:

- робота до відмови (поки не вийде з ладу);
- регулярне обслуговування (проводиться через постійні проміжки часу);
- попереджувальне (засновано на фактичному стані).

Розвиток цієї технології полягає у відповіді на відмінності між температурами на поверхні об'єкта та їх відображенням в зображеннях, які відображаються на моніторі (ПК-екрані) [12]. Ці зображення, або термограми, можуть бути копійовані, сфотографовані або записані для подальшого аналізу та обробки.

Використання безконтактних засобів моніторингу стану електричного і електромеханічного устаткування зручно в силу наступних причин [13]:

- контакт між поверхнями виключено;
- безпечно для навколишнього середовища;
- стійкість до магнітного шуму;
- допустимо застосування у вибухонебезпечному середовищі;
- передає інформацію в реальному часі;
- надійно завдяки практично необмеженому терміну служби.

Використовуючи зазначений метод, обслуговуючий персонал забезпечений даними, які обраховують процес і показують результат в реальному часі. Важливо відзначити, що здатність зберігати та видавати дані критична для розвитку програм попереджувального обслуговування.

Параметри електронних та мікроелектронних пристроїв (цифрових блоків, ТЕЗів), найбільше піддаються впливу тепла (це викликано особливостями дизайну). У багатьох випадках, РЕК «виробляє» велику кількість теплоти в наслідок критичної зміни параметрів через фізико-хімічні процеси в напівпровідникових структурах під час експлуатації. Тепло свідчить про проблему і є головною ознакою при виконанні попереджувального обслуговування. Причини можуть бути знайдені як в концентрації основних носіїв і наявності мікрооб'ємів електролітів, так і в електродифузії (електроміграції), корозії та окислюванні металізації, механізм деградації металевих плівок та якості внутрішніх контактних з'єднань, які впливають на струм. «Холодні» зони можуть бути показником відкритого контуру.

Щоб визначити, в якій мірі погіршується стан «теплого» елемента, необхідно дослідити тенденції і оцінити всю систему. Дослідження тенденцій - "трендінг" - найчастіше виражається у побудові залежності величини залежно від часу. У нашому випадку вертикальною складовою є функція температури. Грунтуючись на регулярних інтервалах вимірювань, можна отримати картину зміни стану РЕК (обладнання).

Якщо навантаження на елементи зворотного зв'язку змінюється, то вимірювання характеристик ІЧ поля повинні проводитися з урахуванням поточних параметрів. Така система вимірювань дозволить встановити кореляцію між підйомом температури і поточними вимірами.

Підняття температури в порівнянні з нормальною температурою (в порівнянні з нормальним струмом, (нормальною напругою)) при власному випромінюванні становить [5]:

$$\Delta T_s = \Delta T_m \left( \frac{I_r}{I_m} \right)^{1,67+2}$$

де  $T_s$  – підйом температури,  $T_m$  – виміряний підйом температури,  $I_r$  – нормальний струм,  $I_m$  – вимірюваний струм.

**Висновки.** Таким чином, метод власного випромінювання (АА СД в режимі локалізації несправності) може бути використано для діагностики окремих компонентів усередині складної системи (а саме елементів схеми зворотного зв'язку). Рішення завдань діагностування для САР (систем зі зворотним зв'язком) існуючими методами ускладнено або взагалі не можливо без розривання (руйнування) ланцюгів ЗЗ. Запропонований метод є методом неруйнівного контролю.

Тепло, яке виділяється елементами ЗЗ за будь яких причин (і внаслідок фізико-хімічних процесів в напівпровідникових РЕК під час експлуатації) створює тепловий відбиток і може бути автоматично зафіксовано та оброблено в реальному часі. Вимірювання потрібно проводити з урахуванням геометрії РЕК, їх розташування та допустимого стану.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1 Фельдбаум А.А. Методы теории автоматического регулирования / А.А. Фельдбаум, А.Г. Бутковский. – М.: Наука, 1971. – 744с.

2 Жердев М.К. Электромагнитный метод диагностирования радиоэлементов в составе радиоэлектронных устройств / М.К. Жердев, С.В. Ленков, П.А. Шкуліпа // Сборник научных работ Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.:ВІКНУ, 2013. – Вып. 41. – С. 93-98.

3 Ленков С.В. Загальний підхід до диагностирования радиоэлектронных блоков динамичным методом с использованием информационных технологий / С.В. Ленков, О.В. Селюков, П.А. Шкуліпа // Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. – Київ, 2012. – № 3. – С. 59-63

4 Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием / Х. Гурецкий; – М.: Машиностроение, 1974. – 327с.

5 Кузавков В.В. Застосування методу власного випромінювання для технічної діагностики радиоэлектронных блоков / В.В. Кузавков, О.Г. Янковський // Сборник научных работ Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – Одеса, 2014. – Вып.№ 2(5). – С.58-62.

6 Цыпкин Я.З. Основы теории автоматических систем / Я.З. Цыпкин. – М.: Энергия, 1977. – 470 с.

7 Голуб В.С. Эквивалентная схема системы ФАПЧ / В.С. Голуб // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1994. – Т. 37. – № 8. – С. 54–58.

8 В.В. Кузавков. Забезпечення робочого режиму радиоэлектронных компонентів в методі власного випромінювання / Кузавков В.В. // КПП.Правове, нормативне та метрологічне забезпечення системи захисту інформації в Україні. Науково-технічний збірник. – К.: КПП, 2015. – Вып. №1(29). – С.97-101.

9 Curtin M., O'Brien P. Phase Locked Loops for High-Frequency Receivers and Transmitters // Analog Dialogue, Analog Devices, 1999, Vol. 33, No. 3, 5, 7.

10 Малик С.Б. Применение термографии для контроля тепловых режимов печатных плат / С.Б. Малик // «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – Киев, 2007. – Вып. № 1. – С. 28-31.

11 Подходы к созданию стандартных образцов для теплового неразрушающего контроля / В.А. Стороженко, Н.Ф. Хорло, С.Н. Мешков, В.А. Маслова // «Техническая диагностика и неразрушающий контроль». – Киев, 2005. – №1. С.21-25.

12 Стороженко В.А. Термография в диагностике и неразрушающем контроле / В.А. Стороженко, В.А. Маслова. – Харьков: Компания СМІТ, 2004. – 160 с.

13 Вишнівський В.В. Термографія як засіб пасивного контролю технічного стану радиоэлектронных схем с. 86 МОУ / В.В. Вишнівський, В.В. Кузавков, С.В. Редзюк // Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації Державного університету телекомунікацій. VII-й Науково-практичний семінар „Пріоритетні напрямки розвитку телекомунікаційних систем та мереж спеціального призначення ” 24 жовтня 2013 року: доповіді та тези доповідей. – Київ, 2013.

**Рецензент:** д.т.н., проф. Жердев М.К., провідний науковий співробітник науково-дослідного центру Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка

**к.т.н. Кузавков В.В.**

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ АВТОНОМНОЙ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ**

*В статье, на примере схемы фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) рассмотрена возможность решения задач диагностирования для целого класса систем автоматического регулирования (САР) - систем с обратной связью (ОС). Использование метода собственного излучения (использование автономной автоматизированной системы диагностирования (АА СД) в режиме локализации неисправности) позволяет автоматически контролировать режим работы элементов, входящих в состав схемы ОС и тем самым обнаруживать предотказное состояние всей схемы (объекта контроля (ОК)).*

*Накопление (рост) напряжения в элементах ОС однозначно свидетельствует об отклонении в работе основной системы. Эта информация, отображенная средствами индикации, позволяет оперативно реагировать обслуживающему персоналу, или*

*автоматически (при наличии резервирования) включать резервные системы образца радиоэлектронного оборудования (РЕО).*

*Ключевые слова: система автоматического регулирования, автономная автоматизированная система диагностирования, объект контроля, обратная связь, физико-химические процессы, радиоэлектронный компонент.*

**PhD. Kuzavkov V.V.**

## **FEATURES OF SELF AUTOMATED SYSTEM FOR DIAGNOSIS FEEDBACK SYSTEM**

*In the article, on the example of chart of PLL of frequency possibility of decision of tasks of diagnostic for the whole class of the systems of automatic control (SAC) is considered - systems ticker-coil. The use of method of own radiation (use of the off-line automated system of diagnostic in the mode of localization of disrepair) allows automatically to control the mode of operations of elements entering in the complement of chart of ticker-coil and to discover the emergency state of all chart (control object (CO)).*

*The accumulation (height) of tension in the elements of ticker-coil simply testifies to the rejection in-process basic system. This information represented by facilities of indication allows operatively to react to the auxiliary personnel, or automatically (at presence of backuping) to include the backup systems of standard of radio electronic equipment (REE).*

*Keywords: system of automatic control, off-line automated system of diagnostic, control object, feed-back, physical and chemical processes, radio electronic component.*