

УДК 629.735.083.2:620.179.1

Н. Бурау, докт. техн. наук; О. Павловський; Д. Шевчук

*Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»*

СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СИНТЕЗ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ КОНСТРУКЦІЙ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Резюме. Розглянуто основи синтезу нового класу діагностичних систем – комплексних інтелектуальних систем моніторингу технічного стану конструкцій в експлуатації. За принципом побудови та функціонування такі системи відносяться до систем, що реалізують сучасну концепцію *Structural Health Monitoring*. Метою структурно-функціонального синтезу системи є формування мережі вимірювальних каналів та оптимізація структури системи для своєчасного безпомилкового визначення поточного технічного стану об'єкта контролю та прогнозування його майбутніх станів. Вибір та оптимізація структури визначаються поставленою діагностичною метою та апріорними даними про досліджувані фізичні процеси з урахуванням інформаційних аспектів процесів діагностування, які реалізуються в системі. Розглянуто й проаналізовано узагальнену функціональну блок-схему системи, узагальнену схему передавання інформації, розглянуто деякі типи датчиків первинної інформації, які можуть бути використані в системі. Як приклад, наведено функціональну схему системи моніторингу для попередження руйнування резервуарів з еколого-небезпечними речовинами, які знаходяться у важкодоступних місцях та під впливом динамічних і кліматичних навантажень.

Ключові слова: структурний моніторинг, комплексні інтелектуальні системи моніторингу, об'єкт контролю, канали зв'язку, датчики первинної інформації.

N. Bouraou, O. Pavlovskiy, D. Shevchuk

STRUCTURAL FUNCTIONAL SYNTHESIS OF THE DIAGNOSIS SYSTEMS OF THE CONSTRUCTION UNDER OPERATION

Summary. Bases of synthesis of the new class of diagnostic systems – the complex smart systems of monitoring of a technical condition of construction at the operating are observed. According to the construction and operation principles such systems refer to systems, which realize the modern concept *Structural Health Monitoring*. The purposes of a structural functional synthesis of the system are formation of a network of measuring channels, optimization of structure of system for timely and correct determination of a current technical condition of the testing object, and prediction of its future conditions. Choice and optimization of structure of the system are defined by the formulated diagnostic aim, the previous data on the investigated physical processes taking into account the informational aspects of diagnostic processes, which are realized in the system. Monitoring system measuring channels contain the source of information sensing transducers, converters, amplifiers, filters, communication lines. Requirements are listed for choice and optimization of types and quantity of the monitoring system measuring channels. The generalized functional block diagram of the monitoring system and the generalized diagram of information transfer are observed and analyzed. Some types of sensing transducers of a source information are observed, which can be used in monitoring systems. These are sensing transducers of acoustical emission, sensing transducers of vibration and fiber-optical displacement sensors. The choice of types of the sensing transducers is defined by the following factors: sensitivity, accuracy, weight and dimensional characteristics, efficiency of the realized method of non-destructive testing, as well as specificity of the testing object. The functional diagram of the monitoring system are presented for the preventing of destruction of tanks with ecology-dangerous substances, which are located in hard-to-reach spots, and are under the influence of dynamic and climatic loadings.

Key words: Structural Health Monitoring, complex smart systems of monitoring, testing object, communication channel, sensing transducers of a source information.

Вступ. На сьогодні проектування відповідальних елементів конструкцій авіаційної техніки, машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, інженерних

споруд спеціального призначення у більшості випадків ґрунтується на принципі безпечного пошкодження [1]. Наявність чи виникнення мікродефектів в елементах конструкцій розглядається як можливе, але таке, що не призводить до втрати працездатності та руйнування об'єкта. Для безаварійної експлуатації таких об'єктів необхідно своєчасно виявляти пошкодження, проводити моніторинг їхнього розвитку та прогнозування граничного стану. Таким чином, одним з необхідних і перспективних сучасних шляхів забезпечення надійної, безаварійної та ефективної експлуатації об'єктів авіаційної техніки, машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, інженерних споруд є моніторинг життєвого циклу їх конструкцій на основі комплексного аналізу інформації про поточний технічний стан (ТС), експлуатаційні навантаження та впливи зовнішнього середовища.

Розроблені за останнє десятиріччя методи, методики й технології діагностування як окремих елементів конструкцій, так і складних динамічних об'єктів дозволяють створити діагностичні системи нового класу – комплексні інтелектуальні системи моніторингу (KICM) ТС конструкцій в експлуатації. Такі системи за принципами побудови та функціонування можна віднести до систем, що реалізують сучасну концепцію Structural Health Monitoring (SHM) [2, 3]. Концепція SHM зараз активно розвивається за кордоном і передбачає неперервний та автономний контроль дефектів і пошкоджень, статичних та динамічних навантажень, взаємодії елементів конструкцій з навколишнім середовищем, екологічних параметрів за допомогою мережі постійно прикріплених чи вбудованих чутливих елементів (сенсорів), що забезпечують цілісність конструкції об'єкта. Для динамічних об'єктів структурний моніторинг (визначення стану елементів конструкцій) доповнюється системним моніторингом (визначення ТС функціональних систем в експлуатації). Таким чином, системи SHM забезпечують моніторинг життєвого циклу об'єкта контролю для його надійної та безпечної експлуатації.

Системи SHM розробляють як розгалужені інформаційні мережі, що подібні до нервової системи людини [4]. Для реєстрації експлуатаційного навантаження та виникнення дефектів в елементах конструкції у якості чутливих елементів доцільно використовувати датчики, побудовані на різних фізичних принципах. Ці датчики об'єднують в єдину інформаційну мережу та інтегровані з обчислювальним та керуючим модулем (центральною діагностичним сервером). Упровадження концепції SHM при розробленні нових об'єктів авіаційної техніки, машинобудування, енергетики, нафтогазової галузі, інженерних споруд спеціального призначення дозволить створювати «інтелектуальні конструкції» з притаманними їм діагностичними функціями для забезпечення надійної та ефективної експлуатації.

В KICM на основі концепції SHM передбачається, що операції вимірювання, реєстрації, перетворення та комплексного аналізу даних виконуються для кожного з множини просторово рознесених датчиків первинної інформації. Тому синтез таких систем повинен ґрунтуватися на оптимальному поєднанні принципів модульності та багатоканальності з урахуванням інформаційних аспектів діагностичних процесів. Модульний принцип віддзеркалює набір використаних датчиків для отримання інформації, достатньої для комплексного оцінювання експлуатаційного навантаження та поточного ТС однієї чи кількох структурних одиниць об'єкта контролю. Принцип багатоканальності реалізується як в межах одного модуля (при реалізації одного фізичного принципу та методу контролю), так і за рахунок об'єднання кількох модулів для вирішення діагностичної задачі щодо однієї структурної одиниці об'єкта. Оптимальне об'єднання принципів модульності та багатоканальності, наявність інтелектуальної системи керування та прийняття рішень – все це є характерними

ознаками систем, що реалізують концепцію SHM для підвищення вірогідності визначення поточного ТС конструкцій в експлуатації.

Постановка задачі. Відповідно до [5] структурний та системний моніторинг є науковим процесом неруйнівної ідентифікації чотирьох характеристик, які пов'язані з відповідністю розроблених елементів конструкцій (об'єктів, систем) встановленим вимогам при їх експлуатації:

- експлуатаційні та кліматичні навантаження на елементи (об'єкти, системи);
- механічні пошкодження, зумовлені зазначеними навантаженнями;
- розвиток пошкоджень при експлуатації елементів конструкцій (об'єктів, систем);
- прогнозовані експлуатаційні характеристики елементів конструкцій (об'єктів, систем) при накопиченні пошкоджень.

Таким чином, моніторинг визначається як єдиний інформаційний процес отримання, перетворення та аналізу доступної в процесі експлуатації інформації для прийняття рішення щодо ТС елементів конструкцій (об'єктів, систем). Інформація про перші три характеристики, отримана як на основі попереднього аналізу математичних моделей, конструкції, особливостей і технічних умов функціонування контрольованих об'єктів, так і в результаті неруйнівної ідентифікації в процесі експлуатації використовується для прогнозування зміни (відповідності чи невідповідності) ТС контрольованого об'єкта в майбутньому.

Для розроблення КІСМ ТС елементів конструкцій (об'єктів, систем) в експлуатації необхідно вирішити такі завдання [6]:

- формування переліку вимог і технічних умов до КІСМ на основі аналізу інформації про об'єкт контролю, умови його експлуатації та потенційні небезпечні дефекти конструкції;
- розроблення методологічного забезпечення структурного моніторингу конструкцій: обґрунтування, розроблення, вдосконалення методів та засобів неруйнівного контролю для забезпечення неперервного поточного (онлайнного) комплексного аналізу й ідентифікації технічного стану;
- структурно-функціональний синтез системи: обґрунтування, розроблення та вдосконалення датчиків первинної інформації – чутливих елементів системи, перетворювачів, засобів зв'язку, засобів опрацювання інформації; формування вимірювальних каналів, оптимізація структури системи;
- розроблення центрального діагностичного сервера, формування інформаційної мережі для передавання діагностичних даних на центральний діагностичний сервер та створення відповідних інтерфейсів;
- розроблення алгоритмів опрацювання діагностичної інформації для окремих модулів системи, розроблення алгоритмів оцінювання та прийняття рішення про експлуатаційні навантаження та ТС контрольованого об'єкта.

За умови встановлених діагностичних завдань та визначених методів контролю і діагностики, що є найбільш прийнятними для моніторингу ТС конкретного об'єкта, ефективність структурного моніторингу зумовлюється такими факторами: структура системи моніторингу; характеристики вимірювальних каналів; методи та алгоритми аналізу.

Метою даної роботи є обґрунтування структури комплексної інтелектуальної системи моніторингу ТС конструкцій в експлуатації.

Структурно-функціональний синтез комплексних інтелектуальних систем моніторингу. Метою структурно-функціонального синтезу системи є, як зазначено

вище, формування мережі вимірювальних каналів та оптимізація структури системи для забезпечення безпомилкового визначення поточного ТС об'єкта контролю та прогнозування його майбутніх станів за результатами поточного аналізу. Вибір та оптимізація структури визначаються поставленою діагностичною метою та апіорними даними про досліджувані фізичні процеси з урахуванням інформаційних аспектів процесів діагностування, які реалізуються в системі. В узагальненому вигляді функціональну блок-схему КІСМ показано на рис. 1.

КІСМ – багатоканальна система, яка в реальних умовах експлуатації контрольованого об'єкта забезпечує виконання таких функцій:

- прийняття, перетворення, попереднє опрацювання та реєстрація інформації від множини датчиків первинної інформації й сигналізаторів, які встановлені на об'єкті;
- опрацювання інформації та визначення характеристик і параметрів експлуатаційних навантажень на елементи конструкції об'єкта контролю;
- опрацювання інформації відповідно до визначених методів, виділення параметрів (діагностичних ознак) зміни технічного стану;
- слідкування за перевищенням параметрами своїх граничних значень, розпізнавання функціонального технічного стану та формування сигналів появи пошкодження, несправного функціонування чи аварійного стану контрольованого об'єкта;
- візуалізація діагностичних повідомлень, автоматичне формування за запитом усієї наявної інформації для кожного діагностичного повідомлення;
- зберігання та передавання інформації у зовнішні інформаційні мережі.

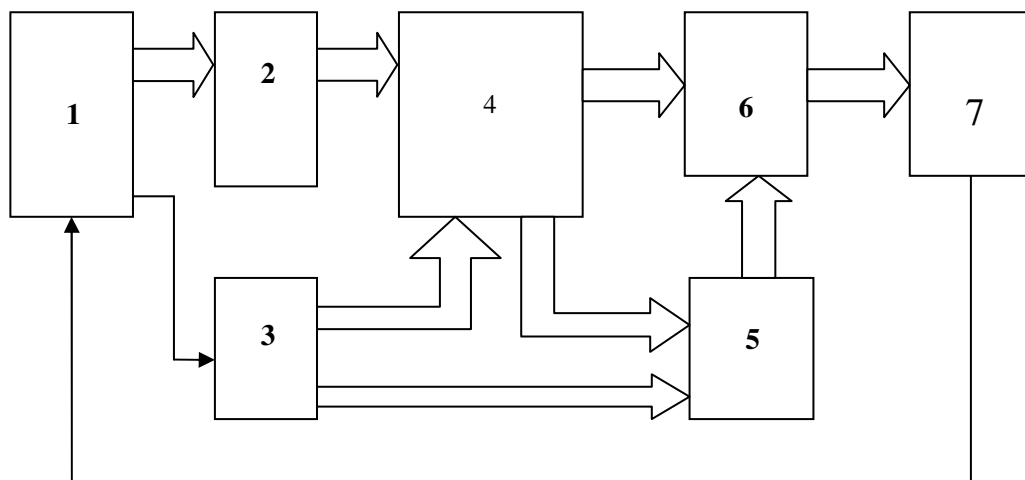


Рисунок 1. Функціональна блок – схема системи моніторингу:

- 1 – об'єкт контролю; 2 – множина датчиків первинної інформації; 3 – діагностична модель об'єкта;
 4 – підсистема перетворення, аналізу інформації та формування діагностичних ознак;
 5 – підсистема формування об'єктів навчальної множини ознак; 6 – класифікатор стану;
 7 – блок формування результатів діагностування

Figure 1. Functional block diagram of the monitoring system:

- 1 – testing object; 2 – set of the sensors; 3 – diagnosis model of testing object;
 4 – subsystem of data transformation and analysis, and features generation; 5 – subsystem of generation of the learning set of features; 6 – pattern recognition unit; 7 – diagnose generation unit

За результатами опрацювання діагностичної інформації та виділення діагностичних ознак (підсистема 4) із використанням діагностичної моделі

контрольованого об'єкта (блок 3) виконується формування об'єктів навчальної множини ознак (підсистема 5) для бездефектного стану елементів конструкції та безпосередньо розпізнавання ТС у процесі моніторингу (блок 6). Наявність великої кількості інформації, зазвичай її нелінійний характер, а також вимоги забезпечення високого рівня вірогідності локалізації дефектів та розпізнавання поточного ТС зумовлюють застосування штучних нейронних мереж для побудови класифікатора ТС.

З точки зору передавання інформації узагальнена схема системи моніторингу має подання у вигляді, зображеному на рис. 2 [5].

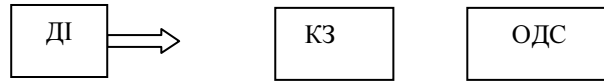


Рисунок 2. Узагальнена блок-схема передавання інформації системи моніторингу: ДІ – джерело інформації; КЗ – канали зв'язку; ОДС – отримувач діагностичних сигналів

Figure 2. Generalized diagram of information transfer: ДІ – information generator; КЗ – data lines; ОДС – recipient of information

Джерелом інформації є безпосередньо об'єкт контролю, для моніторингу ТС якого розробляється система. Отримувачем діагностичних сигналів є об'єкт, який, оцінюючи конкретну реалізацію сигналу, що до нього надходить, виконує аналіз та робить висновки про стан джерела інформації. Каналом зв'язку, в свою чергу, є система технічних засобів і середовище поширення сигналів для передавання повідомлень (не лише даних) від джерела до отримувача (і навпаки). Каналом зв'язку, що розуміється у вузькому сенсі (тракт зв'язку), є тільки фізичне середовище поширення сигналів, наприклад, фізична лінія зв'язку.

До основних засобів каналу зв'язку відносяться: датчики первинної інформації (первинні перетворювачі), аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), фільтри, лінії зв'язку, підсилювачі, модулятори тощо. На сьогодні найбільш розповсюдженими на практиці є канали провідного зв'язку (повітряні, кабельні, світловодні та ін.) і канали радіозв'язку (тропосферні, супутникові та ін.) Такі канали, в свою чергу, прийнято класифікувати на основі характеристик вхідного і вихідного сигналів, а також за їх зміною залежно від завмирання і згасання сигналів у каналі. За типом середовища розповсюдження канали зв'язку поділяють на дотові, акустичні, оптичні, інфрачервоні й радіоканали. Також їх розрізняють за видом сигналів, що передаються (аналогові чи дискретні), та залежно від напрямку передавання даних.

Канали зв'язку є основою будь-якої діагностичної системи, тому зазвичай першим етапом розроблення багатоканальних інформаційно-діагностичних комплексів є розроблення каналів зв'язку. Типи та кількість каналів підбирають так, щоб вони задовольняли такі вимоги [7]:

- зони, що підконтрольні конкретним датчикам первинної інформації, повинні покривати максимально можливий об'єм або площу контрольованого об'єкта;
- кількість і місця встановлення датчиків повинні бути достатніми для того, щоб у результаті аналізу вимірних сигналів була можливість отримати відновлену картину полів розподілу контрольованих параметрів;
- розміщення датчиків оптимізується таким чином, щоб дані одного типу датчиків можна було зіставити з даними іншого типу датчиків з подальшими висновками про ступінь кореляції різних параметрів;
- кількість датчиків повинна бути мінімізована з точки зору витрат на створення системи моніторингу;
- конфігурація мережі датчиків повинна забезпечувати як локальний контроль параметрів стану елементів конструкції, так і оцінювання глобальних характеристик контрольованого об'єкта;

- вибір місць встановлення датчиків доцільно виконувати за даними моделювання контрольованого об'єкта.

Необхідні характеристики каналів формуються шляхом раціонального вибору елементів і значною мірою залежать від типів датчиків первинної інформації та місць їх установки на об'єкті. У сучасних системах SHM використовуються датчики для реєстрації різних фізичних процесів, які є реакцією матеріалу конструкції на вплив, що призводить до пошкодження [2, 5, 8]. Головними вимогами до датчиків первинної інформації є вимоги точності, чутливості, високої надійності, мініатюрності та можливості бути інтегрованими в конструкцію контрольованого об'єкта. Тип датчика первинної інформації залежить від закладеного в його основу методу неруйнівного контролю (НРК). Можливість використання конкретного типу датчика визначається не тільки відповідністю зазначеним вище вимогам, а й можливостями та ефективністю використаного методу НРК з урахуванням специфіки контрольованого об'єкта. Розглянемо для прикладу деякі типи датчиків первинної інформації, які можуть бути використані в системах SHM [7, 8] елементів конструкцій інженерних споруд.

Датчики акустичної емісії (АЕ). Акустико-емісійний контроль є пасивним методом, що ґрунтується на використанні явища виникнення та розповсюдження акустичних хвиль у напруженому (навантаженому) матеріалі, а безпосередньо акустична емісія є результатом генерації хвиль напружень, викликаних раптовою зміною структури матеріалу. Класичним джерелом АЕ є процес деформування, який пов'язаний з ростом дефектів, наприклад, тріщин або зон пластичної деформації. Раптовий рух джерела емісії стає причиною появи пружних хвиль, які поширюються в матеріалі та досягають перетворювача. Зі збільшенням напружень активізується значна кількість наявних у матеріалі джерел емісії. Електричні сигнали емісії, отримані в результаті перетворення датчиком пружних хвиль (датчиком АЕ), підсилюються, апаратно реєструються та піддаються подальшій обробці й інтерпретації. Головною вимогою до датчика є його висока чутливість. І хоча в цілому високоякісними датчиками вважаються такі, що мають плоску частотну характеристику у широкій смузі частот, однак у більшості практичних випадків найбільш чутливими є резонансні датчики. На практиці більшість вимірювань проводиться за допомогою датчиків АЕ, що мають резонанс на частотах від 20 кГц до 1МГц. Канал зв'язку містить попередній підсилювач та смуговий фільтр для пригнічення завад поза межами смуги робочих частот. Попередні підсилювачі, як відомо, самі є джерелами електронного шуму. Саме цей шум визначає нижню границю можливості застосування методу АЕ. Мінімальний сигнал, який можна зареєструвати апаратурою АЕ, має порядок 10 мкВ на виході датчика, що відповідає зсуву поверхні в 10^{-6} дюймів (при використанні типового високочутливого датчика). При використанні датчиків АЕ як діагностичні ознаки визначаються такі параметри сигналів АЕ: число осциляцій; амплітуда; тривалість; час наростання сигналу; площа під обвідною сигналу. Ці параметри є стандартними для АЕ контролю й застосовуються протягом багатьох років.

Датчики вібрації. Для визначення поточних значень модальних характеристик, статичних відхилень та динамічних характеристик елементів конструкції об'єкта під впливом реальних зовнішніх динамічних збурень, оцінювання на їх основі характеристик напруження та стійкості конструкції, контролю вібраційних характеристик фундаментів як ознак зміни динамічного навантаження на конструкцію об'єкта доцільно використовувати методи вібраційної діагностики. Датчиками вібраційних сигналів у таких каналах зв'язку є акселерометри. Найбільше застосування на сьогодні мають такі акселерометри: п'єзоелектричні, п'єзорезистивні; акселерометри зі змінною ємністю. П'єзоелектричні акселерометри використовують пружинно-масову систему для генерації сили, еквівалентної амплітуді й частоті вібрації. Ця сила прикладається до п'єзоелектричного елемента, який створює на своїх виходах заряд, пропорційний вібраційному переміщенню. Конструкція акселерометрів забезпечує

одночасно високий сейсмічний резонанс і міцність. П'єзоелектричні матеріали є самогенеруючими і тому не вимагають зовнішнього джерела енергії. Вони здатні працювати при екстремальних температурах. П'єзоелектричні акселерометри з інтегральними попередніми підсилювачами призначені для виміру вібрацій в малих конструкціях (наприклад, малогабаритних). Їх характеризує висока чутливість, високе відношення сигнал/шум і широка смуга пропускання. Датчики деформації *п'єзорезистивних акселерометрів* змінюють електричний опір пропорційно прикладеному механічному навантаженню. Монолітний датчик акселерометра містить вбудовані механічні обмежувачі й має дуже високу міцність при високому співвідношенні сигнал/шум. Акселерометри цього типу ідеально підходять для вимірювання переміщення, низькочастотної й ударної вібрації. У багатьох випадках їх використання не вимагається попереднє підсилення сигналу. П'єзорезистивні акселерометри мають мінімальне демпфірування, тому вони не створюють фазового зсуву на низьких частотах. В *акселерометрах змінної ємності* унікальний мікродатчик змінної ємності створює ємнісний пристрій з паралельним розташуванням пластин. У результаті отримуємо датчик постійного струму з реакцією на вхідні прискорення, який характеризується стабільною характеристикою демпфірування та достатньою міцністю, щоб протистояти дуже високим ударним і прискорювальним навантаженням. Ці акселерометри ідеально підходять для вимірювання переміщень і низькочастотних вібрацій. Основними вимогами до акселерометрів, які можуть бути використані в системах SHM, є: чутливість не менша 20 мВ/г; мінімальний або відсутній зсув нуля; лінійність амплітудно-частотної характеристики в діапазоні робочих частот.

Волоконно-оптичні датчики. На сьогодні вони є основою для побудови розгалужених вимірювальних систем, що поєднують у собі властивості систем зв'язку і систем моніторингу. Важливою перевагою таких датчиків є те, що вони надають вимірювальним системам таких рис нової якості: мікромініатюрність; стійкість до неконтрольованих та агресивних збурень оточуючого середовища, у тому числі й електромагнітних збурень; висока чутливість; дистанційність вимірювань та можливість поєднання датчиків у складні вимірювальні структури; можливість бути вбудованими в конструкцію об'єкта контролю. Принцип роботи волоконно-оптичного датчика переміщення полягає в реєстрації зміни параметрів оптичних сигналів у світловоді, оптичні властивості якого залежать від зовнішніх впливів. Найчастіше датчики використовують інтенсивність світлової хвилі у якості параметра, що реєструє перетворювач. Ступінь змінювання інтенсивності світлової хвилі під впливом оточуючого середовища дозволяє однозначно визначати величину цього впливу. Найбільш перспективними є датчики на решітках Бреґа, які забезпечують розділення і відбиття чи поглинання хвиль різної довжини в різних точках. Волоконно-оптичні датчики з високою роздільною здатністю вимірюють температуру, ступінь деформації, виявляють появу тріщин, контролюють повзучість та термонапруження.

Як зазначалося раніше, процес моніторингу являє собою єдиний інформаційний процес, тому врахування інформаційних аспектів у структурному синтезі системи дозволить оптимізувати як засоби, необхідні для забезпечення досягнення поставленої діагностичної мети, так і сам процес діагностування. Головним аспектом при цьому є стиснення діагностичної інформації на всіх етапах діагностування, починаючи з вибору кількості, типів та місць встановлення датчиків первинної інформації і закінчуючи етапом прийняття рішення за вибраною множиною діагностичних ознак. Тобто стиснення інформації має місце як за загальною кількістю вимірювальних каналів, так і в межах кожного каналу. В останньому випадку стиснення забезпечується вибором ефективних методів опрацювання діагностичної інформації та вибором найбільш інформативних діагностичних ознак.

Для передавання діагностичної інформації доцільно використовувати Ethernet технології, а для керування процесом моніторингу, опрацювання інформації та

прийняття рішення про експлуатаційні навантаження і поточний ТС конструкцій – центральний діагностичний сервер. Методи опрацювання обираються окремо для кожного модуля залежно від інформативності тих фізичних величин чи їх характеристик, що використовуються в якості діагностичної інформації.

Важливою складовою кожного каналу та системи моніторингу в цілому є алгоритмічне та програмне забезпечення (АПЗ), яке повинно містити в собі сервісні програми, драйвери зв'язку, програми організації реєстрації та зчитування даних, програми організації процесу опрацювання інформації (формування часових послідовностей та керування процесом їх подання на відповідні блоки системи), програми безпосередньої обробки сигналів відповідно до використаних методів, програми оцінювання параметрів пошкодження, програми формування об'єктів навчальних множин діагностичних ознак, програми реалізації нейронних мереж та їх навчання, програми організації класифікації та прийняття рішення про ТС контрольованого об'єкта, а також програми для організації накопичення даних, формування документації для поточної та остаточної візуалізації результатів, їх збереження та передавання користувачам. Застосування сучасних інформаційних комп'ютерних технологій у системах моніторингу забезпечує розширення можливостей та підвищення ефективності діагностики за рахунок:

- паралельного опрацювання інформації та діагностування пошкоджень за множиною діагностичних ознак;
- адаптації методів та алгоритмів діагностування до конкретного типу об'єкта, умов експлуатації та умов діагностування;
- використання сучасних методів цифрового опрацювання діагностичної інформації та розпізнавання ТС об'єкта;
- алгоритмічного підвищення точності вимірювання/визначення діагностичних параметрів та ознак;
- нарощування можливостей вирішення додаткових діагностичних задач для конкретного об'єкта встановленням додаткового АПЗ.

Як приклад системи моніторингу, розробленої на основі концепції SHM, на рис. 3 наведено функціональну схему КІСМ для попередження руйнування резервуарів з еколого-небезпечними речовинами [9, 10], які знаходяться у важкодоступних місцях та під впливом динамічних (сейсмічних, вітрових) і кліматичних навантажень.

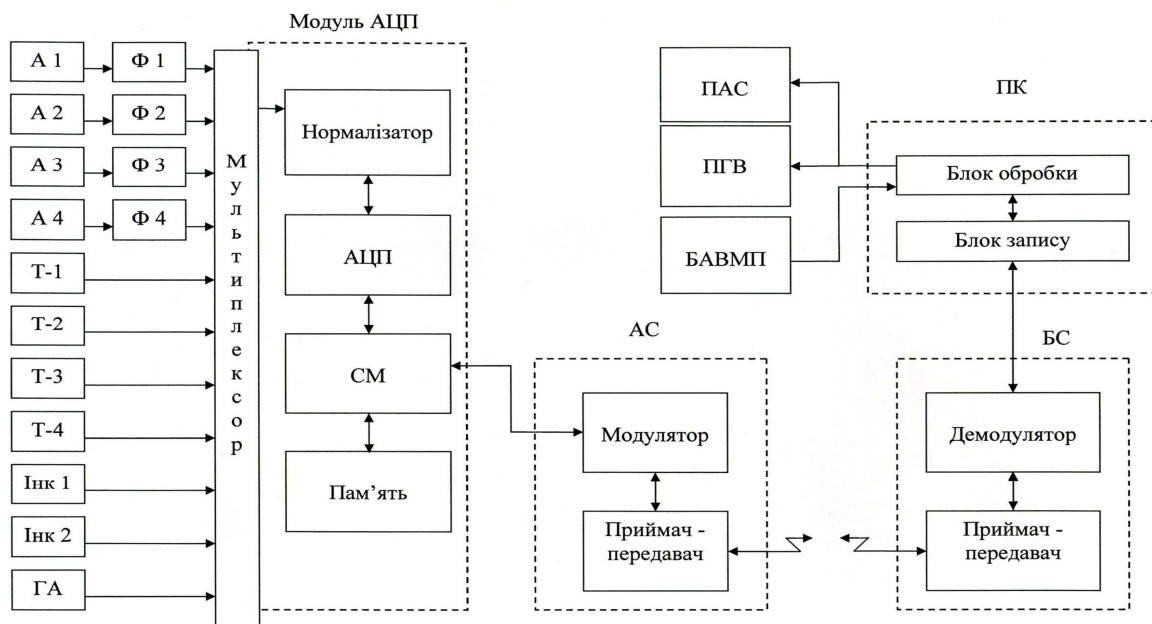


Рисунок 3. Приклад функціональної схеми системи моніторингу резервуарів з еколого-небезпечними

речовинами: А – акселерометр; Ф – фільтр; Т – тензодатчик; Інк – інклінометр; ГА – газоаналізатор; СМ – сигнальний мікропроцесор; АС – абонентська станція; БС – базова станція; ПАС – пристрій аварійної сигналізації; ПГВ – пристрій графічного відображення; БАВМП – блок автоматичного визначення метеорологічних параметрів

Figure 3. Functional block diagram example of the monitoring system for tanks with ecology-dangerous substances: А – accelerometer; Ф – filter; Т – strain sensor; Інк – inclinometer; ГА – gas analyzer; СМ – signaling processor; АС – abonent station; БС – baseline station; ПАС – trouble signaling unit; ПГВ – graphic drawing unit; БАВМП – automatic block for the meteorological parameters determination

За результатами аналізу конструкції та умов експлуатації резервуару в системі моніторингу реалізуються такі вимірювальні канали:

- вібродіагностичні – для контролю модальних характеристик резервуару, контролю вібраційних характеристик фундаменту, визначення параметрів і характеристик динамічних збурень;
- тензометричні – для визначення та контролю характеристик напружено-деформованого стану зовнішньої стінки резервуару;
- інклінометричні – для визначення та контролю просторового положення резервуару під дією динамічних збурень;
- газоаналізу – для контролю складу сумішей газів у просторі між зовнішньою та внутрішньою оболонками резервуару;
- автоматичного визначення метеорологічних параметрів для врахування їх при визначенні експлуатаційних навантажень на резервуар.

Інформація з датчиків надходить до багатоканального АЦП Е 14-440, де відповідно до встановлених параметрів (коефіцієнт підсилення, частота дискретизації, вхідний діапазон і т.д.) відбувається перетворення сигналів у цифрову форму та у формат OSI (технологія Ethernet), що дозволяє якісніше та надійніше передавати діагностичну інформацію. Для подальшого передавання діагностичної інформації до блоку опрацювання даних використовується модуль бездротового передавання даних WiMIC-6000. Сигнал з мікроконтролера АЦП надходить на абонентський передавач, який передає дані на базову станцію в пункті опрацювання інформації (залежно від встановленої програмної потужності бази сигнал може передаватися на відстань до 40 км). Базова станція відсилає отримані діагностичні дані до персонального комп'ютера (ПК), де виконуються операції збереження, накопичення, аналізу, візуалізації інформації, формування та передавання попереджувальних сигналів у разі необхідності.

Висновки. Обґрунтовано структуру комплексної інтелектуальної системи моніторингу технічного стану елементів конструкцій в експлуатації, яка розробляється на основі використання нових методів і засобів розв'язання діагностичних задач та відповідає вимогам концепції SHM. Упровадження таких систем в практику контролю інженерних споруд, об'єктів машинобудування, енергетики та авіаційної техніки сприятиме забезпеченню їх надійної, безаварійної та ефективної експлуатації.

Conclusions. The structure of the complex smart monitoring system of a constructions technical condition under operation are justified. The system is developed on the bases of the usage of new methods and facilities of solution of the diagnosis problems, and the system corresponds to specifications of the SHM concept. Implementation of such systems in the practice of control will promote the reliable, trouble-free and effective operation of structures, objects of engineering, energetic and an aeronautic engineering.

Список використаної література

1. Шанявский, А.А. Безопасное усталостное разрушение элементов авиаконструкций: монография [Текст] / А.А. Шанявский. – Уфа: 2003. – 802 с.

2. Structural Health Monitoring 2003: From Diagnostics & Prognostics to Structural Health Menegment: Proceedings of the 4th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford University, Stanford, CA, September 15 – 17, 2003. – 1552 p.
3. Перспективы использования бортовых систем контроля выработки усталостного ресурса авиационных конструкций [Текст] / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, Н.И. Бурау, В.С. Краснопольский // Вісник Тернопільського національного технічного університету. – 2011. – Спец. випуск (Ч. 2). – С. 171 – 178.
4. Speckmann, H. Structural Health Monitoring: a contribution to the intelligent aircraft structure [Електронний ресурс] / H. Speckmann, H. Roesner // Proc. 9th European NDT Confer. (ECNDT), 25-29 Sept., 2006, Berlin, Germany. – Режим доступу: <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.1.pdf>.
5. Adams, D. Health Monitoring of Structural Materials and Components: Methods with Applications / D. Adams. – John Wiley & Sons, Ltd., 2007. – 460 p.
6. Бурау, Н.И. Мониторинг жизненного цикла авиационной техники: проблема и основные пути ее решения [Текст] / Н.И. Бурау, В.В. Аврутов// Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: мат. 14 ежегодной межд. конф., 13 – 18 октября 2006 г., Ялта. – УИЦ «НАУКА. ТЕХНИКА. ТЕХНОЛОГИЯ», 2006. – С. 18 – 19.
7. Розробка багатоканального інформаційно-діагностичного комплексу для об'єктів з еколого-небезпечними речовинами: звіт про НДР (заключ.) [Текст] / М-во освіти і науки, молоді та спорту України; Нац. техн. ун-т України «КПІ»; кер. Н.Бурау. – Інв. № 0109U002223. – К., 2010. – 156 с.
8. Soloman, S. Sensors Handbook / S. Soloman. – McGraw-Hill Inc., 2010. – 1424 p.
9. Пат. 73310 Україна, МПК G01M 7/00. Інформаційно-діагностичний комплекс моніторингу і прогнозування технічного стану інженерно-будівельних споруд [Текст] / Бурау Н.І., Жуковський Ю.Г., Кузько О.В., Цибульник С.О., Шевчук Д.В.; заявник та патентовласник НТУУ «КПІ». – № U201115682; заявл. 30.12.2011; опубл. 25.09.2012, Бюл. №18.
10. Fuels Spills – An Automated Early-Warning System / O. Kuzko, V. Lytvynov, N. Bouraou, Y. Zukovsky, O. Kyrychuk // COMNAP-XXIV Science Symposium Proceedings, Portland, USA, 2012. – P. 77 – 85.

Отримано 29.08.2013